



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil



Faculté des sciences et de la technologie
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

N° D'ORDRE : D-LMD...../2019

**Thèse présentée pour l'obtention du
DIPLOME DE DOCTORAT 3^{ème} CYCLES
SPECIALITE : GENIE CIVIL
OPTION : Géo-Matériaux et Environnement
PAR**

GUERZOU TOURKIA

**Influence de la pré-saturation des granulats recyclés sur
le comportement de béton ordinaire**

Date de soutenance : 28 / 02 /2019 à 10 H

Devant la commission de jury composé de :

Présidente:	BELAS Nadia	Professeur	Université de Mostaganem
Examineurs:	BOUHAMOU Nasr-Eddine	Professeur	Université de Mostaganem
	BENAISSA Abdelatif	Professeur	Université d'Oran USTO
Directeur de thèse:	MEBROUKI Abdelkader	Professeur	Université de Mostaganem

ANNÉE UNIVERSITAIRE: 2018/2019

DEDICACE

Je voudrais dédier ce modeste travail à :

Ma chère mère FATIMA pour laquelle les mots ne suffiront pas pour témoigner toute ma gratitude pour son entière disponibilité, son assistance et son dévouement tout au long de mon cursus et la réalisation de ce travail. « Que Dieu me la garde »

Ma chère tante NACERA

Mes chères sœurs : FETHIA et SOUHILA.

A BOUCHERA et MOHAMED

A ma grande mère

A Djihen, ça famille et son mari

A tous les doctorants de la faculté des sciences et de la technologie de l'université de
Mostaganem

A mes chers amies : Fouzia, Touatia, Imene, Nesrine, Kheira, Dahbia, Fatima, Wissem,
Amina et Hafsa

A mes chers collègues : Belguesmia, Benaissa, Hadj Sadouk, Safer, Bessaim, Zelmat,
Belhouari et Nefoussi

A mes amis : Nasser, Madjid, Mohamed, Zakaria, Sadek, Mourad, Ahmed, Kacem, Amine,
Djamel, Abdelhamid, Abdelah, Zidan et Ibrahim

A tous qui est su être à ma côté dans les moments difficile sans laquelle je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'elle m'a procuré, fasse dieu que je puisse l'honoré.

GUERZOU TOURKIA

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon dieu de nous avoir guidés et donnée la force et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous tenons à remercier tous ceux et celle qui de loin ou de près a contribué à finaliser ce modeste travail qu'on espère qu'il sera à la hauteur de leur engagement.

Un grand merci à madame **BELAS N** qui a accepté de lire notre travail, et pour ses précieux conseils. On la remercie énormément pour tout le temps qu'elle nous a consacré, et qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Un grand merci à **Mr BOUHAMOU** et à **Mr BENAISSA** qui nous ont fait l'honneur d'être présent parmi les membres de jury et avoir accepter d'examiner ce travail.

Un énorme et chaleureux merci à **Mr MEBROUKI** qui a su nous faire partager son savoir-faire et sa rigueur scientifique, pour son aide précieux, son disponibilité, son encouragement et ces conseils durant toute la durée de notre travail.

Un grand merci à Mr Khelifa Belkacem et Mostefa Fouzia pour ses aides durant tout le cursus.

Nos remerciements vont également à tous les laboratoires qui ont contribué à ce travail, LCTPE, LMPC, les laboratoires pédagogiques de l'université de Mostaganem et le laboratoire C-MADE d'université Beira Interior Covilha Portugal.

Nous sommes reconnaissants à l'ensemble des enseignants qui ont contribués à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence.

TABLE DES DES MATIERES

Dédicace	
Remerciement	
Table des matières	I
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XV
Liste des abréviations	XVIII
Résumé	1
Abstract	2
ملخص	3
Introduction générale	5

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Les différents types de granulats

I. 1. 1 Introduction	10
I. 1. 2 Définition des granulats	10
I. 1. 3 Différents types de granulats	12
1) Granulats naturels	12
2) Granulats artificiels	13
3) Granulats et composants légers	13
4) Granulats recyclés	14
a. Production des granulats recyclés	15
b. Propriétés des granulats recyclés	18
I. 1. 4 Conclusion	19

Chapitre 2 : La pré-saturation des granulats

I. 2. 1 Introduction	21
I. 2. 2 Méthodes de préparation du béton et teneur en eau du granulat	21

I. 2. 3 Formulation des bétons contenant des granulats recyclés	22
I. 2. 3. A Méthode de la pré-saturation et de la compensation d'eau	22
I. 2. 3. B Méthode de mélange en deux étapes	23
I. 2. 3. C Méthode du mortier équivalent	25
I. 2. 4 Absorption	26
I. 2. 5 Méthodes de mesure de l'absorption d'eau	27
I. 2. 5. A Essai au pycnomètre	27
I. 2. 5. B Pesée hydrostatique	29
I. 2. 5. C La masse volumique réelle et l'absorption d'eau norme NF EN 1097-6	31
I. 6. Conclusion	32

Chapitre 3 : Influence des granulats sur les propriétés des bétons

I. 3. 1 Introduction	34
I. 3. 2. Propriétés du béton à l'état frais	34
I. 3. 2. A. Masse volumique à l'état frais	35
I. 3. 2. B. Teneur en air « naturelle » du béton frais	35
I. 3. 2. C. Rhéologie du béton à l'état frais	35
I. 3. 2. D. Temps de prise	37
I. 3. 2. E. Chaleur d'hydratation	37
I. 3. 2. F. Durcissement	37
I. 3. 2. G. Retrait plastique	37
I. 3. 3. Propriétés du béton à l'état durci	37
I. 3. 3. A. Résistance à la compression	38
I. 3. 3. B. Résistance à la traction et à la flexion et l'énergie de rupture	39
I. 3. 3. C. Résistance à la fatigue	40
I. 3. 3. D. Module élastique	40
I. 3. 3. E. Fluage et retrait de séchage.....	40
I. 3. 4. Influence du rapport E/C sur la résistance du béton	40

I. 3. 5. Influence du rapport E/C et l'absorption des granulats légers	41
I. 3. 6. Durabilité du béton recyclé	43
I. 3. 6. A. Absorption d'eau des bétons	43
I. 3. 6. B. Perméabilité	43
I. 3. 6. C. Carbonatation	43
I. 3. 6. D. Migration des chlorures	44
I. 3. 6. E. Résistance aux sulfates	44
I. 3. 6. F. Résistance aux cycles de gel-dégel	44
I. 3. 7. Conclusion	45

Chapitre 4 : Les méthodes de traitement des granulats recyclés

I. 4. 1 Introduction.....	47
I. 4. 2 Traitement des granulats recyclés par carbonatation accélérée	47
I. 4. 3 Traitement de surface des granulats de béton recyclé par précipitation de carbonate microbien.....	50
I. 4. 4 Traitement se basant sur une méthode mécanique	51
I. 4. 5 Amélioration par trempage dans l'acide	51
I. 4. 6 Traitement par changement d'état de surface	52
I. 4. 7 Amélioration chimio-mécanique	52
I. 4. 8 Traitement thermique	53
I. 4. 9 Traitement thermique-mécanique	53
I. 4. 10 L'enrichissement assisté par micro-ondes des granulats de béton recyclé	53
I. 4. 11 Traitement thermique (l'étuvage)	58
I. 4. 12 Traitement thermique (cycles de chauffage et de refroidissement) :.....	59
I. 4. 13 Chauffage conventionnel (enrichissement thermique)	59
I. 4. 14 Amélioration de la qualité des granulats recyclés grossiers par le revêtement de ciment	60
I. 4. 15 Traitement des granulats recyclés par hydrofuge	67

I. 4. 16 Traitement par polymère	70
I. 4. 17 CONCLUSION	72
Axes de recherche et problématique	75

PARTIE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Chapitre 1 : Matériaux et méthode de formulation

II. 1. 1 Introduction	79
II. 1. 2 Matériaux utilisés	79
a. Le ciment	79
b. Granulats	80
c. Fillers calcaires	85
d. Adjuvant	85
e. Eau de gâchage	86
f. Résine	86
II. 1. 3 Formulations adoptées	87
a. La formulation de béton ordinaire par méthode de Dreux Gorisse 100% graviers naturels	88
b. La formulation de béton ordinaire par méthode de Dreux Gorisse gravier 100% recyclé	89
c. La formulation de béton ordinaire par méthode de Dreux Gorisse 50% GR+50% GN ...	90
d. Comparaison entre les trois formulations	90
II. 1. 4 Préparation des éprouvettes	91
II. 1. 5 Conclusion	92

Chapitre 2 : Méthodes expérimentales

II. 2. 1 Introduction	94
II. 2. 2 Essais de caractérisations physiques des matériaux	94
II. 2. 2. A. Equivalent de sable (NF P18-598)	94
II. 2. 2. B. Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)	94

II. 2. 2. C Module de finesse (NF P18-304)	96
II. 2. 2. D La masse volumique apparente	96
II. 2. 2. E La masse volumique absolue	97
II. 2. 2. F Consistance du ciment (NF EN 196-3)	98
II. 2. 2. G Temps de début de prise d'un ciment (NF EN 196-3)	99
II. 2. 2. H Absorption des granulats recyclés (NF EN 1097-6)	100
II. 2. 2. I Porosimétrie au mercure	101
II. 2. 3 Traitement des granulats recyclés.....	103
II.2.3. A Traitement des granulats recyclés par voix thermique.....	103
II.2.3. B Traitement des granulats recyclés par la pâte de ciment	104
II.2.3. C Traitement des granulats recyclés par résine	105
II. 2. 4 Essais de caractérisations physiques des bétons ordinaires.....	106
II. 2. 4. A À l'état frais (Essais de cône d'Abrams (NF P 18 451))	106
II. 2. 4. B. Essais de caractérisations mécaniques des bétons.....	106
II. 2. 4. B. 1 Essai de traction par flexion par trois points	106
II. 2. 4. B. 2 Essai de compression.....	107
II. 2. 5. Conclusion	107

PARTIE III : ANALYSES DES RESULTATS

Chapitre 1 : Résultats de pré-saturation des granulats recyclés

III. 1. 1 Introduction	110
III. 1. 2 Résultats et analyse	110
III. 1. 2. 1 La pré-saturation des granulats recyclés.....	110
III. 1. 3 Caractéristiques du béton ordinaire.....	111
III. 1. 3. 1 Caractérisation du béton ordinaire à l'état frais.....	111
III. 1. 3. 2. Caractéristique du béton à l'état durci	112
a. Résistance à la compression	113
b. Résistance à la traction par flexion	115

III. 1. 4 Conclusion.....	117
---------------------------	-----

Chapitre 2 : Résultats des traitements des granulats recyclés

III. 2. 1 introduction	119
III. 2. 2 Résultats sur les granulats recyclés traités par la voie thermique	119
III. 2. 2. 1 Masse volumique absolue	119
III. 2. 2. 2 Masse volumique apparente	120
III. 2. 2. 3 Absorption d'eau des granulats recyclés	121
III. 2. 2. 4 Perte de masse après traitement thermique (Pm)	122
III. 2. 2. 5 Analyse granulométrique.....	123
III.2. 2. 6 Affaissement au cône d'Abrams	123
III.2. 2. 7 Résistances mécaniques.....	124
III. 2. 2. 7. A. Résistance à la compression.....	124
III. 2. 2. 7. B. Résistances à traction	127
III. 2. 3 Résultats sur les granulats recyclés traités par pâte de ciment.....	130
III. 2. 3. 1 Masse volumique absolue.....	130
III. 2. 3. 2 Masse volumique apparente	131
III. 2. 3. 3 Absorption d'eau des granulats recyclés	131
III. 2. 3. 4 Analyse granulométrique.....	132
III.2. 3. 5 Affaissement au cône d'Abrams	133
III. 2. 3. 6 Résistances mécaniques	134
III. 2. 3. 6. A. Résistances à la compression	134
III. 2. 3. 6. B. Résistances à la traction	136
III. 2. 4 Résultats sur les granulats recyclés traités par Résine	138
III. 2. 4. 1 Masse volumique absolue.....	139
III. 2. 4. 2 La masse volumique apparente.....	139
III. 2. 4. 3 Absorption d'eau des granulats recyclés	140
III. 2. 4. 4 Analyse granulométrique.....	141

III. 2. 4. 5 Porosimétrie au mercure des granulats recyclés	142
III.2. 2. 5 Affaissement au cône d'Abrams	143
III. 2. 4. 6 Résistances mécaniques.....	144
III. 2. 4. 6. A. Résistance à la compression.....	145
III. 2. 4. 6. B. résistance à la traction	146
III. 2. 5 Conclusion	149
Conclusion générale	152
Référence bibliographique	157
Annexes	

LISTE DES FUGURES

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Les différents types de granulats

Figure I. 1 : Granulats naturels.....	13
Figure I. 2 : Granulats artificiels de Laitiers ou Scories (Résidus de haut fourneaux ou aciérie / soudage)	13
Figure I. 3 : Granulats et composantes légères (produits élaborés).....	14
Figure I. 4 : Granulats recyclés.	14
Figure I. 5 : Granulat recyclé [4].....	15
Figure I. 6 : Concassage des déchets de démolition (Centrale de tri Picheta dans le val d’Oise) [12]	17
Figure I. 7 : Eliminateur des matériaux légers par jet air	17
Figure I. 8 : Essai Los Angeles [26].....	19

Chapitre 2 : La pré-saturation des granulats

Figure I. 9 : Méthode de malaxage pour la méthode de pré saturation [33].	22
Figure I. 10 : processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale [33]	23
Figure I. 11 : Observation au MEB d’une fissure du granulat recyclé d’un béton préparé avec la méthode de mélange double [34].	24
Figure I. 12 : Observation au MEB d’une fissure de granulat recyclé d’un béton préparé avec la méthode de mélange normale [34].	24
Figure I. 13 : Principe de fonctionnement de la méthode de mélange en deux étapes [35].	25
Figure I. 14 : Absorption d’un granulat recyclé en fonction du temps [27].....	27
Figure I. 15 : Schématisation de l’essai au pycnomètre.	28
Figure I. 16 : Schématisation de l’essai pesée hydrostatique.	30
Figure I. 17 : La procédure de la méthode de chiffon	31

Chapitre 3 : Influence des granulats sur les propriétés des bétons

Figure I. 18 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur la teneur en air du béton [42]	35
Figure I. 19 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur l'affaissement du béton	36
Figure I. 20 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur la viscosité plastique du béton.....	36
Figure I. 21 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur la résistance à la compression du béton	39
Figure I. 22: Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur le seuil de cisaillement du béton.....	39
Figure I. 23: Influence du carbonation sur le béton de graviers recyclés.....	44

Chapitre 4 : Les méthodes de traitement des granulats recyclés

Figure I. 24 : Variation de la FSAS en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP [108].....	48
Figure I. 25 : Variation de la densité en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP [108].....	48
Figure I. 26 : Variation de la surface spécifique en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP	49
Figure I. 27 : Distribution de la taille des pores de la pâte de ciment (fraction 1,25/2,5 mm) et le GR (fraction 2,5/5 mm), avant et après carbonatation.	49
Figure I. 28: Traitement par précipitation microbienne (MEB) [123].....	50
Figure I. 29: MCP en fonction du pH des milieux de croissance [124].....	51
Figure I. 30: Déroulement d'essai de traitement par trempage en acide.....	52
Figure I. 31: Le système de battage par micro-ondes conçu et fabriqué pour être utilisé.....	54
Figure I. 32: Surface d'une particule GR avant (a) et après (b) le chauffage par micro-ondes.....	56
Figure I. 33 : Le système de la bénéfices des GR pour la simulation numérique.	56
Figure I. 34: Température de surface de GR après 1 min de traitement par échauffement à la micro-onde.	58

Figure I. 35: Tambour rotatif où l'encapsulation de l'agrégat recyclé a eu lieu.	60
Figure I. 36: Détails de l'encapsulation d'un grain agrégé	62
Figure I. 37: Résultats des essais gel –dégel effectués sur les agrégats étudiés.....	62
Figure I. 38: Essais d'absorption d'eau sur les agrégats sujets d'étude.	63
Figure I. 39 : Résistance à la compression de test pour tous les bétons évalués.....	64
Figure I. 40: Evaluation de l'impact du liant sur l'encapsulation des agrégats recyclés grâce au traitement d'image des images MEB dans l'échantillon M2CO, (a) les pores segmentés, (b) les zones de distribution des tailles des pores pour le grain, le revêtement et la pâte, (c) l'exemple de Segmentation des pores selon la zone (μm^2).	65
Figure I. 41: Les surfaces des pores des M2CO.....	65
Figure I. 42: Absorption d'eau des GR en fonction du nombre de trempages pour la fraction 5/10mm.....	68
Figure I. 43: La résistance en traction pour trois bétons	69
Figure I. 44: La résistance à la compression pour trois bétons	69
Figure I. 45: Variation du coefficient d'absorption d'eau avec une fraction granulaire.	70
Figure I. 46 : Variation du rapport de coefficient d'absorption d'eau avec la concentration de polymère.....	71

PARTIE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Chapitre 1 : Matériaux et méthode de formulation

Figure II. 1 : La récupération les déchets de démolition des bétons.	81
Figure II. 2 : Procédé adopté pour l'obtention des granulats recyclés.	81
Figure II. 3 : Analyse granulométriques de graviers 3/8.....	83
Figure II. 4 : Analyse granulométriques de graviers 8/16.....	83
Figure II. 5 : Granulométrie des sables non corrigé.....	84
Figure II. 6 : L'analyse des sables non corrigé et sable corrigé.	85
Figure II. 7 : Granulométrie de sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/16 et la courbe braisée	88

Figure II. 8 : Granulométrie de sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/16 et la courbe braisée.	88
Figure II. 9 : Granulométrie de sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/16 et la courbe braisée.	89
Figure II.10 : Les moules prismatique en acier et en bois.....	90
Figure II. 11 : Préparation dés éprouvette du béton.	92

Chapitre 2 : Méthodes expérimentales

Figure II. 12 : Essai d'équivalent de sable.	95
Figure II. 13 : Analyse granulométrique	96
Figure II. 14 : La masse volumique apparente	97
Figure II. 15 : Les masses volumiques absolues à l'aide d'une éprouvette graduée.....	98
Figure II. 16 : La masse volumique du ciment avec benzène	98
Figure II. 17 : Consistance de ciment.....	99
Figure II. 18 : Début et fin de prise de ciment..	100
Figure II. 19 : Le mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau par la méthode de chiffon	101
Figure II. 20 : Pénétrromètre	102
Figure II. 21 : Porosimétrie à mercure AUTOPORE IV de micromètics	103
Figure II. 22 : Traitement thermique des granulats recyclés.....	104
Figure II. 23 : Traitement des granulats recyclés de classe 3/8 et 8/16.....	104
Figure II. 24 : Traitement par résine	105
Figure II. 25 : L'essai d'affaissement au cône d'Abrams	106
Figure II. 26 : Essai de traction par flexion.....	107
Figure II. 27 : Essai de compression.	107

PARTIE III : ANALYSES DES RESULTATS

Chapitre 1 : Résultats de pré-saturation des granulats recyclés

Figure III. 1 : Diagramme de l'absorption d'eau en fonction du temps.....	110
Figure III. 2 : L'affaissement au cône d'Abrams des bétons.	112

Figure III. 3 : Apparence des bétons à l'états frais	112
Figure III. 4 : Apparence des bétons à l'états durcie	113
Figure III. 5 : Courbe de résistances à la compression des différentes éprouvettes.....	114
Figure III. 6 : Histogramme de l'évolution des résistances à la compression.	115
Figure III. 7 : Courbe de résistances à la traction des différentes éprouvettes.....	116
Figure III. 8 : Histogramme de résistance à la traction des différents bétons.....	117

Chapitre 2 : Résultats des traitements des granulats recyclés

Figure III.9 : Histogramme de variation des masses volumiques absolues avant et après traitement thermique	120
Figure III.10 : Histogramme de la masse volumique apparente avant et après traitement thermique.....	121
Figure III.11 : Histogramme de l'absorption d'eau avant et après traitement thermique	122
Figure III. 12 : Les courbes d'analyse granulométrie des graviers naturels et recyclés (3/8 et 8/16) avant et après traitement thermique.	123
Figure III. 13 : L'affaissement au cône d'Abrams	124
Figure III. 14 : Evolution de résistances à la compression des éprouvettes à différentes échéances.....	125
Figure III. 15 : Courbes de résistances à la compression des différents bétons à base de 100% de différents granulats.	125
Figure III. 16 : Histogramme des résistances à la compression de béton à 50% GR.....	126
Figure III. 17 : Les courbes des résistances à la compression des bétons à 50% GR.....	127
Figure III.18: Evolution des résistances à la traction des bétons à 100% granulats.	128
Figure III.19: Les courbes des résistances à la traction des bétons à 100% granulats.	128
Figure III. 20: Evolution des résistances à la traction des bétons à 50% granulats recyclés.	129
Figure III. 21 : Les courbes des résistances à la traction des bétons à 50% granulats recyclés.	129
Figure III. 22 : Histogramme de la masse volumique absolue avant et après traitement par pâte de ciment.	130

Figure III. 23: Histogramme de la masse volumique apparente avant et après traitement par pâte de ciment.....	131
Figure III. 24 : Histogramme de l'absorption d'eau avant et après traitement par pâte de ciment.	132
Figure III. 25 : L'analyse des granulats recyclés des granulats recyclés (3/8 et 8/16) avant et après traitement par pâte de ciment.....	133
Figure III. 26 : L'affaissement au cône d'Abrams	133
Figure III. 27 : Evolution des résistances à la compression des bétons à 100% graviers.	134
Figure III. 28 : Courbe des résistances à la compression des bétons à base de 100% granulats	135
Figure III. 29 : Les résistances à la compression des bétons à base de 50% granulats.....	136
Figure III. 30: Les courbes de résistances à la compression des bétons à base de 50% granulats.	136
Figure III. 31 : Les résistances à la traction des bétons à base de 100% granulats.....	137
Figure III. 32 : Les courbes de résistances à la traction des bétons à base de 100% granulats.	137
Figure III. 33 : Les résistances à la traction des bétons à base de 50% granulats.....	138
Figure III. 34 : Les courbes de résistances à la traction des bétons à base de 50% granulats	138
Figure III. 35 : Histogramme de la masse volumique absolue avant et après traitement par résine	139
Figure III. 36 : Histogramme de la masse volumique apparente avant et après traitement par résine	140
Figure III. 37 : Histogramme de l'absorption d'eau avant et après traitement par résine.....	141
Figure III. 38 : Analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés (3/8 et 8/16) avant et après traitement par résine.....	141
Figure III. 39: Distribution porales des granulats traité et non traité par résine	142
Figure III. 40 : L'affaissement au cône d'Abrams	143
Figure III. 41: Variation des résistances à la compression à base de 100% de granulats	144
Figure III. 42: Courbes des résistances à la compression à base de 100% de granulats.	144

Figure III. 43: Variation des résistances à la compression à base de 50% de granulats combinés.....	145
Figure III. 44: Courbes des résistances à la compression à base de 50% de granulats combinés	146
Figure III. 45: Variation des résistances à la compression à base de 100% de granulats	147
Figure III. 46: Courbes des résistances à la compression à base de 100% de granulats	147
Figure III. 47: Variation des résistances à la traction à base de 50% de granulats combinés	148
Figure III. 48: Courbes des résistances à la compression à base de 50% de granulats combinés	148
.....	

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Les différents types de granulats

Tableau I. 1 : Caractéristiques et dimensions des granulats	11
---	----

Chapitre 4 : Les méthodes de traitement des granulats recyclés

Tableau I. 2: Absorption d'eau des GR avant et après carbonatation	49
--	----

Tableau I. 3: Propriétés électromagnétique, thermique et structural de granite et mortier utilisé dans la simulation.....	57
---	----

Tableau I. 4: Propriétés des GR avant et après traitement l'utilisation des techniques multiples.....	57
---	----

Tableau I. 5: Le détail du procès d'encapsulation de GR	62
---	----

Tableau I. 6: Conception de mélange et l'affaissement à l'état frais.	63
--	----

Tableau I. 7: La distribution de taille de pores des matrices en encapsulation des GR.	66
---	----

Tableau I. 8: La distribution de taille de pores des matrices de la zone de transition qui entoure des GR.....	66
--	----

Tableau I. 9: Compositions des trois bétons	68
---	----

Tableau I. 10 : Coefficients (L.A) d'agrégats naturels, traités et non traités GBR.....	72
---	----

PARTIE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Chapitre 1 : Matériaux et méthode de formulation

Tableau II. 1 : Caractéristique effectué dans le laboratoire.....	79
---	----

Tableau II. 2 : Analyse chimique depuis la fiche technique.	80
--	----

Tableau II. 3 : Propriétés physiques depuis la fiche technique.	80
--	----

Tableau II. 4 : Les désignations, l'apparence et la nature des granulats.	82
--	----

Tableau II. 5 : Les caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale.....	82
--	----

Tableau II. 6 : Les volumes absolus et les masses des constituants du béton.....	88
--	----

Tableau II. 7 : Les constituants d'un mètre cube de béton ordinaire.	88
Tableau II. 8 : Les volumes absolus et les masses des constituants du béton.	89
Tableau II. 9 : Les constituants d'un mètre cube de béton ordinaire.	89
Tableau II. 10 : Les volumes absolus et les masses des constituants du béton.	90
Tableau II. 11 : Les constituants d'un mètre cube de béton ordinaire.	90
Tableau II. 12 : La comparaison entre les trois formulations.	91

PARTIE III : ANALYSES DES RESULTATS

Chapitre 1 : Résultats de pré-saturation des granulats recyclés

Tableau III. 1 : Résultats d'essai d'affaissement au cône d'Abrams.	111
Tableau III. 2 : Résultats des mesures des résistances à la compression en fonction de temps des bétons ordinaires confectionnés.	113
Tableau III. 3 : Valeurs des résistances à la traction par flexion.	116

Chapitre 2 : Résultats des traitements des granulats recyclés

Tableau III. 4 : La masse volumique absolue des granulats recyclés avant et après traitement	119
Tableau III. 5 : La masse volumique apparente des granulats recyclés avant et après traitement	120
Tableau III.6 : Absorption d'eau des granulats naturels et recyclés avant et après traitement	121
Tableau III. 7: La masse volumique absolue des granulats recyclés avant et après traitement par pâte de ciment.	130
Tableau III. 8 : La masse volumique apparente des granulats recyclés avant et après traitement.	131
Tableau III. 9 : Absorption d'eau des granulats recyclés avant et après traitement.	132
Tableau III. 10 : La masse volumique absolue des granulats recyclés avant et après traitement	139

Tableau III. 11 : La masse volumique apparente des granulats recyclés avant et après traitement.....	139
Tableau III. 12 : Absorption d'eau des granulats naturels et recyclés avant et après traitement	140

LISTE DES ABREVIATIONS

GN	Granulats Naturels
GR	Granulats Recyclés Avant traitement
GR-T	Granulats Recyclés Après traitement Thermique
GR-P	Granulats Recyclés Après traitement par Pâte de ciment
GR-R	Granulats Recyclés Après traitement par Résine
BGN	Béton à base de 100% Granulats Naturels
BGR	Béton à base de 100% Granulats Recyclés
BGRNS	Béton à base de 100% Granulats Recyclés Non Saturés
BGRS	Béton à base de 100% Granulats Recyclés Saturés
BGR-T	Béton à base de 100% Granulats Recyclés traité Thermiquement
BGR-P	Béton à base de 100% Granulats Recyclés traité par Pâte de ciment
BGR-R	Béton à base de 100% Granulats Recyclés traité par Résine
B 50% GN+ 50% GR	Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés
B 50% GN+ 50% GR-T	Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés traité Thermiquement
B 50% GN+ 50% GR-P	Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés traité par Pâte de ciment
B 50% GN+ 50% GR-R	Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés traité par Résine
Pm	Perte de masse

RESUME

Les granulats issus des bétons de démolition peuvent être utilisés comme granulats en alternatif aux granulats naturels issus des carrières. Cette initiative, selon plusieurs études établies, a plusieurs avantages techniques, économiques et environnementales, à condition de pallier aux problèmes posés par l'absorption importante de l'eau par les granulats recyclés. Dans ce contexte, la présente étude consiste à valoriser le béton de démolition, de récupérer par concassage les granulats durs de ce béton. Il s'est avéré que ces granulats sont entourés de l'ancienne pâte de ciment qui est poreuse et absorberait beaucoup d'eau. Pour cela, il a été convenu de mesurer la quantité d'eau absorbée et de suivre son évolution en fonction du temps pour avoir en fin de l'opération, le temps nécessaire à la saturation totale d'un volume donné de granulats recyclés. Plusieurs méthodes de mesure sont proposées par la littérature dont celle dite "*méthode du chiffon*" de la norme (NF EN 1097-6) par rapport aux autres méthodes. Le choix de cette méthode est basé sur sa simplicité et sur la précision de ses résultats. Une fois les quantités d'eau absorbées déterminées pour des mélanges composés de 100% de granulats recyclés (GR) puis de (50% de granulats recyclés et 50% de granulats naturels(GN)), deux façons de malaxages ont été testés, celle de saturer les granulats au préalable avec les quantités d'eau de saturation mesurées et celle d'ajouter ces quantités à l'eau de gâchage lors du malaxage. Les résultats obtenus ont montré que la deuxième méthode a donné des bétons ségrégués. Les résistances mécaniques ont été mesurées sur des bétons élaborés avec des granulats pré-saturés (100% granulats recyclés et 50% GR-50% GN), ces résistances ont été comparées à celles des bétons de références confectionnés avec 100% GN. Comme les granulats recyclés absorbent beaucoup d'eau, on a effectué des traitements par voie thermique, par pâte de ciment puis par résine pour diminuer la porosité de ces granulats. Cette étude consiste aussi en l'analyse des propriétés physiques des granulats naturels et recyclés avant et après traitement ainsi que leur impact sur les propriétés mécaniques des bétons.

Mots clés : Granulats recyclés, pré-saturation, absorption, béton ordinaire, traitements, résistance.

ABSTRACT

Aggregates coming from concretes demolition can be used as aggregates in alternative to natural aggregates stemming from careers. This initiative, according to several established studies, has several technical, economic and environmental advantages, on the condition to mitigating problems posed by the important water absorption of the recycled aggregates.

In this context, the present study consists in getting back the demolition concrete, to get back by crushing the hard aggregates of this concrete. It has proved that these aggregates are surrounded with the old cement paste, which is porous and would absorb an important water quantity. For that purpose, it was being advisable to measure the absorbed water quantity and to follow its evolution according to time and have at the end, required time for the total saturation of a given recycled aggregates volume. Several measuring methods are proposed by the literature, one of them "chiffon method" according to the standard (NF IN 1097-6). The choice of this method is based on its simplicity and its results precision. Once the water absorbed quantities determined for concretes mixtures made with 100 % recycled aggregates (RG) then with (50 % recycled aggregates and 50 % of natural aggregates (NG)), two manipulations manners were tested, to saturate aggregates initially with water saturation measured quantities and that to add these quantities to the mixing water during concrete preparation. The obtained results showed that the second choice gave segregate concretes. The mechanical resistances were measured on concretes developed with pre-saturated aggregates (100 % RG) and (50% RG - 50% GN), these resistances were compared to those of the reference concretes made with 100 % GN. Because of the high water absorption of recycled aggregates, we propose treatment by heat, cement paste then resin. This study consists also of the analysis of the physical properties of natural aggregates and recycled before and after treatment as well as their impact on the mechanical properties of concretes.

Key words: Recycled Aggregates, pre-saturation, absorption, ordinary concrete, treatments, strength.

ملخص

يمكن استعمال البحص المتحصل عليها من تهديم البنايات كبديل للحصى الطبيعي المتحصل عليها من المحجر. هذه العملية، حسب مجموعة من الدراسات، لها حسنات ومزايا تقنية، اقتصادية وبيئية بشرط التغلب على المشاكل التي يطرحها الامتصاص الكبير للمياه من قبل الحصى المعاد تدويرها. في هذا السياق، فإن الدراسة الحالية تهدف إلى استرداد خرسانة الهدم عن طريق سحق المجاميع الصلبة لهذه الخرسانة وتحويلها إلى بحص. واتضح أن هذا البحص محاطة بعجينة الأسمنت القديمة التي تحتوي على ثقب كثيرة والتي تمتص الكثير من الماء. لهذا، قررنا أن نقوم بقياس كمية الماء التي تم امتصاصها ومتابعة تطورها عبر الزمن للحصول عند الانتهاء من العملية على الوقت المطلوب لتشبع الكامل لحجم معين من الحصى المعاد تدويرها. اقترحت عدة طرق للقياس في البحوث ومن بينهم ما يسمى بـ "طريقة خرقة" من القانون (EN1097-6) ويستند اختيار هذه الطريقة على البساطة ودقة نتائجها.

وبمجرد تحديد كميات الماء التي تم امتصاصها المقررة للخليط مكون من 100 % البحص المعاد تدويرها تليها (50% من البحص المعاد تدويره و 50% من البحص الطبيعي)، تم اختبار طريقتين لمزج الخرسانة، الأولى أن يتم تشبيح البحص مقدما والثانية أن يتم إضافة كمية الماء الممتصة إلى ماء الخلط أثناء المزج. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الطريقة الثانية أعطى الخرسانة المفصولة المكونات. تم قياس القوة الميكانيكية على الخرسانة أعدت بالبحص المشبعة (100% البحص المعاد تدويرها و 50 % البحص طبيعي % - 50 البحص معاد تدويرها)، وتمت مقارنة المقامات مع تلك الخرسانة الشاهدة (الأصلية) مع 100 % البحص طبيعي. و لان البحص المعاد تدويرها تمتص الكثير من الماء، قمنا بعلاجها عن طريق الحرارة ، التغليف بطبقة من الاسمنت ، أو استعمال الراتنج (Résine) . وتنطوي هذه الدراسة أيضا في تحليل الخصائص الفيزيائية البحص الطبيعية و المعاد تدويرها قبل وبعد المعالجة وتأثيرها على الخواص الميكانيكية للخرسانة.

الكلمات المفتاحية : البحص المعاد تدويرها، التشبع القبلي، الامتصاص، خرسانة عادية، المعالجة، قوة التحمل.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Devant les besoins croissants des ressources en matériaux et des exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets. La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Les industries, notamment du bâtiment, sont aujourd'hui contraintes de modifier leurs techniques de production et/ou de mise en œuvre.

Il a été observé ces dernières années dans le secteur du BTP, une augmentation conséquente du nombre de constructions, qui se traduit par un besoin toujours croissant de matières premières. Or, les gisements naturels de granulats potentiellement exploitables se raréfient et les industriels font face à une difficulté d'approvisionnement croissante.

La problématique environnementale des bétons se retrouve également en fin de vie du matériau. Le secteur du bâtiment produit une quantité de déchets extrêmement importante dont la partie principale est aujourd'hui éliminée en décharge. Parmi les différents modes de gestion des déchets, le recyclage est considéré comme la voie principale de la valorisation de ces derniers, les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire de suivre cette voie.

Les granulats sont souvent considérés comme inertes alors qu'ils influencent de manière significative sur les propriétés des bétons, au jeune âge et à long terme. En effet, de leur granulométrie, leur forme, leur porosité (souvent exprimée en termes d'absorption massique) et de leur taux de saturation initial dépendent la consistance, l'hydratation, les propriétés mécaniques, la durabilité et les déformations différées des bétons. Dans la pratique, on utilise autant que possible des granulats compacts (de faible absorption) pour lesquels l'effet de l'absorption d'eau et du taux de saturation initial peuvent être négligés. Cependant il est difficile de trouver ces granulats en quantités suffisantes et à des coûts acceptables, en particulier dans les zones à forte densité de population. Les coûts (économiques et environnementaux) du transport et les nuisances liées à l'exploitation des carrières ont un impact important sur les ressources disponibles. Les producteurs du béton sont donc désormais contraints d'utiliser des granulats relativement poreux (absorption supérieure à 2%) ou des granulats recyclés [47].

Formuler des bétons à partir de granulats – naturels ou recyclés – relativement poreux nécessite une bonne connaissance de leurs propriétés, afin de respecter les critères de résistance mécanique minimale et les valeurs limitées de composition telles que le rapport Eau/Ciment maximal. L'absorption à 24 heures [NF EN 206-1] est généralement la mesure de référence pour calculer l'eau absorbée (E_{abs}) par les granulats qui, ajoutée à l'eau efficace (E_{eff}) et donnerait l'eau totale (E_{tot}) nécessaire pour la composition du béton.

Cependant, la prise et la structuration de la pâte de ciment ont généralement lieu avant que cette quantité d'eau soit absorbée par des granulats initialement secs (ou libérée par des granulats humides). La quantité d'eau restant dans la pâte ne correspond alors plus au calcul de (E_{eff}) et le rapport eau efficace sur ciment (E_{eff} / C) [27], paramètre essentiel pour la durabilité [NF EN 206-1] s'en trouve modifié. L'absorption d'eau à 30 minutes est ainsi préconisée pour la formulation de béton de granulats recyclés. Plusieurs études mettent en évidence cette influence de taux de saturation initial des granulats sur le comportement des bétons [69].

L'absorption importante d'eau par ces granulats peut affecter le comportement vis-à-vis du retrait plastique et donc de la fissuration. Le taux de saturation initial des granulats naturels affecte aussi bien le retrait plastique que la résistance à long terme des bétons. L'absorption d'eau des granulats recyclés peut se traduire par une perte d'ouvrabilité du béton frais. Il est donc indispensable de disposer de l'amplitude et de la cinétique d'absorption d'eau des granulats, dès qu'ils sont relativement poreux [37].

Par rapport à des bétons de granulats naturels, les bétons de granulats recyclés présentent des particularités de formulation, cette demande en eau qui se traduit par un supplément d'eau (E_{abs}) de 5 à 15% d'après la littérature [39].

C'est pourquoi, nous avons entamé cette étude expérimentale comparative dans un but écologique et technique en valorisant les granulats recyclés obtenus par concassage du béton comme un matériau de construction substituable en partie au squelette granulaire. Par la suite, une étude scientifique sur la caractérisation des propriétés physique de ces granulats recyclés, les essais de la pré-saturation (quantité d'eau absorbée) et des performances mécaniques des bétons seront les points choisis à développer.

L'objectif principal de cette recherche sera d'essayer de valoriser les granulats recyclés en utilisant des méthodes de traitements qui permettraient de diminuer la forte

absorption d'eau due à leur grand pourcentage de porosité. Il sera mesuré les quantités d'eau absorbées par les granulats recyclés issus des anciens bétons de démolition avant traitement, puis de mesurer leur absorption après que ces granulats aient subi des traitements tel que le traitement thermique à 500°C durant deux (02 heures), traitement par pâte de ciment conformément à ce qui a été trouvé dans la littérature et un traitement par résine.

Ce manuscrit comporte trois parties: Après une introduction générale sur la problématique, sur l'insuffisance des granulats naturels face aux besoins de fonctionnement des chantiers de grands projets lancés en Algérie et l'impact de la décharge des déchets de démolition sur l'environnement et sur l'économie. Une revue bibliographique comportant un ensemble de généralités sur les granulats utilisés dans le béton: un rappel sur les différents types de granulats, un aperçu général sur les méthodes et les moyens nécessaires à l'élaboration des granulats recyclés et enfin l'ensemble des caractéristiques des granulats (chimiques, mécaniques et thermiques), les différents essais d'absorption d'eau à base de granulats recyclés, les propriétés des bétons frais et durci et le traitement des granulats recyclés est présentée dans la première partie

La seconde partie sera consacrée aux matériaux utilisés et aux essais avant et après traitement thermique, en définissant les caractéristiques des matériaux utilisés et les méthodes expérimentales selon les normes en vigueur,

La dernière partie concerne les résultats et discussions sur les essais physiques et mécaniques (résistances mécaniques).

Enfin, nous clôturons notre étude par une conclusion générale et des perspectives susceptibles d'ouvrir d'autres horizons vers d'autres axes de recherches toujours bénéfiques à l'environnement et à la qualité de la construction.

Partie I :

**Etudes
bibliographiques**

Chapitre 1 :

Les différents types des granulats

I. 1. 1 INTRODUCTION

Le béton est un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes, donc il rend plus durable. Il permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages ainsi que des centrales thermiques et nucléaires. Le béton est obtenu en solidarissant un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir un béton, après réaction physico-chimique entre eux. Les agrégats occupent généralement 70-80% du volume de béton, sa sélection et le dosage doivent recevoir une attention particulière afin de contrôler la qualité de la structure en béton.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

Dans ce chapitre, on va définir les granulats et ces différents types, voir les caractéristiques physiques et chimiques des granulats et les possibilités de les utiliser dans le domaine de génie civil.

I. 1. 2 DEFINITION DES GRANULATS

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux. La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés). La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Les dimensions des granulats comprise entre 0 et 125 mm sont désignées par le couple d/D appelé classe granulaire (Tableau I. 1), avec :

d : dimension inférieure du granulat

D : dimension supérieure du granulat

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques générales des granulats en fonction de leurs dimensions.

Tableau I. 1 : Caractéristiques et dimensions des granulats.

Les granulats les plus utilisés		
Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70% de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont :

- **Les fillers**
- **Les sables**
- **Les graves**
- **Les gravillons**

Les granulats sont considérés comme courant lorsque leur masse volumique est supérieure à $2t/m^3$ et légers si elle est inférieure à $2t/m^3$. Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration. Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques.

1) Des caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité de gisement, telles que, par exemple :

- La masse volumique réelle
- L'absorption d'eau et la porosité
- La sensibilité au gel
- La résistance à la fragmentation et au polissage
- La gélivité.

2) Des caractéristiques de fabrication, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

- La granularité
- La forme (aplatissement)
- La propreté des sables.

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leurs familles (gravillons, sables, fillers) et font l'objet de méthode de détermination adaptée.

I. 1. 3 DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS

Les granulats, en fonction de sa nature et de son origine, peuvent-être :

1) Granulats naturels

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives. Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long de fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes ; les roches massives éruptives constituent les massifs anciens. (Figure I. 1)

➤ **Origine minéralogique :**

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, des roches métamorphiques telles que les quartz et quartzites ou de roches éruptives tels que les ballastes, les granites, les porphyres.

➤ **Granulats roulés et granulats de carrières**

Indépendamment de leur origine minéralogique [1], on classe les granulats en deux catégories.

- **Les granulats de roche meuble**, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

- **Les granulats de roche massive**, sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. La figure ci-dessous présente l'aspect général des granulats naturels.



Figure I. 1 : Granulats naturels

Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage.

2) Granulats artificiels

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques. (Figure I. 2)

- **Sous- produit industriels, concassés ou non**, les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenu par refroidissement à l'eau.
- **Granulats à hautes caractéristiques**, il s'agit de granulats élaborés industriellement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux) ou granulats réfractaires.

Quelques types de pierres sont présentés dans la figure ci-dessous.



Figure I. 2 : Granulats artificiels de Laitiers ou Scories

(Résidus de haut fourneaux ou aciérie / soudage)

3) Granulats et composants légers

- **Les granulats légers**, usuels sont l'argile expansée, le schiste expansé ou le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granulométrie, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons

présentant une bonne isolation thermique. Les gains de poids sont intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³. (Figure I. 3)

• **Les composants légers**, sont d'origine aussi végétale et organique que minérale. Le polystyrène expansé et le liège, d'origine non minérale, le bois, ainsi que la vermiculite sont également utilisés pour réaliser des bétons très légers en isolation ou pour des chapes. Très légers – de 20 à 100 kg/m³ – ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. Ils sont donc particulièrement adaptés pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles ou rechargements sur planchers peu résistants.

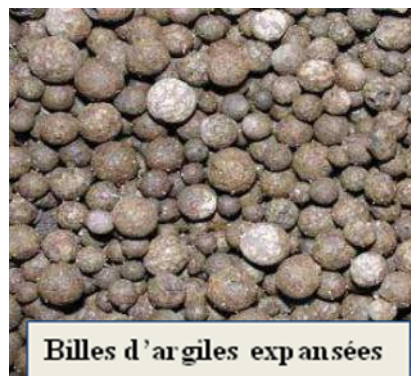


Figure I. 3 : Granulats et composantes légères (produits élaborés).

4) Granulats recyclés

Obtenue par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments (recyclage de béton de démolition). (Figure I. 4)



Figure I. 4 : Granulats recyclés.

Les granulats recyclés sont des granulats provenant du recyclage de débris de démolition. Ces granulats sont considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine [2]. La teneur en mortier en résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [3] parce qu'il permet d'évaluer leurs qualités. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat origine et le mortier résiduel. Cette zone de transition se forme entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La configuration du granulat recyclé est illustrée sur la figure I. 5.

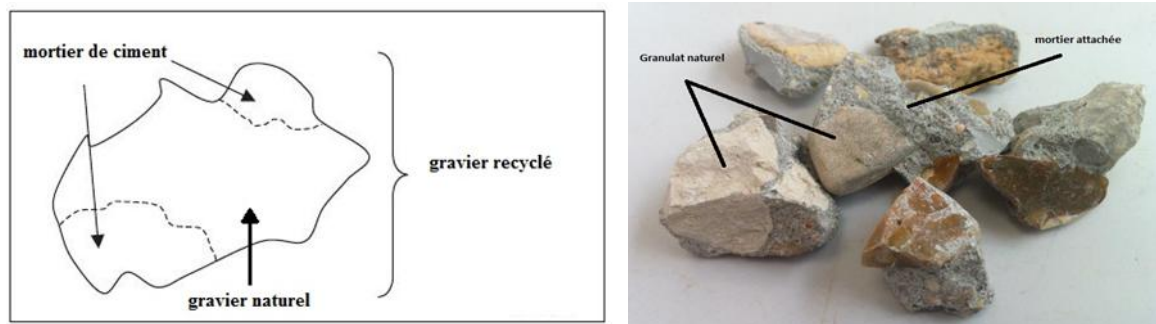


Figure I. 5 : Granulat recyclé [4].

a. Production des granulats recyclés :

Les matériaux de démolition présentent souvent une grande diversité, et nécessitent une sélection : afin d'être réutilisés. On peut les classer en quatre grandes catégories :

- (1) Les matériaux de déconstruction de bâtiments et ouvrages d'art : béton (armé ou non), sans enduit, ni plâtre, ni amiante ou autre déchets industriels spéciaux
- (2) Les matériaux de déconstruction de chaussées : traités ou non aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, bordure en béton, pierre naturelle... (nb : les granulats enrobés de liant hydrocarbonés sont impropres à la formulation de nouveaux bétons, surtout si ceux-ci sont susceptibles de subir incendies).
- (3) Les mélanges de matériaux composites : ossatures en béton, maçonnerie, relativement pauvre en plâtre, verre, bois, plastique... etc.
- (4) Les mélanges hétérogènes du même type mais avec des teneurs en matériaux indésirables supérieures à 10%.

Il faut noter que plus de 90% des approvisionnements ont pour origine les catégories (1) et (2).

Les méthodes de production des granulats recyclés doivent distinguer la phase de déconstruction et la phase d'élaboration. L'une et l'autre font appel à des procédés devant être adaptés d'une part à l'ouvrage « ressource » et d'autre part au matériau récupéré. Le choix de ces procédés conditionne les propriétés du matériau et les performances du produit fabriqué ultérieurement.

Le recyclage de granulats issus de bétons de démolition passe par différentes étapes :

- **Sélection et tri :**

De nombreuses études ont permis de démontrer la faisabilité technique et économique de la déconstruction sélective [5].

Les déchets inertes représentent théoriquement 94% des déchets de l'activité déconstruction mais en réalité, ce taux n'est que 60% car certains déchets non inertes ne peuvent être séparés des autres : restes de plâtre sur les bétons, présence d'éléments de second œuvre comme le bois et les plastiques qui n'ont pu être retirés des murs [6]. Or à ce jour, si la valorisation des du béton pur atteint un taux de 77,7%, le taux de recyclage des déchets inertes en mélange atteint tout juste les 12% [7]. Cette situation devrait être améliorée car les plans de gestion des déchets du BTP recommandent de faire réaliser un diagnostic déchets de l'ouvrage à démolir. [8][9].

- **Elaboration des granulats recyclés :**

L'élaboration des granulats recyclés est réalisée dans des installations fixes ou mobiles qui comprennent les mêmes grandes phases d'élaboration que les installations pour les granulats naturels (concassage, criblage et éventuellement lavage). Un prétraitement spécifique doit cependant être exécuté. Il consiste à réaliser le cisailage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments. (Figure I. 6)

Le concasseur à percussion présente une meilleure réduction de la granulométrie (avec moins d'éléments fins) et facilite la séparation des armatures du béton mais l'usure du matériel est importante et la granulométrie d'entrée limitée [10]. Il permet également d'obtenir une meilleure cubicité du matériau sortant [11].



Figure I. 6 : Concassage des déchets de démolition
(Centrale de tri Picheta dans le val d’Oise) [12]

- **Elimination des polluants :**

En ce qui concerne les appareillages spécifiques à l’amélioration des granulats recyclés, on trouve tous les appareillages ou permettant d’éliminer les impuretés. Ces impuretés sont principalement du métal (élimination manuelle ou par séparateur magnétique), du bois (élimination par voie humide), du plâtre (tri manuel), du carton ou papier, du plastique (élimination par air). L’élimination des contaminants légers peut se faire par flottation du type « aquamator » [11]. (Figure I. 7)



Figure I. 7 : Eliminateur des matériaux légers par jet air

- **Stockage des granulats recyclés :**

La conservation des granulats recyclés après traitement se fait dans des aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou silos [13], selon des critères bien

précis et qui sont fonction de la provenance des granulats, de la forme des grains, de la nature des opérations de traitement et de la granulométrie. HANSEN [14], conseille de stocker les différents types de granulats séparément l'un de l'autre, et de ne pas conserver les sables recyclés pendant longtemps [15].

b. Propriétés des granulats recyclés :

La présence du mortier résiduel attaché au granulat original affecte plusieurs propriétés du granulat. Les propriétés détaillées dans cette section sont la distribution granulométrique, la masse volumique, l'absorption d'eau et la résistance à l'abrasion.

- **Distribution granulométrique :**

Les granulats recyclés ont souvent plus de particules fines que les granulats naturels [16]. Cependant, on ne peut pas généraliser cette caractéristique puisqu'elle varie beaucoup en fonction du type de granulat recyclé utilisé et du type de granulat naturel auquel on le compare.

- **Masse volumique :**

La densité relative du granulat recyclé est moins grande que celle du granulat naturel [2][16][17][18][19]. La littérature à ce sujet indique que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m³) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m³). La masse volumique plus faible des granulats recyclés est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle du granulat original et diminue par conséquent la masse volumique totale du granulat recyclé [16]. Cette réduction en densité est fonction de la teneur en mortier résiduel [17].

- **Absorption :**

Les études réalisées sur les granulats recyclés ont relevé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grandes pour les granulats recyclés que les granulats naturels [2][16][18][19][20][21][22][23]. Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre le granulat recyclé et granulat naturel [18]. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour un granulat naturel celles-ci sont souvent en deçà 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [23].

- **Résistance à l'abrasion :**

Lors de l'essai de résistance à l'abrasion Los Angeles, tout le mortier résiduel lié au granulat d'origine se détache de celui-ci sous l'effet de l'abrasion [17]. On observe ainsi une grande perte de masse pour le granulat recyclé ce qui explique des coefficients Los Angeles plus élevés que ceux généralement relevés pour des granulats naturels [16][18][19][24][25]. La résistance à l'abrasion est donc directement reliée à la résistance à la teneur en mortier résiduel [17]. (Figure I. 8)



Figure I. 8 : Essai Los Angeles [26].

I. 1. 4 CONCLUSION

Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons ; du point de vue économique, ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher ; du point de vue technique, ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment. Il faut par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes :

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité ;
- La quantité de la pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

Chapitre 2 :

La pré-saturation des granulats

I. 2. 1 INTRODUCTION

Les granulats recyclés de bétons ont comme caractéristique une forte capacité d'absorption. Cette propriété reste vraie quelle que soit la provenance du béton parent.

Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions des bétons de granulats recyclés de béton nécessitent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de granulats naturels.

Cette absorption est bien évidemment la conséquence de la présence de la pâte de ciment, mais plus particulièrement de sa structure alvéolaire. En effet, la pâte de ciment est reconnue pour être un matériau poreux, les interstices ont tendances à capter l'eau et à la retenir. Il n'y a donc pas suffisamment d'eau libre pour hydrater les grains de ciment.

Compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), la consistance du béton à base de ces agrégats (selon le pourcentage de substitution), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui de béton témoin à base de grains naturels.

Dans ce chapitre seront définies les méthodes de quantification de la quantité d'eau absorbée par les granulats recyclés.

I. 2. 2 METHODES DE PREPARATION DU BETON ET TENEUR EN EAU DU GRANULAT

La méthode de préparation du béton est étroitement liée à la teneur en eau du granulat lors de la préparation. Il est donc nécessaire de traiter ces deux points ensemble. Plusieurs méthodes de préparation et de formulation ont été développées spécifiquement pour les bétons contenant les granulats recyclés. Ces méthodes de préparation alternatives cherchent généralement à compenser l'effet négatif de la grande absorption du granulat sur les propriétés du béton. La grande absorption du granulat recyclé fait en sorte qu'il peut absorber l'eau du mélange s'il n'est pas initialement humide ou saturé lors de la préparation du béton. Plusieurs méthodes sont utilisées pour contrôler ce problème avec des résultats parfois contradictoires.

Par exemple, Buter a observé une augmentation des résistances à la compression de 28% et 8% par rapport au granulat naturel pour des bétons de 30 et 50 MPa respectivement en

utilisant des granulats pré-saturés pendant 24 heures [20]. Il obtient donc d'excellents résultats avec un granulat saturé à 100% alors que d'autres chercheurs conseillent une saturation de 90% du granulat [3][27]. Selon ces chercheurs, un granulat saturé à 100% a plus de chance de causer des saignements et, par le fait même, une diminution des propriétés du béton. De Oliveira et Vazquez ont quant à eux observé qu'il n'y avait pas de variation significative entre les bétons utilisant des granulats recyclés à des teneurs en eau variables pour un béton de rapport E/C de 0,5 [28].

I. 2. 3 FORMULATION DES BETONS CONTENANT DES GRANULATS RECYCLES

Plusieurs méthodes de formulation et de préparation alternative du béton sont proposées dans la littérature pour améliorer la performance du béton contenant des granulats recyclés. Parmi les méthodes les plus citées sont la « méthode du mélange en deux étapes » [4][29][30][31] et la « méthode du mortier équivalent » [2][32]. L'effet de la pré-saturation du granulat a simplement pour but la compensation de l'eau absorbée, cette caractéristique sera aussi discutée dans cette section.

I. 2. 3. A Méthode de la pré-saturation et de la compensation d'eau

Pour cette étude, la méthode de compensation de l'eau a été comparée à la méthode de pré-saturation. Dans les deux cas, une quantité d'eau égale à la différence entre l'absorption et la teneur en eau des granulats recyclés a été ajoutée. La seule différence est dans le fait que l'eau a été mise en contact avec les granulats pendant 5 minutes dans le cas de la méthode de la pré-saturation. Les résultats de cette étude montrent que les bétons pour lesquels la méthode de la pré-saturation a été utilisée ont un comportement légèrement moins bon à l'état solide et à l'état frais que les bétons pour lesquels il y a eu seulement une compensation de l'eau absorbée [33]. L'auteur explique cette différence par un « effet de clouage ». Cet « effet de clouage » serait dû au fait que lorsqu'il n'y a pas de pré-saturation, des particules de ciments pénètrent dans les pores de granulats recyclés. Ces particules de ciments améliorent la qualité de l'interface granulat-pâte lors de leurs hydratations et, par le fait même, les propriétés mécaniques du béton. La figure I. 9 illustre la séquence de malaxage pour la méthode de pré-saturation.

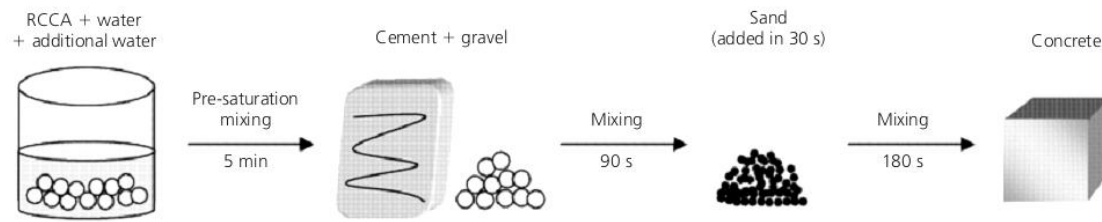


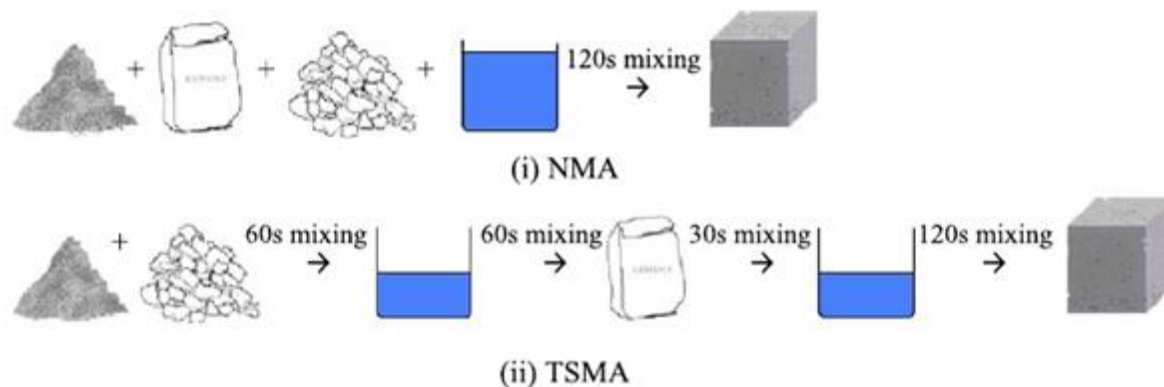
Figure 2. Mixing procedure

Figure I. 9 : Méthode de malaxage pour la méthode de pré saturation [33].

Comme les granulats recyclés ont une très grande absorption, il faut que ceux-ci soient humides lors de leur utilisation pour préparer du béton [3]. Si le granulat n'est pas humide, celui-ci peut absorber l'eau du mélange, affectant ainsi négativement la maniabilité du béton et le contrôle du rapport E/C effectif. Un bon niveau de saturation de 80% est proposé [3]. Cette teneur en eau permet de réduire l'absorption de l'eau du mélange par les granulats tout en réduisant le risque de saignement peut affecter négativement plusieurs propriétés du béton puisqu'il diminue la qualité de l'interface pâte-granulat.

I. 2. 3. B Méthode de mélange en deux étapes

La méthode du mélange en deux étapes consiste à incorporer l'eau dans le mélange en deux étapes, dans le but de permettre aux particules de liant de bien s'adhérer à la surface du granulat recyclé. La figure I. 10 illustre la différence entre la méthode en deux étapes par rapport à la méthode traditionnelle.

**Figure I. 10** : processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale [33]

L'amélioration des propriétés du béton provient du fait que cette technique permet de créer une couche de pâte de ciment de faible rapport E/C à la surface du granulat recyclé. Cela permet de remplir les pores et les fissures présents en surface du granulat lors du malaxage et, par le fait même, d'améliorer la qualité de l'interface pâte-granulat [30]. Comme il est

possible de le constater sur la Figure I. 11 et la Figure I. 12, deux images prises au microscope électronique à balayage, l'utilisation de la méthode de mélange double permet de remplir les fissures présentes dans le granulat recyclé alors que celles-ci ne sont pas remplies pour une méthode normale de mélange [34]. Comme exemple, la figure ci-dessous montre l'aspect d'un granulat recyclé observé au MEB.

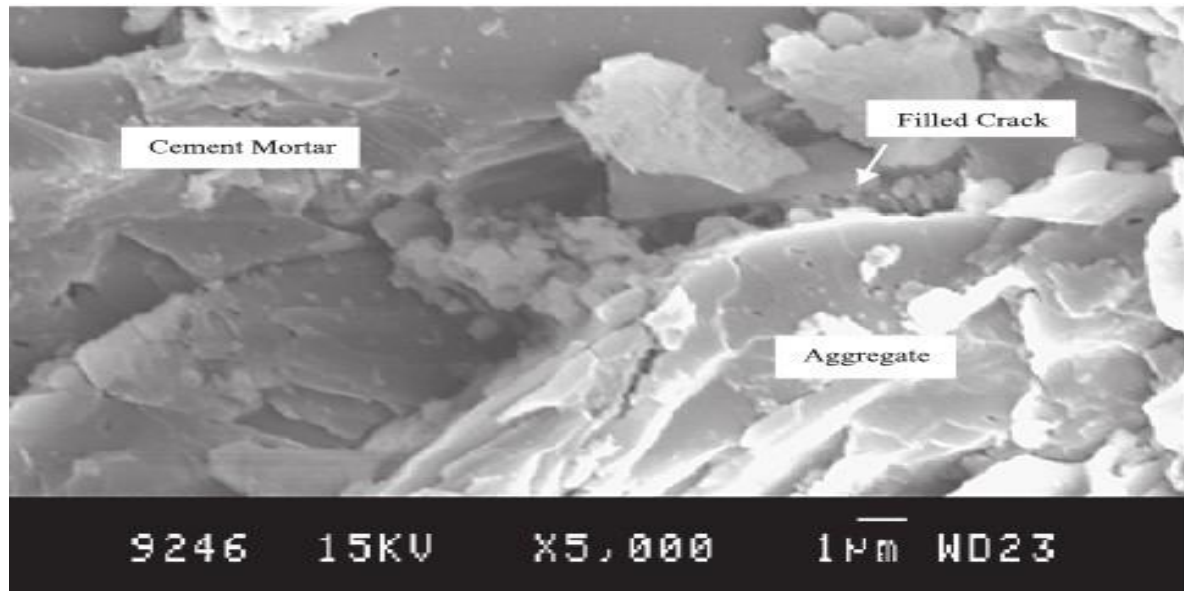


Figure I. 11 : Observation au MEB d'une fissure du granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange double [34].

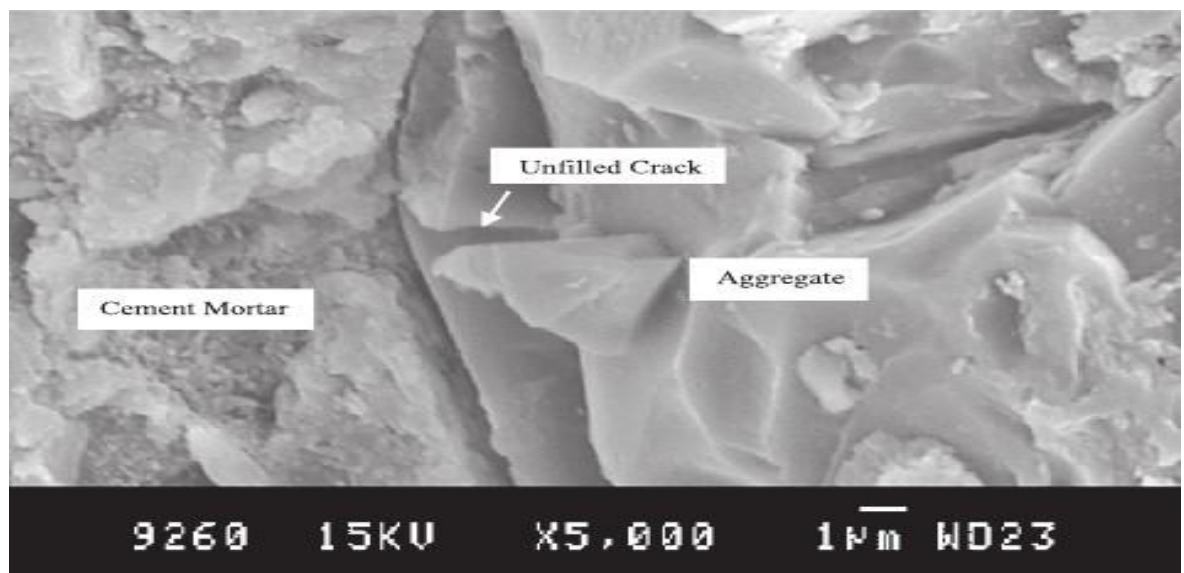


Figure I. 12 : Observation au MEB d'une fissure de granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange normale [34].

Comme mentionnée précédemment, la dureté de la nouvelle interface formée entre le granulat naturel et la pâte est contrôlée par le rapport E/C de la pâte. L'obtention d'une couche de pâte ayant un rapport E/C effectif plus bas permet de rendre la nouvelle interface

plus résistance et par le fait même améliorer les propriétés mécaniques du béton [34]. Cette technique fonctionne, par contre mieux, pour les bétons à haut rapport E/C puisque dans le cas des bétons à faible rapport E/C c'est la vieille interface entre le granulat original et le mortier résiduel qui contrôle [35]. La figure I. 13 présente le principe de fonctionnement de la méthode de mélange en deux étapes.

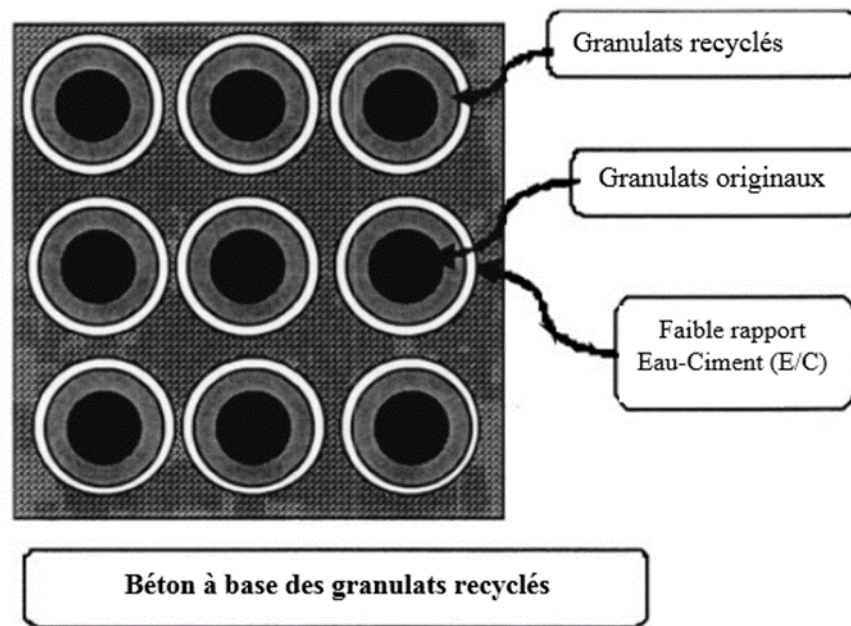


Figure I. 13 : Principe de fonctionnement de la méthode de mélange en deux étapes [35].

Il a été conclu que cette méthode améliore les propriétés mécaniques des bétons à granulats recyclés [34]. Il a été notamment possible d'observer un gain de résistance à la compression de 21% (à 28 jours pour un taux de remplacement de 20%) par rapport au béton préparé selon la méthode normale [34]. Il existe des taux de remplacement du granulat naturel où l'amélioration des propriétés mécaniques est plus grande en utilisant cette méthode. Ceux-ci se situent entre 25% et 40% ainsi qu'entre 50% et 70% bien que l'amélioration observée dans ce cas soit un peu moins grande que pour la zone de 25% à 40% [31].

La méthode du mélange en deux étapes permet de réduire l'augmentation des déformations du béton dû à l'utilisation de granulats recyclés (46% pour le fluage et 68% pour le retrait à 14 jours pour un taux de remplacement de 100% [30]. Il est aussi possible d'améliorer la performance du béton en ce qui a trait à la perméabilité à l'eau (35% d'amélioration à 126 jours pour un taux de remplacement de 100%) ainsi que la perméabilité aux ions chlore (30% d'amélioration à 126 jours pour un taux de remplacement de 100%) [30].

I. 2. 3. C Méthode du mortier équivalent

La méthode du mortier équivalent consiste à considérer le granulat recyclé comme matériau à deux phases distinctes lors de la formulation, le granulat original et le mortier résiduel. Cette méthode cherche à formuler un béton ayant la même teneur en mortier total (mortier résiduel et nouveau mortier) que le béton conventionnel [2]. Ce calcul nécessite, par contre, une mesure précise de la teneur en mortier résiduel du granulat recyclé. Cette méthode de formulation permet de diminuer la quantité de nouvelle ajoutée au béton et donc, par le fait même, la quantité de granulat fin de ciment nécessaire au mélange. Selon l'auteur [2], il est semblé que l'utilisation de cette méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats en ce qui a trait aux propriétés à l'état frais et au module d'élasticité tout en maintenant une résistance à la compression comparable aux béton recyclés formulés avec d'autres méthodes. Il est, par contre, à noter qu'en plus de changer la méthode de formulation, le taux de remplacement varie entre les essais. L'amélioration des propriétés du béton formulé avec la méthode du mortier équivalent pourrait donc être en partie due au changement du taux de remplacement. Cette méthode est donc intéressante puisqu'elle permet potentiellement de réaliser un béton plus économique, mais la variation de deux facteurs importants rend les résultats de cette étude plus complexe à évaluer.

I. 2. 4 ABSORPTION

La mesure de l'absorption d'un granulat recyclé est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci. Comme l'absorption du granulat est due en grande partie au mortier résiduel. Une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier résiduel [34] et par le fait de même, un impact plus important sur les propriétés du béton préparé avec ce granulat. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption de granulat recyclé est beaucoup plus grande que celle du granulat naturel, la quantité d'eau que celui-ci contient à l'état saturé est largement supérieure. Une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir même rapport E/L.

Une autre problématique peut se présenter lors de l'utilisation du granulat recyclé asséché. Comme une plus grande absorption se fait dans les 30 premières minutes pour un granulat recyclé [22], l'utilisation de ce granulat à l'état sec peut affecter négativement les propriétés rhéologiques du béton frais. Etant donné que les granulats secs adsorbent une partie, de l'eau présente dans le béton frais, il peut être nécessaire d'ajouter jusqu'à 10% de l'eau totale pour

obtenir le même affaissement. Ceci peut affecter négativement les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton [22].

La figure I. 14 présente l'absorption d'un granulat recyclé durant les 30 premières minutes.

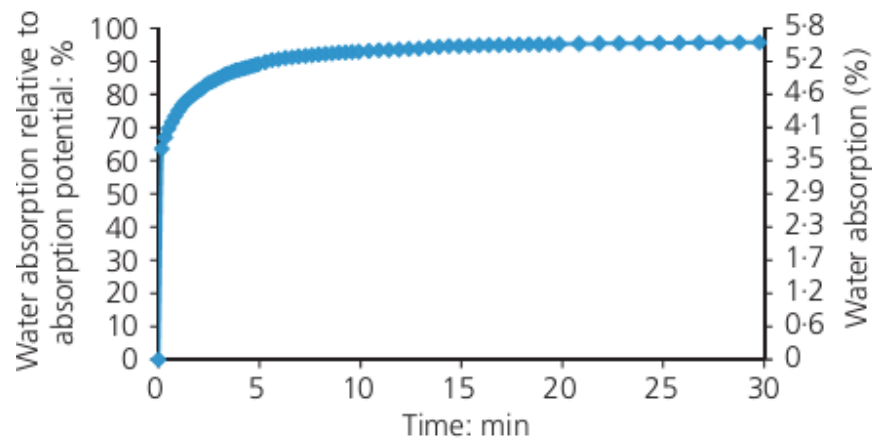


Figure I. 14 : Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [27].

Ce graphique démontre que la plus grande partie d'eau absorbée par le granulat se fait dans les 30 premières minutes comme l'a avancé Malesev [22]. On remarque aussi une absorption très élevée même après seulement 5 minutes (89,2 %). La vitesse de cette absorption diminue significativement par la suite. Il est donc estimé que 90 % du potentiel d'absorption du granulat s'effectue lors des 5 premières minutes [27].

I. 2. 5 METHODES DE MESURE DE L'ABSORPTION D'EAU

Pour mesurer l'absorption des granulats on utilise deux méthodes « absorption au pycnomètre » et « la pesée hydrostatique ».

I. 2. 5. A Essai au pycnomètre

La méthode RAWA [36] a été adoptée pour mesurer et prendre en compte la perte de l'eau due à l'évaporation ainsi l'influence des bulles d'air piégées entre les granulats. L'échantillon est placé dans un pycnomètre rempli d'eau jusqu'à la marque de jauge. Ce pycnomètre est maintenu dans une salle climatisée (20°C, 50%HR). La quantité de l'échantillon dans le pycnomètre est équivalente à deux couches afin de pouvoir éliminer les bulles d'air en agitant ce dernier. Le pycnomètre est placé sur une balance raccordée à un système d'acquisition automatisé pour l'obtention de mesure en continu. A chaque ajout d'eau, l'absorption des granulats et l'évaporation d'eau est prise en compte. (Figure I. 15)

Les mesures sont prises aux intervalles suivants : 5 min, 10 min, 30 min, 1 h, 2h, 4h, 8h et 24 h jusqu'à 7 jours ou plus.

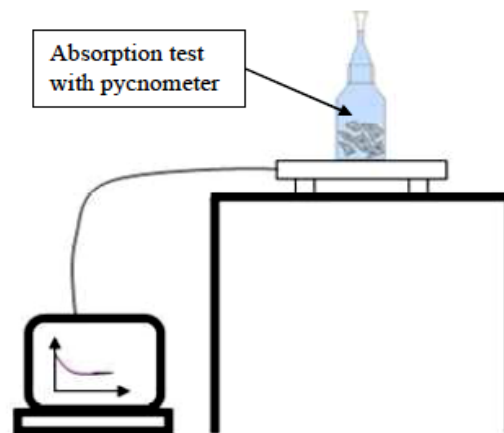


Figure I. 15 : Schématisation de l'essai au pycnomètre.

Cette méthode a posé plusieurs problèmes parmi eux :

- Lorsque l'échantillon est placé dans le pycnomètre et rempli d'eau les particules plus fines ont tendance à s'installer et de remplir tous les vides. Cela empêche l'air occlus entre les particules de remonter à la surface, conduisant à des résultats incorrects. Même si la plupart des particules fines sont éliminés par lavage, la nature poreuse et pulvérulente des granulats recyclés fins permet à de nombreuses particules de rester après le lavage (un peu argileux avec des caractéristiques de cohésion) et les autres à être produites par la désagrégation des particules plus grosses au cours du processus de séchage.

- Le processus de séchage génère de petits morceaux de particules qui empêchent le bon séchage de chaque particule individuelle, en raison des particules d'argile qui restent après le lavage et leur nature cohésive

- Il n'est pas possible de savoir comment les augmentations absorption au fil du temps puisque le test fournisse seulement l'absorption globale d'eau. La quantité d'eau absorbée au début du test, qui est important pour le dosage correct de l'eau de mélange de béton, restes inconnus

Le mode opératoire est défini par le diagramme suivant :

Échantillonnage conformément à la norme BS EN 932-1	Préparation d'essai
Essai selon la norme BS EN 932-1	
Trouver la masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulat saturé et de l'eau (M2)	Procédure d'essai
Trouver la masse du pycnomètre rempli d'eau seulement (M3)	
Trouver la masse du granulat saturé séché superficiellement (M1)	
Trouver la masse du granulat saturé étuvé à l'air (M4)	
Calcul de la densité apparente du granulat	Calcul et expression de résultat
Calcul de la densité des particules sur une base séchée à l'étuve	
Calcul de la densité des particules sur une base saturée, et séché superficiellement	
Calcul de l'absorption d'eau après l'immersion pendant 24 H	

I. 2. 5. B Pesée hydrostatique

La procédure de la pesée hydrostatique donnée par [37] a été corrigée de manière à prendre en compte l'absorption d'eau des granulats juste après immersion dans l'eau et avant le premier enregistrement.

L'échantillon est placé dans un panier suspendu à une balance relié à un ordinateur. Au temps $t=0$, ce panier est immergé dans un bain d'eau à 20°C. La quantité de granulats dans le panier est équivalente à deux couches afin d'éliminer les bulles d'air en agitant ce dernier. L'acquisition des données débute 5min après le premier contact de l'eau avec l'échantillon, l'essai est arrêté lorsqu'il n'y a plus de variation significative de la masse apparente, et l'absorption finale a_{tf} est calculée selon la norme EN 1097-6 [38] et notée A_b . (Figure I. 16)

Les problèmes posés par la méthode de la pesée hydrostatique sont :

- L'absorption d'eau par rapport à l'instant initial est inconnue, puisque l'échantillon a déjà absorbé de l'eau lors de la première lecture a été obtenue.
- Certains matériaux extrêmement fins laissés de laver l'échantillon, provenant de la nature poreuse et pulvérisent les granulats recyclés fins, empêchent l'air occlus de sortir de

l'échantillon en raison de la faible fluidité et génèrent des lectures incohérentes. Le matériau présent également l'agglomération des particules naissant, comme elle est évidente à la fin de l'essai. Ce phénomène est plus évident dans les échantillons de béton à base des granulats recyclés fins.

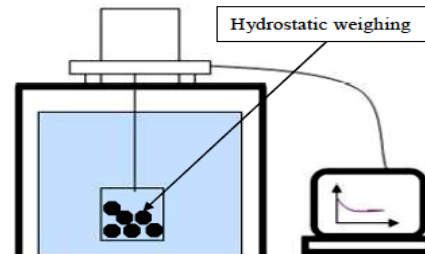


Figure I. 16 : Schématisation de l'essai pesée hydrostatique.

Le mode opératoire est défini par le diagramme suivant :

Échantillonnage conformément à la norme BS EN 932-1	Préparation d'essai
Rédaction conformément à la norme BS EN 932-1	
Trouver la masse apparente dans l'eau du panier contenant l'échantillon de granulat saturé (M2)	Procédure d'essai
Trouver la masse apparente dans l'eau du panier vide seulement (M3)	
Trouver la masse du granulat saturé séché superficiellement (M1)	
Trouver la masse du granulat saturé étuvé à l'air (M4)	
Calcul de la densité apparente du granulat	Calcul et expression de résultat
Calcul de la densité des particules sur une base séchée à l'étuve	
Calcul de la densité des particules sur une base saturée, et séché superficiellement	
Calcul de l'absorption d'eau après l'immersion pendant 24 H	

I. 2. 5. C Masse volumique réelle et absorption d'eau selon la norme NF EN 1097-6

Cette norme définit le mode opératoire pour déterminer la masse volumique réelle d'un granulat ainsi que son absorption d'eau.

Elle est basée sur la détermination du rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après l'imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. En prenant une masse initiale de l'échantillon du granulat séché de manière prolongée à 80 °C pour stabiliser la masse des granulats (Figure I. 17. A). On met les granulas dans un pycnomètre et on les immerger dans un bain d'eau à (22 ± 3) °C et les laisser ainsi pendant un temps connue à cette température. Après remplissage avec de l'eau, on remarque que les pores des granulats contiennent encore des vides (Figure I. 17. B). Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, la quasi-totalité des pores sont maintenant remplis d'eau (Figure I.17. C). On retire le pycnomètre et on l'agite pour éliminer les bulles d'air. A chaque pas de temps, on étale l'échantillon sur un chiffon sec et on sèche les granulats en surface puis transférer sur un autre chiffon et on les laisse sécher à l'air libre jusqu'à ce que les films d'eau visibles disparaissent (mais les granulats doivent encore avoir un aspect humide) (Figure I. 17. D).

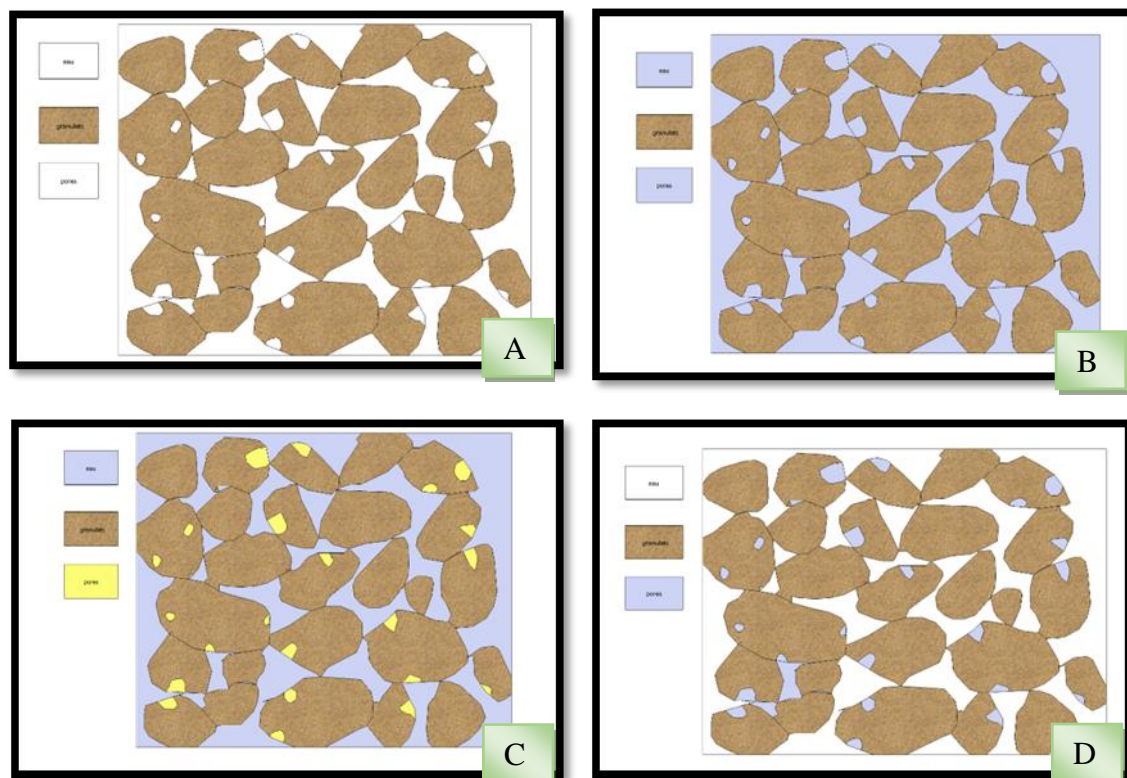


Figure I. 17 : La procédure de la méthode de chiffon

On calcule le coefficient d'absorption (A_b) par la relation suivante :

$$Ab\% = (Ma - Ms) / Ms \times 100$$

Avec :

Ma= la masse de l'échantillon imbibé par l'eau (humide)

Ms= la masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 80 °C

I. 2. 6. CONCLUSION

L'introduction de matériaux recyclés dans la composition du béton provoque une légère diminution de la densité accompagnée d'une augmentation de la porosité et de la perméabilité entraînant des conséquences néfastes sur la durabilité du béton.

La méthode utilisée pour quantifier l'absorption d'eau par les granulats est celle de la norme NF EN 1097-6 parce qu'elle est très facile à manipuler.

Les granulats recyclés de bétons ont comme caractéristique une forte capacité d'absorption d'eau. Cette propriété reste vraie quelle que soit la provenance du béton parent. Ce critère influe considérablement sur le comportement des bétons à l'état frais (rhéologie) et durci (résistance).

Chapitre 3 :

Influence des granulats sur les propriétés des bétons

I. 3. 1 INTRODUCTION

Compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), la consistance du béton à base de ces agrégats (selon le pourcentage de substitution), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui d'un béton témoin confectionné à base de granulats naturels. Nombreux chercheurs ont trouvé qu'une ouvrabilité comparable à celle du béton d'agrégats naturels avec un béton à base des granulats recyclés réduit considérablement l'ouvrabilité et influe sur le comportement à l'état durci.

I. 3. 2 PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS

Par rapport à des bétons de granulats naturels, les bétons de recyclés présentent des particularités de formulation :

- La masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels, du fait de leur teneur en mortier ;
- La granularité des granulats peut faire apparaître des teneurs en fines importantes, en particulier lorsque le sable recyclé est utilisé ;
- Les granulats recyclés étant obtenus par concassage, leur rugosité de surface est importante, et leur compacité relativement faible. Ceci est un autre facteur tendant à augmenter la demande en eau efficace ;
- Cette demande en eau efficace peut être traitée soit par un volume de pâte plus élevé (se traduisant par un supplément d'eau de 5 à 15 % d'après la littérature [39], soit par l'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiant utilisés en réducteur d'eau, soit enfin par une combinaison de ces deux stratégies ;
- La demande en eau totale du béton est encore accrue par l'absorption d'eau importante des granulats recyclés. Dans les cas où les granulats sur stock ne sont pas saturés en eau, une reprise d'eau des granulats dans le mélange intervient dans les heures qui suivent le malaxage. Pendant le durcissement, en cas d'auto-dessiccation, un mouvement inverse de l'eau (des granulats vers la matrice) peut intervenir ;
- Quelle que soit la stratégie de formulation, l'obtention d'une résistance finale passe par des rapports eau/liants égaux ou plus faibles qu'avec des granulats naturels, et implique des dosages en liants neufs plus importants, sans parler des liants anciens qui viennent encore augmenter la proportion de pâte de ciment durcie dans le mélange final ;

- Enfin, le béton peut contenir en quantité notable certaines espèces génératrices de gonflement, et notamment les sulfates, résidus de plâtre adhérent à certains granulats recyclés même si ces matériaux sont, en principe, écartés des stocks destinés à la réutilisation.

I. 3. 2. A. Masse volumique à l'état frais

Elle est généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité du mortier ancien jouant le rôle de granulat. Les valeurs reportées sont en général comprises entre 2000 et 2200 kg/m³ [40][41][42].

I. 3. 2. B. Teneur en air « naturelle » du béton frais

La forme et la rugosité des granulats peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. C'est ainsi qu'en moyenne, certains auteurs trouvent des teneurs en air occlus légèrement plus importantes dans les bétons de granulats recyclés, l'écart étant de l'ordre de 0,6% [40][42].

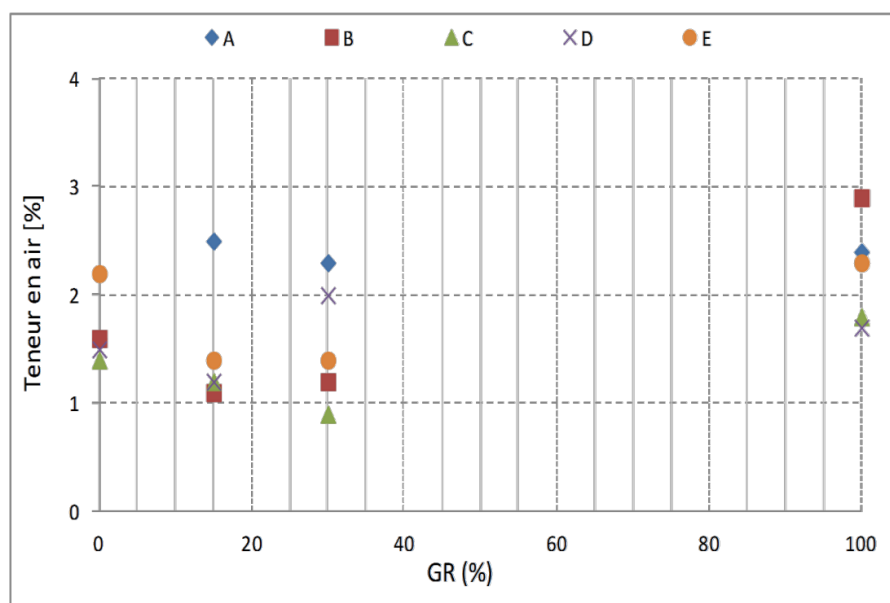


Figure I. 18 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur la teneur en air du béton [42]

A → CEM I 52.5 R CE CP 2

B → CEM I 52.5 R CE

C → CEM I 52.5 N CE CP 2

D → CEM I 52.5 N SR 3 CE PM CP2

E → CEM I 52.5 N CE ES CP2

I. 3. 2. C. Rhéologie du béton à l'état frais

Si l'on substitue des granulats naturels par des granulats recyclés, on constate une perte de maniabilité [42]. Cependant, la formulation est généralement mise au point avec un objectif

de consistance initiale (exprimée sous forme d'affaissement au cône). Tout l'éventail des valeurs d'affaissement est priori envisageable avec des matériaux recyclés, avec des dosages en eau plus forts que pour les bétons ordinaires. Par contre, les possibles phénomènes d'absorption d'eau différée par les granulats (dont l'essentiel se produit dans les 15 premières minutes de la vie du béton) et l'utilisation d'adjuvants, en présence d'impuretés diverses modifiant la chimie de l'hydratation précoce, augmentent le risque de perte rapide de maniabilité [43]. Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par immersion dans l'eau les granulats recyclés avant utilisation prêt-à-emploi [39][44]. Enfin, dans les cas où l'on utilise des superplastifiant, il faut s'attendre à des valeurs de viscosité plastique plus élevées que dans les bétons ordinaires, sauf si les mélanges contiennent beaucoup de fines. Cependant, les références manquent en la matière.

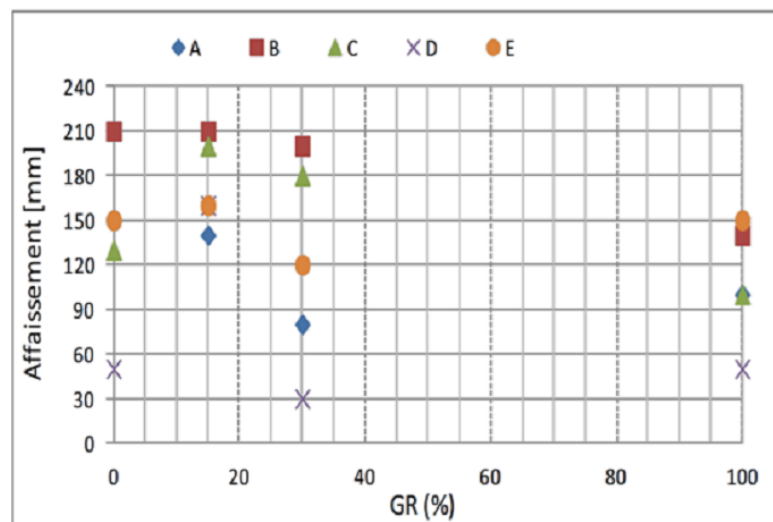


Figure I. 19 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur l'affaissement du béton [42].

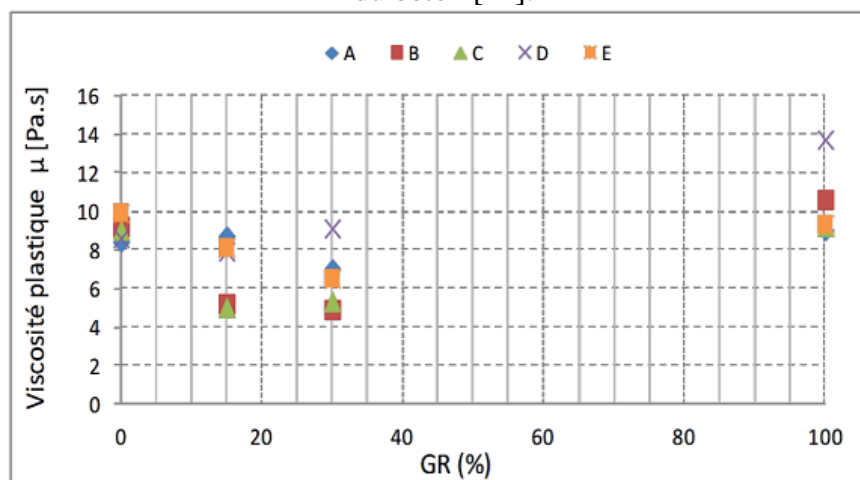


Figure I. 20 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur la viscosité plastique du béton [42].

A → CEM I 52.5 R CE CP 2

B → CEM I 52.5 R CE

C → CEM I 52.5 N CE CP 2

D → CEM I 52.5 N SR 3 CE PM CP2

E → CEM I 52.5 N CE ES CP2

I. 3. 2. D. Temps de prise

La réduction du rapport eau efficace/ciment, et la présence d'alcalins libérés par les granulats recyclés est un facteur de diminution du temps de prise [39][43][45], mais l'usage de superplastifiant agit dans le sens inverse.

I. 3. 2. E. Chaleur d'hydratation

L'augmentation des dosages en liants tend à faire croître l'exothermie des bétons recyclés. La réduction du rapport E/C joue dans le sens inverse, mais la présence d'une réserve d'eau dans les granulats va dans le sens d'une meilleure hydratation du ciment, et donc d'un dégagement thermique plus fort.

I. 3. 2. F. Durcissement

Les granulats recyclés, surtout s'ils sont de qualité médiocre, exercent un effet plafond sur la résistance finale plus notable que dans le cas des granulats naturels. De ce fait, à même résistance à 28 jours, la résistance à des âges antérieurs est un peu plus élevée [46], comme on le constate classiquement avec les bétons de granulats légers. Les résistances au très jeune âge sont cependant influencées par le temps de prise, qui peut varier dans un sens ou dans l'autre, comme noté plus haut.

I. 3. 2. G. Retrait plastique

Ce phénomène est lié aux conditions atmosphériques, au ressuage et à la cure dont le matériau fait l'objet dès sa mise en œuvre. La présence de fine en quantité importante et l'absorption différée d'eau par les granulats réduit le ressuage [39][47] et augmente donc le risque de retrait plastique en cas de cure insuffisante.

I. 3. 3. PROPRIETES DU BETON A L'ETAT DURCI

On s'intéresse dans cette partie tout particulièrement à l'étude du comportement et des caractéristiques mécaniques des bétons recyclés. Souvent, il s'agit de remplacer une partie ou la totalité des gravillons naturels par des gravillons recyclés [16][41][48][49][50][51][52][53]. Quelques travaux traitent, également, des bétons formulés avec du sable recyclé [54][55].

Très peu d'études concernent des bétons formulés avec l'ensemble des granulats (sable+gravier) recyclés [50]. Une synthèse bibliographique des corrélations entre les différentes caractéristiques mécaniques à été publiée par Li [56].

I. 3. 3. A. Résistance à la compression

Toutes les études montrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40 % plus faible que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels.

De façon générale les études menées ont montré que la résistance à la compression dépend :

- Des taux de substitution pour un rapport E/C constant. La diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% et le sable inférieur à 30% [16][49][53][55][57]. Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés [41] et une mauvaise interface granulats/liant [58].
- Des paramètres de formulation et plus particulièrement du rapport E/C [57][50][51][59]. Ces études ont aussi montré qu'une porosité des granulats inférieures à 17% affecte peu les résistances à la compression, quel que soit le rapport E/C [60].
- De la qualité du béton de démolition dont les granulats sont issus [49][61]. Le module d'élasticité est plus important si les granulats sont issus d'un béton de haute résistance à la compression [49].
- De la nature des ajouts d'origine minérale [50][51][62][63].
- Des conditions de cure [16]. Il apparaît de façon claire que le béton à granulats recyclés conservé à l'air après une cure humide partielle possède une résistance supérieure à celle d'un béton conservé en milieu humide.
- De la nature du ciment [64].
- Du malaxage [31] qui joue un rôle important au jeune âge. Le procédé ASTM (pré-malaxage des granulats et eau incorporée en plusieurs étapes) conduise à des résistances à la compression plus importantes.

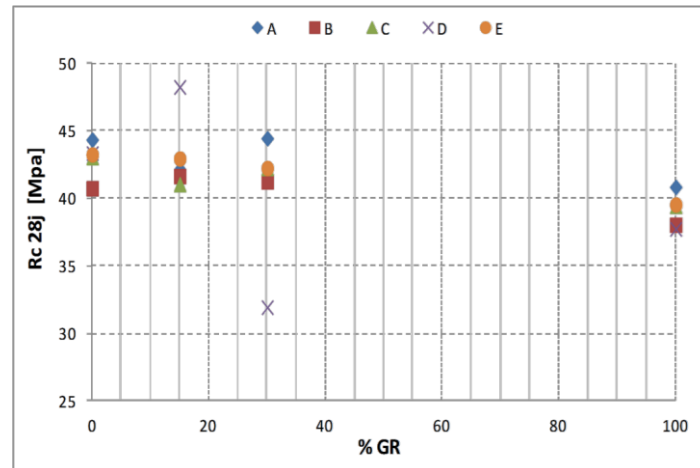


Figure I. 21 : Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur la résistance à la compression du béton [42].

A → CEM I 52.5 R CE CP 2

B → CEM I 52.5 R CE

C → CEM I 52.5 N CE CP 2

D → CEM I 52.5 N SR 3 CE PM CP2

E → CEM I 52.5 N CE ES CP2

I. 3. 3. B. Résistance à la traction et flexion et énergie de rupture

Les résultats issus des essais de traction uni-axiale, de fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés [16][55][65][66]. Les relations empiriques établies entre la résistance à la flexion et compression des bétons naturels selon les codes ACI, CEB ou chinois ne peuvent pas être appliquées aux bétons à granulats recyclés [61].

Les essais de flexion conduits par Casuccio & all montrent que l'énergie de rupture des bétons à granulats recyclés est inférieure à celle des bétons à granulats naturels (27–45%) [49]. Les mécanismes de rupture semblent dépendre de la nature du béton de démolition [3][49][56].

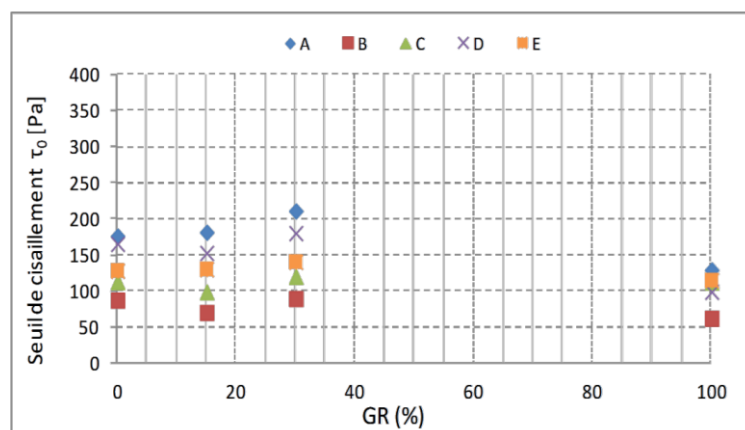


Figure I. 22: Influence de taux de graviers recyclés et des types de ciment sur le seuil de cisaillement du béton [42].

A → CEM I 52.5 R CE CP 2

B → CEM I 52.5 R CE

C → CEM I 52.5 N CE CP 2

D → CEM I 52.5 N SR 3 CE PM CP2

E → CEM I 52.5 N CE ES CP2

I. 3. 3. C. Résistance à la fatigue

Très peu de travaux traitent de la résistance à la fatigue des bétons recyclés. Il semble, d'après Kawamura et col [67], que la résistance à la fatigue en flexion des bétons fabriqués avec du sable naturel et des graviers recyclés est supérieure à celle d'un béton normal, du fait de la liaison forte qui existe entre la matrice cimentaire (où se produit la rupture) et les granulats recyclés [3][49].

I. 3. 3. D. Module élastique

Tous les auteurs ont signalé la faible rigidité des bétons à granulats recyclés [16][31][49][51][55][56][61].

I. 3. 3. E. Fluage et retrait de séchage

Du fait de la forte présence mortier résiduel à la surface des granulats et la forte porosité de ceux-ci, les déformations de fluage et de retrait de séchage sont nettement supérieures à celles des bétons à granulats naturels [52][63][68][69][70].

Le modèle établi dans le cadre du CEB-FIB semble le mieux adapté pour la description des déformations différées des bétons, avec des taux de substitution en granulats recyclés supérieurs à 20 %.

I. 3. 4. INFLUENCE DU RAPPORT E/C SUR LA RESISTANCE DU BETON

Le rapport E/C est un des facteurs de formulation les plus importants pour les bétons en général. Il existe une grande corrélation entre le rapport E/C et la résistance finale du béton. Il semble que l'impact négatif du remplacement du granulats naturel par un granulats recyclé augmente quand le rapport E/C diminue. La perte de résistance causée par l'utilisation d'un granulats recyclé est fonction de la résistance finale du béton et par le fait même de son rapport E/C. A cet effet, il est recommandé d'utiliser des granulats recyclés dans les bétons à résistance moyenne (20 à 40 MPa) puisque l'obtention de résistance plus élevée nécessite un rapport E/C plus grand et, donc, des coûts plus élevés [3]. Une étude de Sagoe-Crentsil montre que la résistance à 28 jours est la même pour le béton à granulats recyclés que pour le

béton témoin pour un rapport E/C élevé (0,7) [19]. D'autres études réalisées avec des rapports E/C inférieurs à 0,7 ont trouvé une baisse des résistances de 10% [28][71] et même plus [3][72] dans des bétons incorporant des granulats recyclés par rapport aux bétons témoins.

Il est aussi intéressant de noter que pour un rapport E/C total constant et lorsque le granulat recyclé n'est pas pré-saturé lors de la formulation, il est possible que la grande absorption des granulats recyclés diminue le rapport E/C effectif et, par conséquent, compense l'impact négatif des granulats recyclés sur la résistance à la compression [24]. Ceci peut cependant avoir un effet négatif sur l'affaissement.

I. 3. 5. INFLUENCE DU RAPPORT E/C ET ABSORPTION DES GRANULATS LEGERS

Comme pour les bétons à base de granulats naturels ayant une masse volumique ordinaire, plus le rapport E/C diminue, plus la résistance en compression du béton de granulat léger augmente. Le phénomène a été observé par plusieurs auteurs [73][74][75][76][77]. Selon Arnould et Virlogeux [78], une réduction de 15 litres de l'eau de gâchage conduit à une augmentation de 5 à 10% de la résistance en compression à 28 jours.

Mais le manque d'eau dans le malaxeur peut provoquer des difficultés d'hydratation complète du ciment et de compactage du béton. Ceci entraînent une chute de résistance en compression. Pour les bétons de granulats légers, l'eau absorbée par les granulats est également un facteur affectant fortement les propriétés mécaniques du béton. Si on utilise les granulats sans pré-saturation pour fabriquer le béton, la pénétration de l'eau de gâchage dans les pores des granulats légers entraîne une diminution du rapport E/C dans le béton frais. De plus, il n'est pas évident de déterminer la quantité d'eau absorbée par les granulats dans la pâte, qui peut être différente de la quantité d'eau déterminée par immersion suivant la norme EN 1097-6 [38]. Le rôle de filtre joué par les granulats légers diminue le rapport E/C au voisinage des granulats par rapport au reste de la matrice formant ainsi une zone plus dense que la matrice cimentaire [79][80]. Outre le processus physique d'absorption d'eau, un processus chimique apparaît à long terme au-delà de 28 jours. Wasserman et Bentur [80] ont observé deux types de phénomènes : la réaction pouzzolanique entre le granulat et la solution alcaline qui pénètre dans les pores du granulat (formation de C-S-H) et le phénomène « d'imprégnation » entraînant un dépôt de portlandite (CH) dans les pores de surfaces des

granulats. Plus les granulats ont une capacité d'absorption élevée et une porosité de surface importante, plus ce dernier phénomène est important.

Les auteurs d'Eurolightcon [81] ont mené une étude pour estimer la correction d'eau à apporter au béton frais en se basant sur l'absorption d'eau des granulats légers à base d'argile expansée, de pierre ponce et de cendres volantes frittées. Les granulats légers sont utilisés en remplacement des granulats de masse volumique ordinaire pour avoir une large gamme de bétons. Dans cette étude, aucune correction n'a été faite à l'eau de gâchage. Toutes les formulations ont une même quantité d'eau de gâchage 165 kg/m^3 mais n'ont pas le même rapport E/C efficace à cause des différents coefficients d'absorption des granulats. Les granulats sont séchés en étuve avant la fabrication des bétons pour bien évaluer le rapport E/C efficace à partir de l'absorption des granulats légers à 15, 30, 60 minutes et 7 jours. Les auteurs ont estimé que l'absorption d'eau après 60 minutes donne la meilleure approximation du rapport E/C et permet d'être proche du rapport E/C efficace.

Pour éviter la diminution éventuelle du rapport E/C due à l'absorption d'eau par les granulats légers, plusieurs auteurs ont proposé de fabriquer le béton avec des granulats pré-saturés. Dans ce cas, l'eau dans les granulats peut empêcher la pénétration de la pâte de ciment dans les grains. Zhang [82] a remarqué que la zone d'interface dépend de la porosité de surface des granulats légers. Ke [76] a trouvé que les granulats pré-saturés pendant 48 h absorbent beaucoup d'eau. Il confirme que cela dépend la porosité des granulats et leur absorption « résiduelle » après saturation. Selon d'autres auteurs [83][84][85], l'utilisation des granulats pré-saturés pourrait, cependant, provoquer une zone interfaciale plus poreuse en raison de l'eau accumulée mais peu-absorbée à l'interface granulat/pâte de ciment comme pour le béton ordinaire. La zone de transition est une zone plus faible que la matrice cimentaire car elle est plus poreuse. Le pourcentage de pores estimé est deux fois plus élevé que dans le reste de la pâte dans les bétons fabriqués avec des granulats pré-mouillés (de 30min ou 1h) [83][84]. Par contre, l'eau absorbée dans les granulats pendant la pré-saturation (ou pré-mouillage) conduit probablement à une hydratation supplémentaire et donc une amélioration de la résistance [79].

L'eau pré-absorbée par les granulats légers permet également de limiter le retrait du béton [86][87][88]. Selon ces auteurs, le retrait du béton de granulat léger au jeune âge est plus faible que celui du béton ordinaire ; et l'utilisation de granulats légers saturés limite le retrait du béton. Ceci est expliqué par la redistribution d'eau basée sur le mécanisme de retrait du

béton. En effet, l'espace, à l'origine occupé par des particules de ciment et d'eau, est progressivement envahi des produits d'hydratation. L'espace resté libre constitue les pores capillaires. Au début du durcissement, la plupart des pores capillaires sont entièrement saturés d'eau. Au cours de l'hydratation, l'eau capillaire est consommée et laisse place à de nouveaux pores capillaires. Cependant, contrairement à ce qui se passe dans le béton de granulats de masse volumique ordinaire, le retrait du béton de granulats légers est réduit parce que l'eau perdue par l'auto-dessiccation de la pâte de ciment est immédiatement remplacée par l'eau des granulats légers qui migre vers les zones à plus faible teneur en eau. Par conséquent, la pâte de ciment se rétracte moins.

I. 3. 6. DURABILITE DU BETON RECYCLE

De nombreuses études ont été réalisées pour étudier la durabilité du béton contenant des granulats recyclés. En préliminaire, il faut signaler qu'il existe plusieurs façons de générer une formule de béton recyclé par rapport à une formule témoin, selon le choix du paramètre gardé constant ; ce choix influe bien entendu sur le résultat de la comparaison.

I. 3. 6. A. Absorption d'eau des bétons

Les absorptions par immersion ou par capillarité sont nettement augmentées dans le cas des bétons de granulats recyclés. Ceci s'applique en particulier à l'absorption par capillarité, du fait d'une plus grande quantité de pores capillaires [89][90][91].

I. 3. 6. B. Perméabilité

Selon [92], lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celle des bétons conventionnels.

I. 3. 6. C. Carbonatation

La carbonatation est particulièrement affectée par l'incorporation de granulats recyclés [90]. La cinétique de carbonatation est plus rapide pour les bétons incorporant du sable issu de béton concassé [89]. Les travaux de Katz [48] confirment aussi l'évolution de la carbonatation.

Rasheeduzzafar et col [92] ont montré que le potentiel de corrosion dans les bétons fabriqués avec des granulats recyclés est légèrement supérieur à celui d'un béton conventionnel.



Figure I. 23: Influence du carbonation sur le béton de graviers recyclés [92].

I. 3. 6. D. Migration des chlorures

Les études réalisées donnent des résultats contradictoires. Quelques auteurs [90][93] montrent que le remplacement des gravillons naturels par les gravillons recyclés favorise la pénétration des chlorures. L'imprégnation de ces granulats par une solution de polyvinyle alcool réduit cette diminution de résistance à la migration [90].

Abbas et col. [94] trouvent quant à eux des coefficients de diffusion du même ordre de grandeur que ceux des bétons traditionnels.

Dans une étude relative aux bétons auto-plaçants composés de sable et de gravillons issus de béton concassé, l'accroissement de la quantité de sable recyclé améliore la résistance à la migration des chlorures. En revanche, d'autres auteurs [89] ont observé un résultat inverse. Selon Otsuki et col [35], le mode de malaxage (en deux étapes) peut améliorer le comportement du béton, ce que confirment de façon encore plus nette Kong et col. [Kong & al, 2010] en pratiquant un malaxage en trois étapes.

I. 3. 6. E. Résistance aux sulfates

Concernant la résistance aux sulfates, l'équipe de Nishibayashi [95] a montré que la résistance aux attaques sulfatiques d'un béton à base de granulats recyclés est similaire (ou légèrement inférieure) à celle d'un béton composé de granulats traditionnels.

I. 3. 6. F. Résistance aux cycles de gel-dégel

La majorité des études rapportent que la résistance au gel-dégel d'un béton recyclé est inférieure à celle des bétons conventionnels [96][97][98] et qu'elle dépend notamment du degré de saturation en eau du matériau [99].

D'autres chercheurs [100] montrent qu'en utilisant un agent entraîneur d'air, les bétons à base de granulats recyclés peuvent s'avérer aussi durables aux cycles de gel dans l'air, dégel dans l'eau, que les bétons composés de granulats naturels.

I. 3. 7. CONCLUSION

Formuler un béton à partir des granulats naturels ou recyclés nécessite une bonne connaissance de leur propriété pour respecter les critères de résistance mécanique minimale et les valeurs limites de composition telle que le rapport Eau/Ciment maximal. L'eau est essentielle pour l'hydratation du ciment, si on ajoute beaucoup d'eau, la porosité augmente donc ses performances mécaniques et ses durabilités sont diminuent ; par contre, si on ajoute moins d'eau, on va affecter l'ouvrabilité du béton.

Donc il faut savoir de quantifier la quantité d'eau pour adopter une bonne formulation de béton à base de ces granulats recyclés pour améliorer les performances des bétons à base de granulats recyclés en diminuant le rapport E/C à une valeur optimale.

Chapitre 4 :

Les méthodes de traitement des granulats recyclés

I. 4. 1 INTRODUCTION

Avec le développement rapide de l'industrie de la construction, beaucoup de déchets de construction et de démolition sont générés chaque année dans le monde [103]. Jusqu'à présent, seule une petite fraction de ces déchets de béton est réutilisée sous forme de granulats recyclés pour la fabrication de béton. Afin de faire bon usage des granulats recyclés (GR) dans le béton, il est très important d'étudier les possibilités d'amélioration de leurs propriétés.

Les granulats recyclés (GR) sont composés d'un mélange intime de granulats naturels et de pâte de ciment durcie. Cette dernière est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels et il n'existe aucune méthode pratique pour séparer les mortiers à partir des particules GR avec les granulats naturels dans une usine de recyclage.

La teneur en pâte de ciment durcie et ses propriétés ont donc une influence déterminante sur les propriétés des granulats recyclés [104]. Les propriétés des (GR) dépendent de beaucoup de facteurs d'influence tels que le béton d'origine, les contaminants, la méthode de broyage pour la production, le vieillissement (notamment la carbonatation) et les conditions de stockage. La porosité des (GR) constitue un frein majeur à leur réutilisation dans la mesure où l'absorption de l'eau au moment du malaxage diminue l'ouvrabilité des bétons [105].

La présence de mortier de ciment résiduel est la cause d'une densité plus faible, une absorption d'eau plus élevée, une perte de résistance à l'abrasion (Los Angeles) et de solidité de GR par rapport aux granulats naturels [2-5].

Pour cela les chercheurs pensent à trouver une solution pour diminuer cette absorption d'eau et la porosité, en trouvant des moyens pour améliorer les propriétés des granulats recyclés. Dans ce chapitre seront présentés des exemples sur les différents traitements qui existent (inspirés de la littérature) pour diminuer cette absorption excessive, afin de les rendre aussi efficace que les granulats naturels.

I. 4. 2 TRAITEMENT DES GRANULATS RECYCLES PAR CARBONATATION ACCELEREE

Des chercheurs ont utilisé un traitement par carbonatation qui influence sur les propriétés du mortier entourant le granulat naturel et diminue la forte porosité des granulats recyclés, donc diminue le taux d'absorption d'eau [106] et [107].

Les chercheurs ont démontré qu'en utilisant la méthode de la carbonatation accélérée au laboratoire, la fraction soluble dans l'acide salicylique diminue et que la densité et la surface

spécifique des GR augmentent. La porosité des GR, quant à elle, diminue, ce qui conduit à une réduction de l'absorption d'eau des GR.

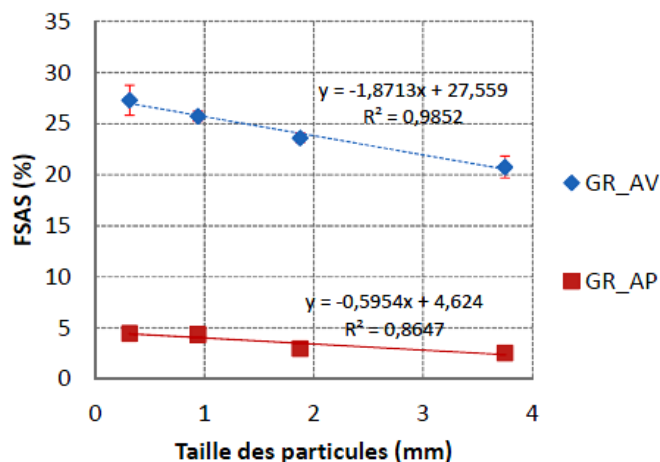


Figure I. 24 : Variation de la FSAS en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP [108].

Avec **FSAS** : la fraction dissoute dans l'acide salicylique.

Ils ont aussi trouvé une relation quasi-linéaire entre la FSAS et la taille des particules. La carbonatation de la pâte de ciment réduit la fraction soluble par transformation de la portlandite en calcite, qui ne se dissout pas dans l'acide salicylique.

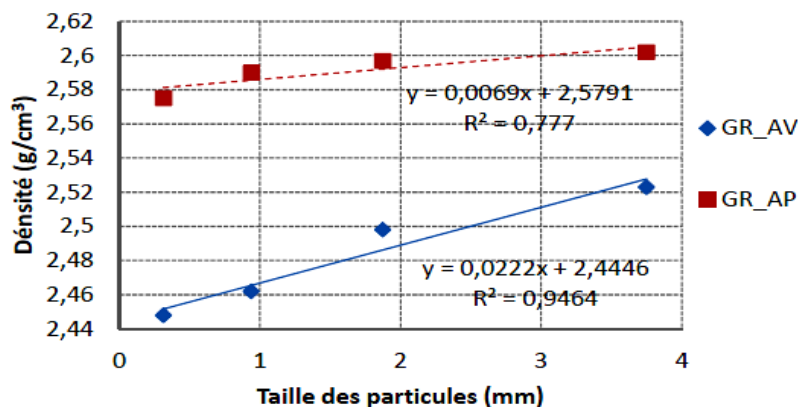


Figure I. 25 : Variation de la densité en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP [108].

La densité augmente quand la taille des particules augmente, cela est dû à nouveau à la transformation de la portlandite en calcite, qui a une densité plus grande que la portlandite.

Après la carbonatation, la pente de la droite de la densité en fonction de la taille des particules est inférieure à celle des GR_AV. Cela peut être expliqué par le fait que la fraction plus fine des GR a une teneur en pâte de ciment plus élevée que la fraction grossière et que la densité de celle-ci a augmenté suite à la carbonatation.

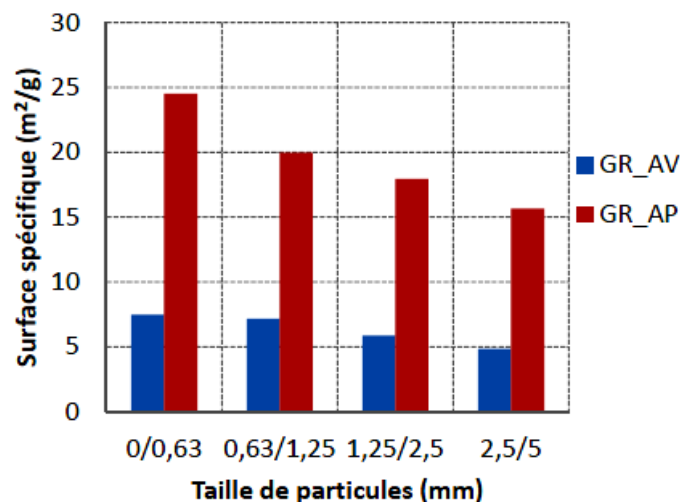


Figure I. 26 : Variation de la surface spécifique en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP [108].

La surface spécifique de BET augmente quand la taille de particules diminue pour les GR_AV et GR_AP. La carbonatation a pour effet une augmentation importante de la surface spécifique.

Tableau I.2 : Absorption d'eau des GR avant et après carbonatation [108].

Fraction (mm)	GR_AV (%)	GR-AP (%)	Diminution après carbonatation (%)
0/0.63	9.82	6.35	35.3
0.63/1.25	9.37	6.27	33.1
1.25/2.5	7.79	5.57	28.5
2.5/5	7.12	5.25	26.3

L'absorption d'eau a été obtenue selon la méthode proposée par Zhao et al. [108]. Zhao et al. ont trouvé que l'absorption d'eau obtenue pour les GR_AP est nettement inférieure à celle obtenue pour les GR_AV : l'absorption d'eau diminue de 26,3%, 28,5%, 33,1%, 35,3% pour les fractions 2,5/5 mm, 1,25/2,5mm, 0,63/1,25mm, 0/0,63mm, respectivement. Cela pourrait être attribué à la réduction de la porosité par la carbonatation.

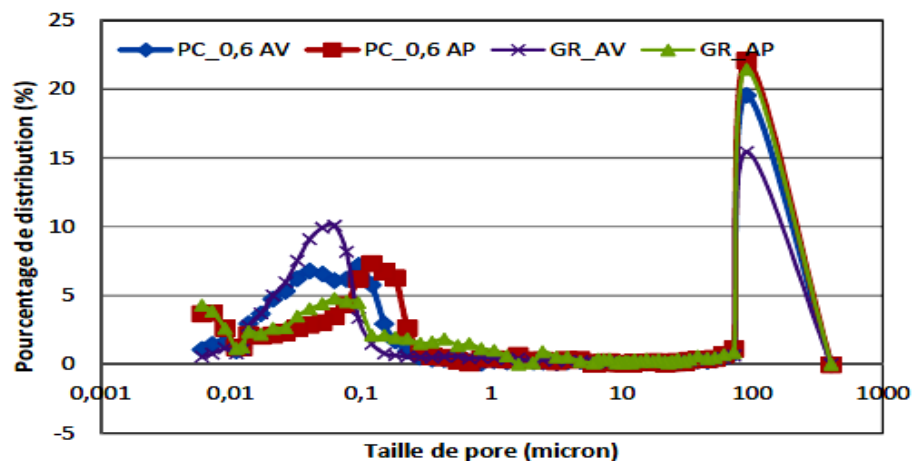


Figure I. 27 : Distribution de la taille des pores de la pâte de ciment (fraction 1,25/2,5mm) et le GR (fraction 2,5/5mm), avant et après carbonatation [108].

Pour les GR, ils ont observé, après carbonatation une augmentation des pores compris entre 0,001 au 0,01 microns et entre 0,1 au 1 microns et une diminution pour ceux compris entre 0,01 au 0,1 microns. La même tendance est observée pour la pâte de ciment : les pores entre 0,01 au 0,1 microns peuvent être remplis par les produits carbonatés. La porosité de la fraction 2,5/5 mm de GR diminue après la carbonatation, ce qui est également indiqué par Arandigoyen [109].

I. 4. 3 TRAITEMENT DE SURFACE DES GRANULATS DE BETON RECYCLE PAR PRECIPITATION DE CARBONATE MICROBIEN

Des essais ont été effectués pour étudier les effets du pH et de la température sur la MCP (Microbian Carbonate Precipitation). Les cellules des bactéries concentrées obtenues à partir de la centrifugeuse ont été diluées à 10^6 cellules /ml avec un milieu de croissance liquide qui est constitué d'un bouillon nutritif (3 g/l), urée (20 g/l), NH_4Cl (10 g/l), Na_2CO_3 (2,12 g/l) et du CaCl_2 (5,6 g/l). Ils ont remarqué une augmentation significative de la quantité de MCP sur GR et à la réduction de l'absorption d'eau par rapport au GR témoin [123].

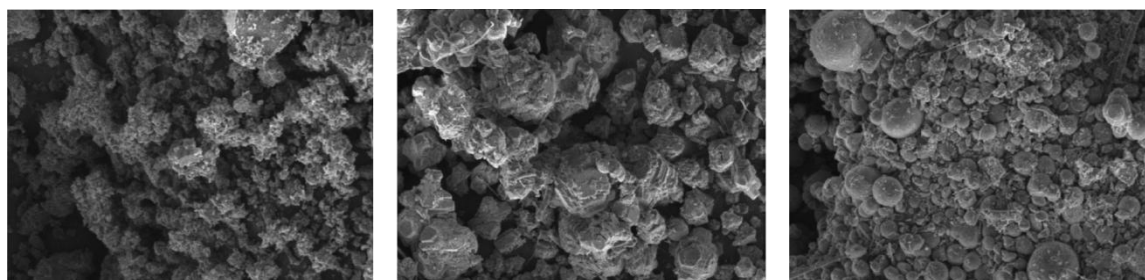


Figure I. 28 : Traitement par précipitation microbienne (MEB) [123].

L'hydroxyde de sodium (1 N en solution) et d'acide chlorhydrique (1 N) ont été utilisés pour ajuster le PH de la solution entre 7,0 et 10,5. Les milieux de culture contenant les bactéries ont été stockés à 25° C ou 35 °C pendant 72 h pour la précipitation du carbonate de calcium. Après trois jours de MCP, le milieu a été filtré à travers un papier filtre séché au four à 105 °C pendant une heure pour éliminer toute humidité. Après filtration, le papier filtre contenant du calcium précipité de carbonate et a été séché à nouveau au four à 105 °C pendant une heure [124].

Jishen Qiu et Qin Sheng ont étudié le traitement de surface des granulats de béton recyclé (GR) par précipitation du carbonate microbienne (MCP) et ils ont conclu qu'une bactérie capable d'hydrolyser l'urée, est en mesure de précipiter des cristaux de CaCO_3 du GR et de réduire l'absorption d'eau. Une quantité de pics de MCP de 0,111, correspondant à pH = 9,5 (Figure I. 32) représente une quantité élevée en concentration de calcium. Par analogie, le taux, la quantité et le type de MCP sur GR peuvent être modifiés (augmentés) par un contrôle

adéquat de la culture et des conditions de précipitation [124].

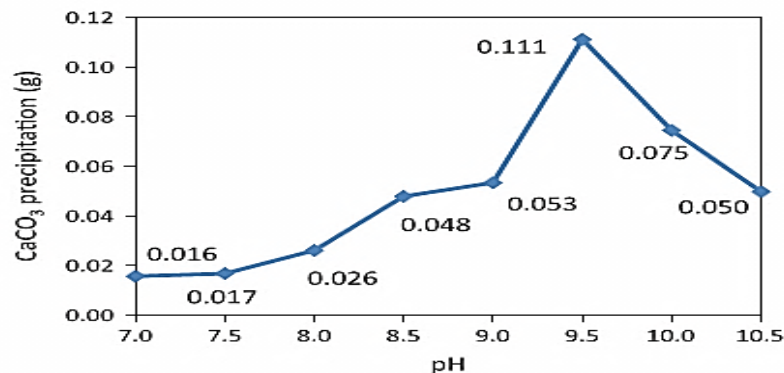


Figure I. 29 : MCP en fonction du pH des milieux de croissance [124].

Le groupe O₃ montre une augmentation significative de la quantité de MCP sur GR une réduction de leur capacité d'absorption d'eau par rapport au groupe témoin, O₂. Cependant un polymorphe métastable de CaCO₃, constitue le principal minéral présent dans l'état O₃ [124].

I. 4. 4 TRAITEMENT SE BASANT SUR UNE METHODE MECANIQUE

Dans cette technique, des forces mécaniques sont utilisées pour broyer et enlever le mortier. Deux techniques ont été proposées au Japon : le rotor à arbre excentrique [114] et le meulage mécanique [115]. Dans la méthode des rotors à arbre excentrique, des morceaux de béton écrasés sont passés vers le bas entre un cylindre externe et un cylindre intérieur qui tourne excentriquement à une vitesse élevée pour séparer l'agrégat grossier du mortier par broyage. Dans la méthode du meulage mécanique, un tambour est divisé en petites sections avec des cloisons. Le mortier des granulats recyclés est enlevé par frottement contre des billes d'acier placées dans chacune des sections partielles tournantes du tambour.

I. 4. 5 AMELIORATION PAR TREMPAGE DANS L'ACIDE

Le principe de ce traitement est d'enlever la partie du mortier attaché du GR en pré-trempant les granulats recyclés dans les acides (l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H₂SO₄) et de l'acide phosphorique (H₃PO₄) avec une concentration de 0,1 mole. Les taux d'absorption d'eau après les prétraitements ont été considérablement réduits avec des améliorations entre 7,27% et 12,17%. Cela montre que les prétraitements peuvent éliminer efficacement une grande partie du vieux mortier de ciment des GR, ce qui contribue à améliorer le maillon faible du GR et le nouveau mortier de ciment [30]. La figure ci-après présente les différentes étapes de ce procédé.

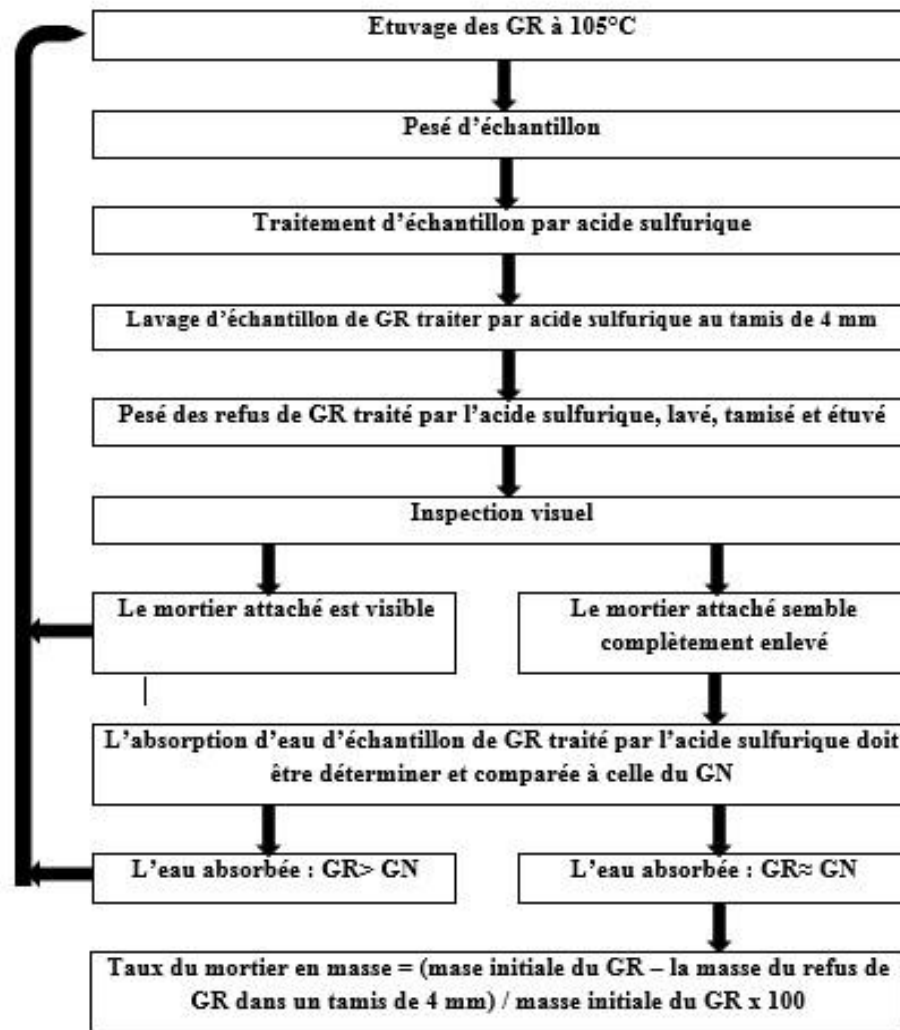


Figure I. 30 : Déroulement d'essai de traitement par trempage en acide [30].

I. 4. 6 TRAITEMENT PAR CHANGEMENT D'ETAT DE SURFACE

Les granulats recyclés sont exposés pendant une longue durée aux fines de pouzzolanes ou à la fumée de silice, cette action cause la pénétration de ces derniers dans les pores du mortier attaché aux granulats recyclés.

I. 4. 7 AMELIORATION CHIMIO-MECANIQUE

Abbas & al. ont choisi d'utiliser la dégradation chimique combinée par exposition des granulats recyclés à une solution de sulfate de sodium et à des contraintes créées en les soumettant à une action de gel et de décongélation Pour séparer le mortier des granulats naturel [118]. Toutefois, les principaux objectifs de cette étude étaient de quantifier les mortiers présents pour leur utilisation dans la classification des granulats recyclés. La technique n'est pas adaptée pour la production de granulats recyclés à grande échelle.

I. 4. 8 TRAITEMENT THERMIQUE

Dans ce procédé, les particules de granulats recyclés sont chauffées à environ 500 ° C pendant une durée d'environ deux heures. Les contraintes thermiques générées par dilatation thermique sont utilisées pour la fracture et ainsi retirer le mortier présent [111]. En outre, selon Shimpa & coll, lorsque le béton est chauffé à des températures 300 ° C, le mortier est réduit en fragments en raison de la déshydratation ; abaissant sa résistance aux contraintes thermiques développées [112]. Ils pensent que le fait de saturer le mortier avant le chauffage peut rendre la méthode plus efficace car elle peut conduire à une pression interstitielle, ce qui peut entraîner un enlèvement plus rapide du mortier. Il a également été signalé que l'immersion des agrégats dans l'eau froide, immédiatement après le chauffage, peut entraîner un retrait plus élevé du mortier par augmentation des contraintes thermiques différentielles développées [113].

I. 4. 9 TRAITEMENT THERMIQUE-MECANIQUE

Dans ce procédé, une combinaison des contraintes thermiques générées par chauffage conventionnel à des températures de 300 ° C à 500 ° C, les contraintes mécaniques générées par frottement sont utilisées pour éliminer le mortier des particules des granulats recyclés. En 1999, Shima Et coll. ont proposé une technique de traitement des granulats recyclés thermomécanique connu sous le nom de « chauffage et frottement » [116]. Dans cette technique, les débris du béton sont d'abord chauffés à 300 °C dans un four vertical pour rendre la pâte de ciment fragile (fragilité due à la déshydratation). Pour enlever le mortier, les débris de béton chauffés sont introduits dans l'équipement de frottement. Le béton chauffé y est frotté contre des billes d'acier, et la partie de mortier qui est délogée est évacuée par le Système de dépistage fourni [116]. L'initiateur de cette méthode a revendiqué qu'il peut améliorer la qualité des granulats recyclés pour qu'ils soient conformes à la JCI (Japan Concrete Institute) pour le béton recyclé de haute qualité [117].

I. 4. 10 L'ENRICHISSEMENT ASSISTE PAR MICRO-ONDES DES GRANULATS DE BETON RECYCLE

Les fours à micro-ondes disponibles dans le commerce fonctionnent au niveau de puissance intermédiaire et ont une durée de chauffage limitée. D'autre part, dans le chauffage par micro-ondes, le degré de chauffage et l'élévation de température sont directement proportionnels au volume du matériau chauffé. Par conséquent, en raison de la puissance limitée et de la durée de chauffage, une très petite quantité de GR peut être chauffée dans chaque lot en utilisant des fours à micro-ondes disponibles dans le commerce. Pour faire face

à ces problèmes, un système de prévention GR assisté par micro-ondes a été conçu et installé dans le laboratoire du département de génie civil de l'université nationale de Singapour. Comme on peut le voir sur la Figure I.34, l'équipement GR assisté par micro-ondes comprend une unité génératrice de micro-ondes de 10 kW et une chambre de chauffage GR avec ventilation pour éliminer la poussière et la vapeur d'eau générées lors du chauffage par micro-ondes. En outre, ce système comprend une série de composants de guide d'ondes (à l'intérieur de la chambre), y compris un auto-tuner pour minimiser la réflexion de la puissance des micro-ondes, un coupleur de direction pour mesurer l'alimentation et un isolateur pour protéger le générateur contre une éventuelle puissance [125].



Figure I. 31 : Le système de battage par micro-ondes ; (a) unité génératrice de micro-ondes
(b) chambre de bénéfice GBR [125].

Pour enquêter sur l'efficacité de la méthode d'enrichissement des GR par micro-ondes, le système décrit a été utilisé pour chauffer des échantillons GR de 2 kg (poids séché au four) à la puissance maximale (10 kW) pendant 1 min. Après chauffage, les échantillons ont été immédiatement refroidis par immersion dans 25 °C d'eau. Pour examiner les effets de la teneur en eau des GR, des échantillons de GR avec deux conditions d'humidité initiales différentes ont été prises en considération ; (1) séché à l'air (AD): 2 kg d'échantillons GR séchés au four ont été immergés dans l'eau pendant 24 h et ont ensuite été maintenus à température ambiante pendant 21 jours; (2) saturés (SA): des échantillons GR séchés à l'air ont été immergés dans l'eau pendant 24 h.

La méthodologie des autres techniques de bénéfices GR utilisée dans l'étude est décrite dans les sections suivantes :

a) La prestation de chauffage conventionnel (bénéfice thermique) : Des échantillons de GR saturés (2 kg de poids sec au four) ont été chauffés dans un four classique pendant 2 h.

Deux températures de chauffage différentes de 300 °C et 500 °C ont été utilisées. Après le chauffage, les échantillons de GR ont été immédiatement refroidis par immersion dans un réservoir d'eau rempli d'eau de 25 ° C.

b) Prestation de frottement mécanique : L'équipement d'essai d'abrasion Los Angles avec une charge de 10 boules en acier a été utilisée pour frotter les échantillons GR (10 kg de poids sec au four), les uns contre les autres durant 100 tours du tambour rotatif.

c) Avantage thermique-mécanique : Les échantillons de GR ont été chauffés à 500 ° C comme dans la technique de fièvre thermique. Dix kilogrammes (poids séché au four) des lots de GR chauffé ont ensuite été frotté à l'aide de l'équipement d'essai d'abrasion Los Angles comme dans la technique de fièvre mécanique.

d) Chauffage par micro-ondes et frottement mécanique : Pour étudier l'efficacité de la combinaison des traitements de chauffage par micro-ondes et de frottement mécanique, des lots de 10 kg de GR saturés ont été chauffés par micro-ondes comme décrit dans la section 4.2.1 et ont ensuite été frotté à l'aide de l'équipement d'essai à l'abrasion Los Angles comme dans la technique de frottement mécanique.

e) Atténuation de l'acidité : Deux kilos d'échantillons séchés au four ont été placés dans un récipient en plastique qui a ensuite été rempli avec la solution acide, dilué à la concentration souhaitée. Les échantillons ont été trempés pendant la durée spécifiée et ont ensuite été lavés sur un tamis de 4 mm pour éliminer le mortier détaché et l'acide. Trois concentrations d'acide sulfurique de 0,1, 0,5 ou 1 M à deux durées de trempage de 1 jour ou 5 jours ont été considérées.

La surface magnifiée d'une particule individuelle GR avant et après le chauffage par micro-ondes est représentée sur la figure I.35. L'inspection visuelle a montré qu'une partie considérable de la couche de mortier adhérent a été retirée des particules de GR après chauffage par micro-ondes. L'élimination du mortier adhérent a été accompagnée de bruits modérément élevés et a commencé après la durée minimale de chauffage de 10 s pour les échantillons saturés et de 30s pour les échantillons séchés à l'air. La quantité de vapeur générée n'était pas considérable et a été recueillie avec la poussière générée à l'aide du système de vide attaché connecté à la chambre de chauffage par micro-ondes. En outre, ils ont observé que la plupart du mortier adhérent délainé et des morceaux de mortier ont été brisés lorsque le chauffage par micro-ondes a été poursuivi pour une durée de 1 min. L'inspection a

montré que le mortier adhérent restant et les petits mortiers de mortier non brisés étaient sévèrement affaiblis de sorte qu'ils pouvaient être facilement cassés à la main.

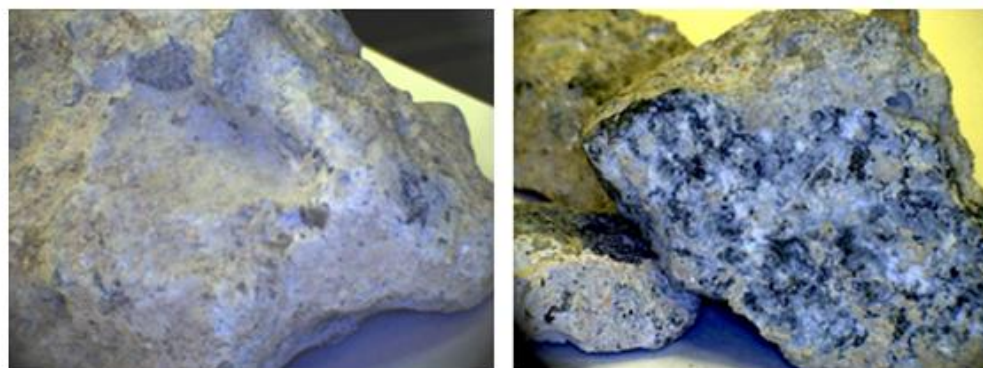


Figure I. 32 : Surface d'une particule GR avant (a) et après (b) le chauffage par micro-ondes [125].

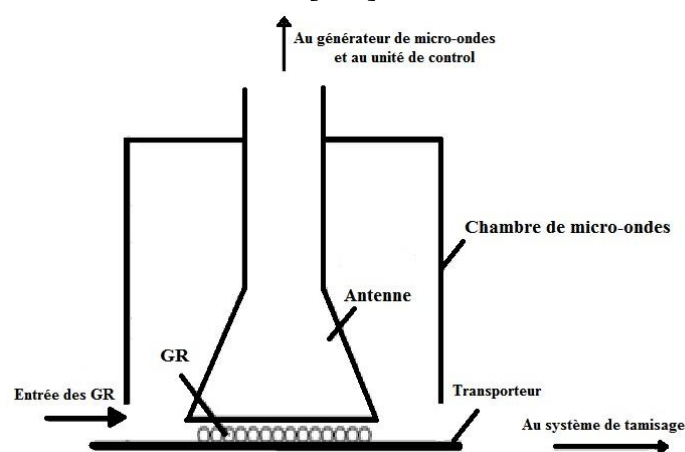


Figure I. 33 : Le système de la bénéficiassions de GR pour la simulation numérique [125].

Les résultats des études expérimentales sont énumérés dans le tableau I.3. Les résultats présentés sont des valeurs moyennes obtenues en testant au moins six échantillons. Le chauffage par micro-ondes seul a entraîné une réduction de près de 48% (47-24%) de la teneur en mortier lorsque les échantillons de GR étaient pré-saturés. Une telle réduction de la teneur en mortier a entraîné une diminution de 33% (4,2 à 2,8%) de l'absorption d'eau ainsi que de 3,8% (2370 à 2460 kg /m³) de la densité de particules de la GR. Les résultats ont également montré que le chauffage par micro-ondes de particules de GR séchées à l'air a entraîné, en moyenne, une réduction de 32% de la teneur en mortier, une réduction de 19% de l'absorption d'eau et une augmentation de 2,5% de la densité de particules des échantillons GBR testés (tableau I.4). La comparaison entre les résultats obtenus pour les deux conditions d'humidité considérées a montré qu'une augmentation de la teneur en eau de GR peut considérablement augmenter la vitesse de chauffage et, par conséquent, les contraintes thermiques différentielles générées, entraînant une élimination plus rapide et plus efficace du mortier.

Tableau I. 3 : Propriétés électromagnétique, thermique et structurale de granite et mortier utilisés dans la simulation [125].

	Granulats (granite)	Mortier
Constante diélectrique	6	6.42
Conductivité électrique (Mohr/m)	0.071	0.372
Conductivité thermique ($J/m^2 s ^\circ C$)	4.3	1.3
Coefficient expansion ($10^{-6}/^\circ C$)	11	19
Chaleur spécifique ($J/Kg ^\circ C$)	800	1600
Module d'élasticité (GPa)	50	25

Tableau I. 4 : Propriétés des GR avant et après traitement l'utilisation des techniques multiples [125].

Processus d'enrichissement		Durée de processus (h)	Propriété des GR		
			Absorption d'eau 24h (%)	Densité (Kg/m ³)	Taux de mortier (%) par mass
Avant enrichissement			42	2370	47
Une étape de processus					
Chauffage par micro-ondes	GR pré-saturé	~0.02	2.8	2460	24
	GR séché à l'air	~0.02	3.4	2430	32
Chauffage conventionnel	300°C	2	4.1	2380	44
	500°C	2	3.8	2390	41
Frottement mécanique		~0.1	3.5	2410	34
Trempage en acide	0.1 M acide sulfurique	24	4.1	2380	45
		120	4.1	2380	45
	0.5 M acide sulfurique	24	3.9	2390	41
		120	3.4	2420	33
	1 M acide sulfurique	24	3.5	2410	34
	120	1.6	2500	13	
Processus combiné					
Chauffage conventionnel et Frottement mécanique	300°C	~ 2.1	33	2430	31
	500°C	~2.1	2.1	2480	21
Chauffage par micro-ondes et Frottement mécanique	GR pré-saturé	~0.12	1.1	2550	7

Les résultats ont montré que l'utilisation d'un stade de frottement mécanique après le chauffage par micro-ondes peut améliorer de manière significative l'efficacité de la prestation GR assistée par micro-ondes en éliminant le mortier adhérent affaibli restant, ainsi que la rupture des morceaux de mortier traités au micro-onde pour le tamisage. Une réduction de près de 85% (de 47% à 7%) de la teneur en mortier, réduction de 76% (4,2-1,1%) de l'absorption d'eau et augmentation de 7,6% (2370-2550kg / m³) de la densité de particules de GBR. En utilisant le chauffage par micro-ondes combiné et le frottement mécanique, ce qui rend les propriétés des GR significativement plus proches de celles des agrégats naturels. Cependant, l'incorporation d'un étage de frottement supplémentaire peut considérablement augmenter le coût de fonctionnement [125].

La température de surface des particules GR capturées à l'aide d'une caméra infrarouge

après chauffage par micro-ondes est illustrée à la figure I.34.

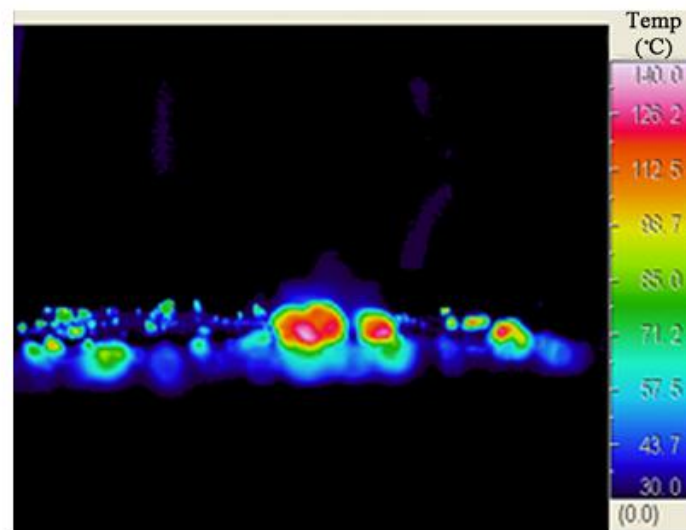


Figure I. 34 : Température de surface de GR après 1 min de traitement par échauffement au micro-onde [125].

La température de surface maximale des particules GR a atteint environ 140 ° C, ce qui est considérablement inférieur à 300- 500 ° C requis pour l'élimination du mortier adhérent en utilisant une méthode de chauffage conventionnelle (échauffement thermique). Selon Homand et Houper, le chauffage à haute température (> 300 ° C) peut affecter négativement les propriétés mécaniques du granit. Par exemple, la résistance à la pression diminue de 16% à 400 ° C et de 44% à 600 ° C [126]. Par conséquent, contrairement à la prestation de chauffage conventionnelle, la prestation assistée par micro-ondes ne semble pas dégrader la qualité de GN [125].

I. 4. 11 TRAITEMENT THERMIQUE (L'ETUVAGE)

L'appareillage nécessaire au recueil d'information sur site est de marque Test raccordé à une interface informatique par le biais du logiciel compatible Windows. Il s'agit d'un petit boîtier très facilement transportable raccordé à 4 thermocouples. Ce matériel s'adapte parfaitement aux rudes conditions du site de production [127].

L'étuvage en laboratoire est contrôlé à l'aide d'un multimètre 16 voies HP 34970A avec le logiciel HP Bench Link Data Logger afin de vérifier la validité du cycle programmé. Des thermocouples de type K sont positionnés dans des récipients remplis de sable normalisé disposés à différents emplacements dans l'étuve. Il s'est avéré que le cycle d'étuvage produit suit parfaitement la consigne programmée sans qu'il n'apparaisse d'effet d'inertie thermique notable [127].

I. 4. 12 TRAITEMENT THERMIQUE (CYCLES DE CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT)

Les éprouvettes sont soumises à des cycles de chauffage et refroidissement composés d'une étape de montée en température à une vitesse lente de $0.5^{\circ}\text{C} / \text{minute}$, et d'une phase de stabilisation de 2h afin d'assurer l'homogénéité de la température au sein de l'échantillon. La vitesse de montée en température est choisie conformément aux recommandations RILEM en fonction du diamètre de la plus grande éprouvette, afin de limiter les gradients thermiques dans l'échantillon. Pour le refroidissement, une vitesse de $0.5^{\circ}\text{C} / \text{minute}$ jusqu'à température ambiante est imposée. Cependant, l'inertie du four ralentit le refroidissement en dessous de 300°C . Les températures cibles sont :

- 150°C qui correspond à la fin de l'élimination de l'eau libre.
- 300°C qui coïncide avec la fin de la déshydratation des CSH (silicates de calcium hydratés).
- 450°C Palier intermédiaire entre 300°C et 600°C , températures entre lesquelles a lieu la principale chute de performances mécaniques [128].
- 750°C qui correspond au début du phénomène de décarbonatation.

I. 4. 13 CHAUFFAGE CONVENTIONNEL (ENRICHISSEMENT THERMIQUE)

Dans ce procédé, les particules de GR sont chauffées à environ 500°C pendant une durée d'environ deux heures. Les contraintes thermiques générées par dilatation thermique sont utilisées pour la fracture et donc pour retirer le mortier adhérent.

Selon Shima et al [112], lorsque le béton est chauffé à des températures 300°C , le mortier est rendu cassant en raison de la déshydratation ; abaissant sa résistance aux contraintes thermiques développées. Ils ont pensé que le fait de saturer le mortier avant le chauffage améliore l'efficacité de cette méthode, car elle peut conduire à une pression interstitielle facilitant le désenrobage du mortier. Il a également été signalé que l'immersion des agrégats dans l'eau froide, immédiatement après le chauffage, peut entraîner un retrait plus élevé du mortier résiduel en augmentant les contraintes thermiques différentielles [112].

I. 4. 14 AMELIORATION DE LA QUALITE DES GRANULATS RECYCLES GROSSIERS PAR LE REVETEMENT DE CIMENT

L'objectif principal de l'encapsulation est de contribuer à réduire la porosité des agrégats grossiers poreux [129]. L'encapsulation se compose d'un film mince de pâte de ciment qui est placé autour du grain agrégé. La quantité de ciment nécessaire à l'encapsulation complète de l'agrégat dépend à la surface spécifique du grain et du volume des grains, du volume de ciment à utiliser selon l'épaisseur supposée et de la quantité théorique de ciment [130].

Le volume de ciment nécessaire est calculé en fonction de la surface spécifique d'un grain de diamètre moyen et de l'épaisseur de l'encapsulation, supposé 0,16-0,23 mm, ce qui donne la plus forte réduction de l'absorption d'eau [131]. Le revêtement ne se produit pas nécessairement comme une couche homogène de ciment ; Il ne devrait couvrir que la plupart des pores ouverts et des fissures.

Le revêtement a été effectué dans un granulateur de laboratoire de 45 cm de diamètre. Les agrégats à revêtir ont été trempés jusqu'à ce que l'humidité de surface ne soit plus visible, puis placée dans le tambour en rotation.

Les quantités calculées d'eau et de ciment ont été ajoutées simultanément aux agrégats avec rotation, essayant de maintenir le rapport eau / ciment E/C désiré de la pâte de ciment dans la plage de 0,25-0,50. Le temps de revêtement total pour un lot d'environ 2 kg de matériau était inférieur à 5 min (figure I.35). Pour garantir une bonne hydratation du ciment, les grains enrobés ont été placés dans un environnement humide pendant 7 jours de durcissement. Certains grains ont été agglomérés avec des grains environnants. La zone de contact s'est révélée si faible que le lien entre les grains a éclaté pendant la manipulation, donc cela n'a pas posé de problème [131][130].



Figure I. 35 : Tambour rotatif où l'encapsulation de l'agrégat recyclé a eu lieu [130].

Le mélange a été conçu en utilisant une procédure pour optimiser le facteur d'emballage [132]. L'idée originale était de jeter des séries de béton ayant un rapport E /C et une consistance similaires.

Toute différence de résistance ou de porosité du mélange résultant pourrait alors être attribuée à l'impact des agrégats. Comme la série avec des agrégats recyclés a une demande d'eau plus élevée, l'excès d'eau a été compensé par un super plastifiant, afin de s'assurer que toutes les séries pourraient avoir des propriétés similaires à l'état frais.

La propagation du béton à la table d'écoulement a été fixée à 40 cm, mesurée selon DIN EN 12350-5 : 2009. La résistance à la compression a été mesurée à 7 et 28 jours et la densité apparente a été déterminée à 28 jours suivant la norme DIN EN 12390-3. L'absorption d'eau a été mesurée à 28 jours suivant la norme cubaine NC345 : 2005.

La segmentation de la porosité a été utilisée pour comparer à la fois l'impact de l'agrégat sur la matrice de ciment qui l'entoure et aussi pour évaluer l'impact d'encapsulation des agrégats recyclés. Il est généralement admis que les propriétés du béton à l'état durci sont liées à sa porosité, il est donc préférable de caractériser le système de pores que les phases solides forment lors de l'hydratation du ciment [133]. Les auteurs ont choisi d'appliquer une analyse au MEB pour l'évaluation quantitative de la structure des pores. La microstructure du ciment est considérée comme répondant à ces conditions stéréologiques [134]. Les zones de l'agrégat, du revêtement et de la pâte dans les images numériques ont été délimitées manuellement, puis la quantification des pores a été effectuée en utilisant la méthode du point d'inflexion de l'histogramme cumulatif décrite par [135][136].

La quantité totale de ciment portland nécessaire pour l'encapsulation de la fraction de 4 à 8 mm était d'environ 163 kg/m^3 . Malgré le trempage des grains dans l'eau avant le revêtement, il fallait ajouter de l'eau pour compenser l'eau piégée dans le grain. Le rapport final E/C pour le film de ciment a varié autour de 0,4-0,5. La figure I.38 présente une coupe transversale d'un grain agrégé encapsulé, observé dans un microscope pétrographique. Les mesures effectuées sur l'échantillon prouvent que l'épaisseur réelle de la couche de ciment oscille autour de 0,2 mm, beaucoup plus petite que l'épaisseur du revêtement rapporté dans la littérature, qui varie entre 0,5 et 0,8 mm [137]. La quantité totale de ciment par m^3 de béton, y compris l'encapsulation, était de 667 kg/m^3 . Elle était plus élevée que la quantité de ciment utilisée à la procédure de mélange en deux étapes signalées dans la littérature - 500 kg/m^3 - mais le taux de résistance dans les deux séries était également plus élevé à tous les âges [137]. Cependant,

il existe une certaine marge de manœuvre pour réduire le ciment dans l'encapsulation sans affecter les propriétés des agrégats.

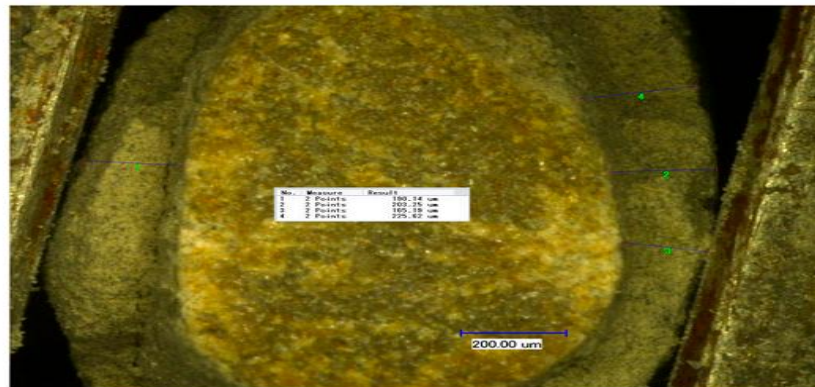


Figure I. 36 : Détails de l'encapsulation d'un grain agrégé [137]

La figure I.37 présente les valeurs de la perte de solidité des facteurs dans tous les agrégats. Comme prévu par les expériences antérieures [138], l'agrégat non enduit se détériore pendant les cycles de gel-dégel. Plus la porosité est connectée, plus les pertes de masse sont élevées pendant les cycles de congélation-décongélation, en raison du changement de volume d'eau dans les pores saturés à des températures autour de zéro degrés Celsius. Le revêtement de ciment améliore les performances à des niveaux similaires aux agrégats naturels communs [138].

Tableau I. 5 : Le détail du procès d'encapsulation de GR [138]

Echantillon	Fraction (mm)	Granulats (g)	Ciment (g)	E/C
M2CO	4-8	500	91	0.45-0.50

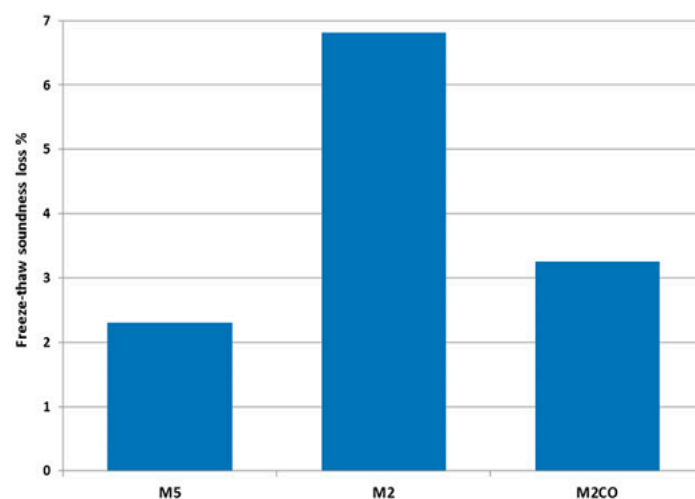


Figure I. 37 : Résultats des essais gel –dégel effectués sur les agrégats étudiés [138].

Ensuite, une réduction de la porosité de l'agrégat enduit est à prévoir. La figure I.38 présente les résultats de l'essai d'absorption d'eau de 24 h effectué à la fraction de 4 à 8 mm

des agrégats faisant l'objet de cette étude. L'agrégat non recouvert M2 a une porosité supérieure aux limites de la plupart des normes pour les agrégats naturels, qui se situent entre 5 et 7%, mais les valeurs obtenues sont compatibles avec les valeurs d'absorption pour les agrégats recyclés [139].

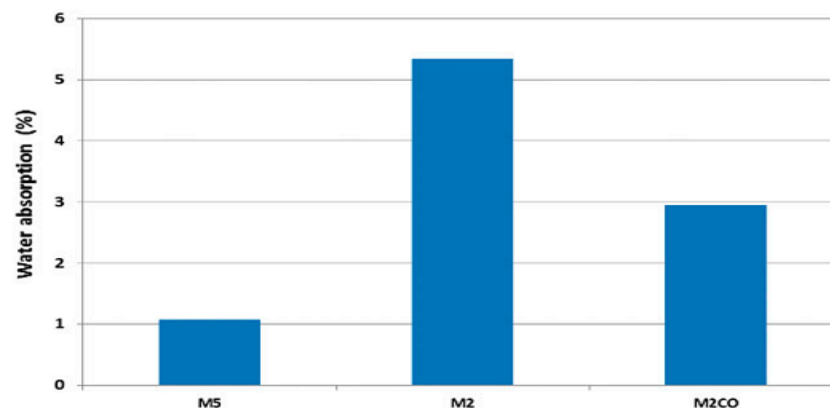


Figure I. 38 : Essais d'absorption d'eau sur les agrégats sujets d'étude [139].

Les pores, les vides, les fissures et les zones faibles du mortier adhérent dans les GR sont probablement les principales raisons de l'absorption élevée d'eau des agrégats recyclés.

L'encapsulation de la fraction de 4 à 8 mm réduit de 55% de l'absorption d'eau de cette fraction, car elle engendre une couche mince et dense de ciment autour du grain qui la verrouille et empêche l'entrée d'eau. L'absorption d'eau de cette fraction est réduite à des niveaux similaires à ceux de l'agrégat de référence. Le revêtement de ciment permet aux granulats recyclés de satisfaire aux critères d'adéquation établis pour les granulats recyclés à utiliser dans le béton structural (perte d'abrasion de Los Angeles inférieure à 40%, densité spécifique supérieure à 2160 kg/m³ et absorption d'eau inférieure à 8%) [140].

Tableau I. 6 : Conception de mélange et l'affaissement à l'état frais [140].

Série de béton	Ciment (g)	Granulats fines	Gros granulats	E/C	Ajout (%)	Étalement (cm)
M2	504	570	897	0.5	1.6	43
M2CO	504	570	897	0.5	0.9	42.5
M5	504	570	897	0.5	1.1	40.5

Le tableau I.6 présente la conception du mélange et les propriétés du béton frais. La série de béton M2 fabriquée avec des agrégats recyclés a la plus forte demande de mélange, une dose de 1,6% de poids de ciment. La série de béton M5, fabriquée avec un agrégat naturel, nécessitait une dose de 1,1% de ciment pour la même consistance et E/C, 31% inférieure à la série M2. La série de bétons M2CO a atteint la même consistance pour E/C similaire avec seulement un dosage de 0,9% de poids de ciment sous forme de dosage, pour une réduction

totale de 44% de la demande de SP vis à vis du béton fabriqué avec des granulats non collés. Il semble que la réduction de la demande d'eau soit causée par l'augmentation de l'imperméabilité de la fraction de 4 à 8 mm d'agrégat grossier par l'encapsulation du ciment, et elle à un impact favorable sur l'aptitude au travail. Ce résultat est conforme à ceux des cas où le revêtement de ciment a été utilisé [137].

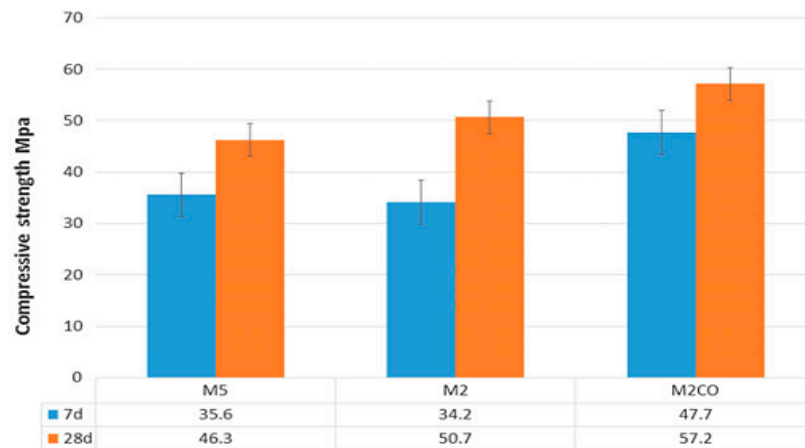


Figure I. 39 : Résistance à la compression de test pour tous les bétons évalués [137].

La figure I.39 présente les résultats de résistance à la compression des séries de béton à 7 et 28 jours. Tous les mélanges ont été confectionnés avec une teneur en ciment et à E/C similaire, une quantité de superplastifiant a été ajoutée jusqu'à ce que la consistance souhaitée soit atteinte (étalement de 40 cm), afin d'atteindre des résultats de résistance similaires dans toutes les séries. La résistance du béton fabriqué avec des granulats grossiers non revêtus est dans le même ordre que la série de référence. Ceci est également rapporté dans la littérature et est lié à la forte résistance à l'abrasion de l'agrégat grossier recyclé [141].

La série de béton M2CO montre une augmentation de 12% de la résistance par rapport à M2 avec des agrégats non revêtus. L'augmentation de la résistance signalée est attribuée à l'amélioration de la densité de l'ITZ [142][140][49]. Les agrégats recyclés ont tendance à augmenter l'absorption d'eau dans les environs de l'agrégat, surtout lorsque les agrégats ne sont pas trempés avant le mélange [49]. Le revêtement de ciment réduit l'absorption d'eau dans l'agrégat et permet une meilleure hydratation du ciment; Donc, plus de produits d'hydratation sont formés dans l'environnement de l'agrégat revêtu et la densité globale de cette zone augmente [49].

Des améliorations de la résistance à la compression dans la gamme de 25-35% sont rapportées à propos du béton fabriqué avec des agrégats revêtus de ciment [137].

Kong et al rapportent également une augmentation de la résistance du béton recyclé encapsulé entre 4 et 22% par rapport au béton recyclé sans encapsulation [140][126]

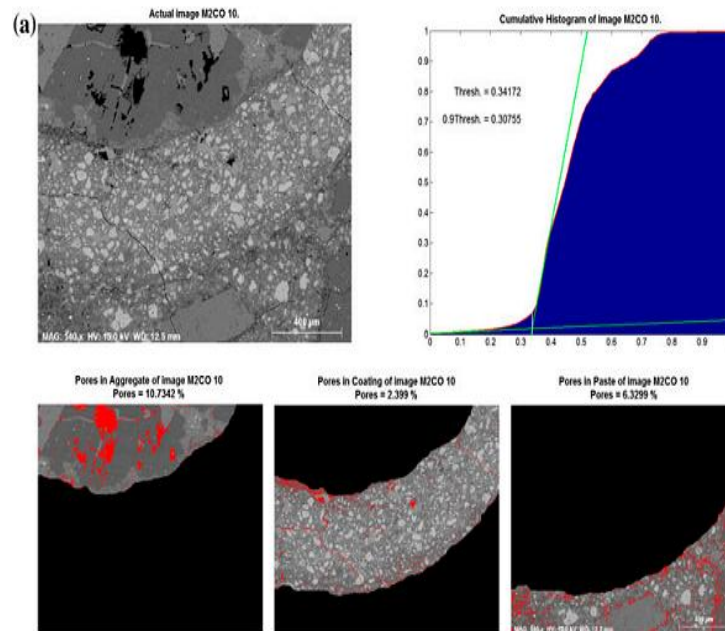


Figure I. 40: Evaluation de l'impact du liant sur l'encapsulation des agrégats recyclés grâce aux observations des images MEB dans l'échantillon M2CO, (a) les pores segmentés, (b) les zones de distribution des tailles des pores pour le grain, le revêtement et la pâte, (c) l'exemple de Segmentation des pores selon la zone (μm^2) [140].

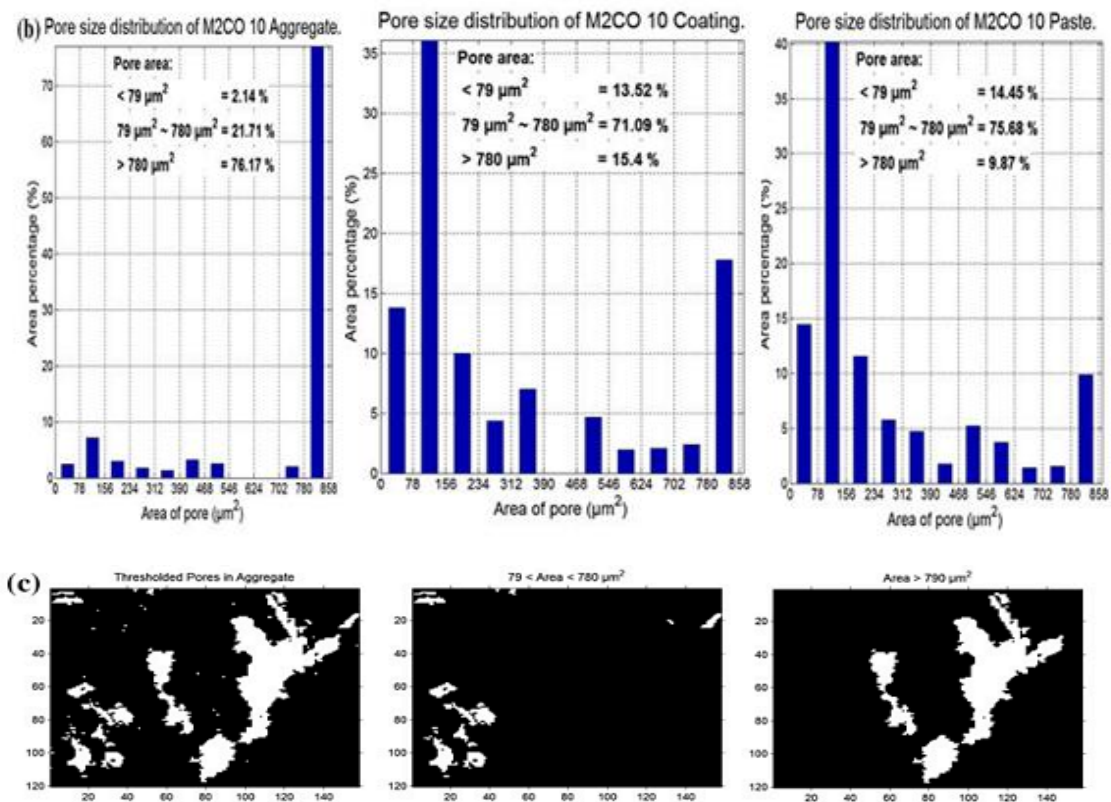


Figure I. 41 : Surfaces des pores des M2CO [140].

Signalant une augmentation de la résistance à la compression dans le béton fabriqué avec des agrégats recyclés, produits par une procédure de mélange en deux étapes similaires à celle rapportée par Babu et al [126]. Les différences de taux d'augmentation pourraient être attribuées aux caractéristiques spécifiques des matériaux utilisés dans chaque étude, surtout E/C dans le béton. Dans tous les cas, l'encapsulation du ciment entraîne une augmentation de la résistance à la compression, potentiellement causée par l'amélioration de la IZT, la réduction des zones faibles dans la matrice cimentaire et une liaison améliorée entre la pâte de ciment d'agrégats. [49].

Les images MEB de la série de bétons fabriquées avec des agrégats encapsulés ont fait l'objet de traitement d'image. L'analyse a été effectuée pour toutes les séries de béton fabriquées avec des agrégats recyclés encapsulés. La porosité de la couche de l'encapsulation (M2CO) a été mesurée afin d'évaluer la contribution du revêtement de ciment à la réduction de l'absorption d'eau de l'agrégat. La présence écrasante des pores micro et méso (plus de 90%) dans la zone de la couche de ciment a permis de confirmer que le ciment entourant les grains a bien été hydraté. La densité plus élevée de cette couche externe est probablement la raison à la réduction de l'absorption d'eau rapportée ci-dessus pour les agrégats enduits.

La porosité a été mesurée sur la matrice cimentaire dans une large zone d'environ 50-100 μm autour du grain agrégé, qui comprend la zone de transition entre l'agrégat enduit et la pâte, l'ITZ.

Les tableaux I.7 et I.8 présentent les résultats du pourcentage de pores situés aux trois niveaux différents définis pour l'étude.

Tableau I. 7 : La distribution de taille de pores des matrices en encapsulation des GR [137].

Séries	<79 μm^2 (%)	79-790 μm^2 (%)	> 790 μm^2 (%)
M2CO	41.86	52.31	5.8

Tableau I. 8 : La distribution de taille de pores des matrices de la zone de transition qui entoure des GR [137].

Séries	<79 μm^2 (%)	79-790 μm^2 (%)	> 790 μm^2 (%)
M2	12.77	37.11	50.13
M2CO	25.38	56.92	17.70

Les micros et mésopores induits lors de l'hydratation du ciment de la série M2 (agrégats non enrobés) représentent 49,87% de la porosité totale. La porosité est concentrée dans la zone située à 20-30 μm de l'agrégat, elle s'est probablement produite car l'agrégat poreux, a

absorbé de l'eau le ciment n'a pas bien hydraté, phénomène connu sous le nom de saignement interne, également rapporté par d'autres auteurs notamment Li et al [137].

La matrice de ciment autour de l'agrégat revêtu dans la série M2CO entraîne une augmentation de la quantité de pores plus petits dans la matrice à 82,3%. Cela pourrait indiquer qu'une matrice de ciment beaucoup plus dense est construite autour de l'agrégat avec l'encapsulation, ce qui empêche le bain de l'eau de saigner et favorise l'hydratation du ciment dans la pâte pour construire une matrice plus forte et plus dense, comme indiqué dans les cas précédents. [137] La transition entre l'agrégat et la pâte est plus petite et plus lisse par rapport à la zone où le revêtement de ciment entoure l'agrégat grossier, suite à la tendance signalée dans la littérature [140]. La densité globale de la matrice est augmentée et l'agrégat poreux est bloqué par la couche mince de ciment de l'encapsulation et moins d'eau peut être absorbée par les fissures et le mortier adhérent dans l'agrégat recyclé [126].

Des impacts comme la réduction de l'absorption d'eau dans le béton ou l'abaissement du transport d'ions à travers la matrice de béton pourraient être attendues [140].

I. 4. 15 TRAITEMENT DES GRANULATS RECYCLES PAR HYDROFUGE

Trois types d'agents hydrofuges à base de silane ont été utilisés pour ce prétraitement. Ceux-ci sont habituellement utilisés en tant qu'hydrofuge de surface de béton (traitement hydrophobe pour la protection de surface de béton) pour des structures de génie civil ou du bâtiment. Ces trois produits notés (H_A, H_B, H_C) se distinguent par leur pourcentage de matière active de 20%, 40% et 99%, respectivement.

Les granulats recyclés (fraction 5/10mm, 10/20mm) ont été immergés pendant 5 minutes dans les trois types d'agents hydrofuges respectivement. Après trempage, les GR ont été séchés 48h dans une chambre climatisée à 21°C et à 65% d'humidité relative afin de permettre aux agents de polymériser et ainsi d'activer leurs propriétés hydrophobes. De plus, un deuxième trempage a été réalisé pour chaque hydrofuge. Après le prétraitement, le coefficient d'absorption d'eau de chaque classe granulaire a été mesuré selon la méthode décrite dans la norme européenne EN 1097-6 [38].

La Figure I.45 présente la variation de l'absorption d'eau des GR en fonction du nombre de trempages pour la fraction 5/10mm. Ils ont observé que l'absorption d'eau des GR diminue fortement après le prétraitement pour tous les types d'hydrofuges : l'hydrofuge modifie la

tension superficielle des GR (de 80mN/m à 20mN/m), ce qui réduit la pénétration d'eau sous forme de liquide. L'absorption d'eau des GR diminue quand le nombre de trempages augmente. L'absorption d'eau des GR non traités est de 8,04% tandis que l'absorption d'eau des GR après deux trempages est de 1,67% pour H_A. Ils ont remarqué que la plus faible absorption d'eau des GR est obtenue pour le produit le moins concentré. Cela pourrait être attribué à une viscosité plus élevée du produit utilisé lorsque la concentration en produit actif augmente, conduisant à une plus faible pénétration du produit dans le GR. La même tendance a été observée pour la fraction 10/20mm.

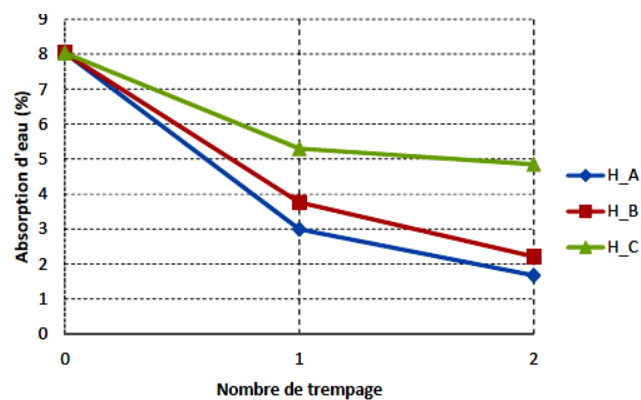


Figure I. 42 : Absorption d'eau des GR en fonction du nombre de trempages pour la fraction 5/10mm [38].

Le Tableau I.9 présente les compositions des trois bétons, qui correspondent à des compositions pour la fabrication de hourdis en béton précontraint. Les gravillons naturels ont été remplacés par la même fraction et la même masse de granulats recyclés traités. Les gravillons recyclés ont été prétraités par deux trempages d'hydrofuge A. Les granulats naturels et recyclés ont été utilisés à l'état sec à l'air. L'eau ajoutée a été corrigée selon la teneur en eau des granulats et leur absorption d'eau. Une moitié de l'eau totale a été ajoutée pour pré-saturer les granulats dans le malaxeur, 5 minutes avant l'ajout du ciment.

L'autre moitié de l'eau a été ajoutée après l'introduction du ciment.

Tableau I. 9 : Compositions des trois bétons [38].

	B_GN	B_GR	B_GRT
Gravillons 6/14 (Kg)	309.7	282.4	278
Gravillons 2/8 (Kg)	851.7	776.6	764.6
Sable 0/2 (Kg)	774.2	706	695.1
Ciment (Kg)	309.7	282.4	278
Eau efficace (Kg)	159.7	145.6	143.4
E_{eff}/C	0.52	0.52	0.52

La Figure I.43 présente la résistance en traction du béton durci après 28 jours. Les résistances en traction de béton avec GR traité et non traité sont assez similaires et sont plus faibles que celles de béton avec GN.

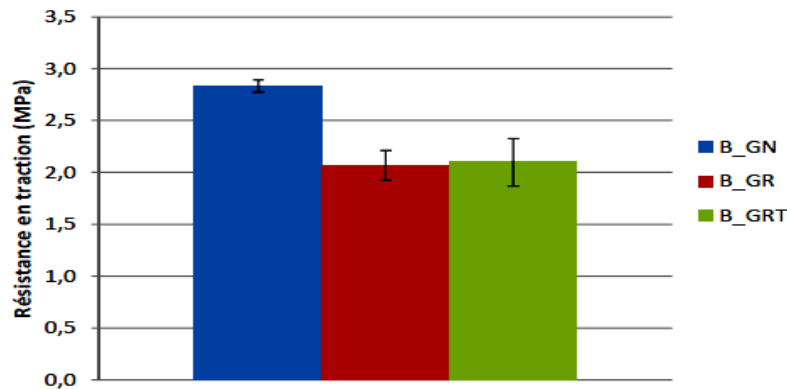


Figure I. 43 : La résistance en traction pour trois bétons [38].

La Figure I.44 présente la résistance à la compression de béton durci après 28 jours : les résistances à la compression de bétons avec GR sont plus faibles que celles de béton avec GN. Après le prétraitement hydrofuge, la résistance à la compression de béton est plus faible que celle de béton avec GR non traité, probablement à cause de l'hydrofugation empêchant la pénétration d'eau dans les pores des GR et à l'interface plus poreuse (moins bonne qualité de l'interface entre la pâte et le granulat). Il faudrait néanmoins encore vérifier la microstructure à l'interface au moyen d'un microscope électronique à balayage. De plus, l'eau ajoutée dans le cas de B_GRT est plus grande que dans B_GR après la correction selon la teneur en eau des GR et l'absorption d'eau des GR (les GR sont utilisés secs à l'air). Dans le cas de B_GRT, l'eau à absorber représente une quantité importante qui pourrait augmenter E_{eff} si la cinétique d'absorption est lente. Cette eau a sans doute beaucoup plus de mal à entrer dans la porosité des granulats compte tenu du traitement de surface. Ceci peut avoir pour effet d'augmenter le rapport eau sur ciment dans la pâte et de diminuer les performances de la pâte. Ce résultat est confirmé par Masato [110].

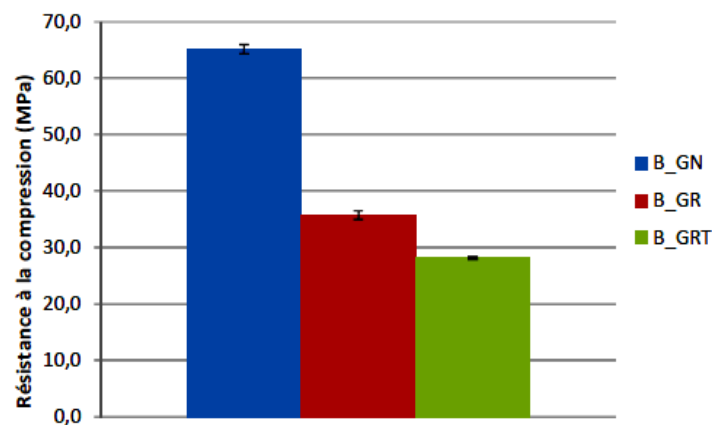


Figure I. 44 : La résistance à la compression pour trois bétons [38].

I. 4. 16 TRAITEMENT PAR POLYMERE

Selon l'étude de Djerbi & al [119], il a été utilisé un traitement par polymères et par émulsions à base de silicium.

Les agrégats naturels et recyclés ont été utilisés comme agrégats grossiers. Dans l'étude de Djerbi & al, le granite concassé a été utilisé comme agrégats naturels. Les granulats recyclés ont été trempés dans des émulsions à base de silicium (polymères hydrofuges) et des polymères à différentes concentrations pour les traiter. La concentration optimale de traitement à base de polymère nécessaire pour améliorer les agrégats recyclés a été déterminée [119].

Les GBR ont été trempés dans différentes concentrations du polymère dans un environnement de laboratoire contrôlé. La concentration optimale du traitement à base de polymère nécessaire pour améliorer les agrégats recyclés a été déterminée [120].

Des tests de résistance à l'absorption d'eau, à la porosité et à la résistance à la ténacité ont été effectués sur GBR traité par imprégnation de polymère de silicium et sur des agrégats de béton recyclé non traités.

La détermination de l'absorption d'eau pour les GBR naturels et non traités était faite par émulsion totale pendant 48 heures. Les coefficients d'absorption d'eau capillaire ont été déterminés sur une fraction granulaire différente avant tout traitement et sont présentés dans la figure I.45. Les agrégats naturels n'ont pas absorbé beaucoup d'eau. Comme le montre la figure I.45, le coefficient d'absorption d'eau est inférieur à 1% pour l'agrégat naturel, tandis que pour les agrégats recyclés, il représente environ 4% et 5% pour les GBR et CRA respectivement. La présence de mortier adhérent primaire d'agrégats de béton recyclé est la principale raison responsable de l'augmentation de l'absorption d'eau [120].

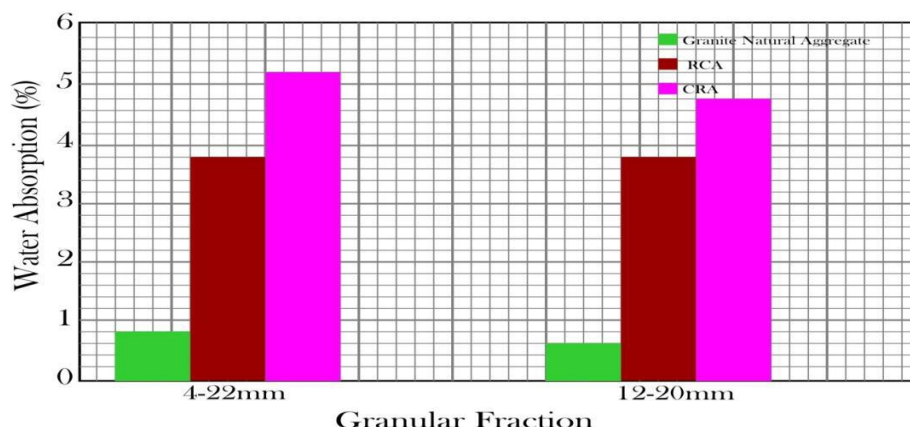


Figure I. 45 : Variation du coefficient d'absorption d'eau avec une fraction granulaire [120].

Différents lots de GBR ont été traités avec différentes concentrations de l'émulsion de polymère à base de silicium en vue de déterminer son impact sur la capacité d'absorption d'eau de GBR. Le coefficient d'absorption d'eau a été déterminé après 48 heures d'immersion totale dans l'eau. Les rapports d'absorption d'eau initiale et d'absorption d'eau finale ont été calculés pour chaque composition.

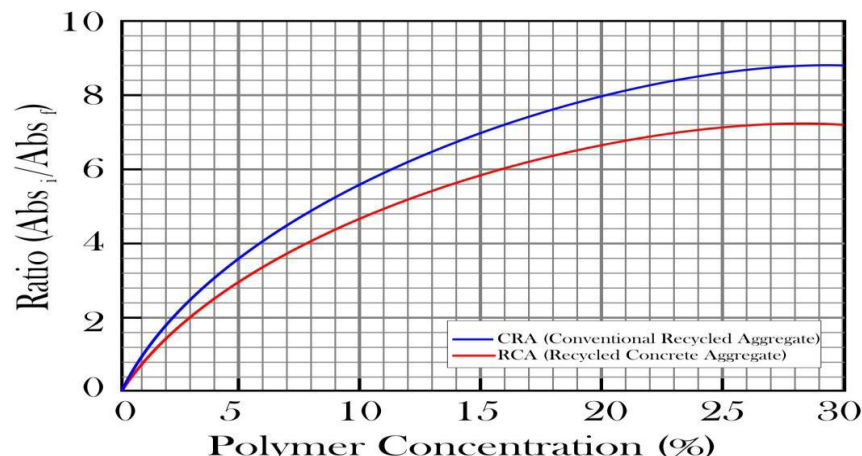


Figure I. 46 : Variation du rapport de coefficient d'absorption d'eau avec la concentration de polymère [119].

La figure I.46 montre le rapport du coefficient d'absorption d'eau entre les agrégats de béton recyclé traités et non traités; Ce qui montre clairement que le rapport du coefficient d'absorption d'eau est directement proportionnel à la concentration du polymère. À environ 30% de concentration, l'absorption d'eau est environ sept fois plus faible que celle des GBR non traités et environ neuf fois plus faible que CRA non traitée. Après avoir utilisé les traitements à base de polymère sur deux types d'agrégats de béton recyclé (GBR et CRA), le résultat obtenu montre l'effet positif du traitement par polymère sur la capacité d'absorption d'eau de GBR. Il semble que le traitement par polymère soit un traitement approprié pour les GBR.

L'imprégnation de la maçonnerie avec un polymère en émulsion à base de silicium hydrofuge semble être la méthode de protection la plus réussie contre l'absorption d'eau capillaire. Ce type de traitement hydrofuge est déjà utilisé comme traitement de surface pour les matériaux de construction [119][121]. Le type GBR traité par émulsion polymère est efficace.

Tableau I. 10 : Coefficients (L.A) d'agrégats naturels, traités et non traités GBR [119].

Type d'agrégat	Coefficient (%)	
Agrégats naturels	4-12mm	12-20mm
Granit	22-23	22-23
Granulats de béton recyclé	4-12mm	12-20mm
GBR non traité	25±2	26±2
GBR traité	24±2	21±2

Le traitement par polymère implique la formation de film polymère, qui devrait également constituer un effet de consolidation sur les granulats de béton recyclé. Il fournit des qualités hydrofuges qui diminuent considérablement l'absorption d'eau et la matrice de ciment renforcée de GBR, protégeant ainsi les agrégats de béton recyclé, en particulier les mortiers collés contre la pénétration du mortier.

Le tableau montre les résultats des mesures de Los Angeles et l'impact du traitement par polymère sur la résistance à la ténacité. Le tableau montre que le traitement par polymère améliore légèrement le coefficient de Los Angeles (L.A).

I. 4. 17 CONCLUSION

L'utilisation des granulats recyclés dans la fabrication des bétons offre une bonne solution au problème de la gestion et la revalorisation des déchets de démolition pour préserver l'environnement.

Et même les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des granulats recyclés sont presque les mêmes que les granulats naturels, d'où la possibilité de les utiliser dans le domaine du génie civil. La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés partiellement ou en totalité dans un béton offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet d'économiser les matériaux et préserver les carrières.

L'introduction de matériaux recyclés dans la composition du béton, provoque une légère diminution de la densité accompagnée d'une augmentation de la porosité et de la perméabilité entraînant ainsi des conséquences néfastes sur la durabilité du béton.

L'augmentation de la perméabilité et de l'absorption de l'eau du béton recyclés par rapport au béton d'agrégats naturels, est due en générale à la présence du mortier d'ancien béton collé aux granulats recyclés et la résistance du béton recyclés. Le béton original de résistance à la compression élevée, produit toujours des agrégats recyclés nécessitant un rapport E/C assez

comparable aux bétons à base de granulats naturels; et par conséquent, un degré d'absorption d'eau moins important.

Les propriétés des GR dépendent de beaucoup de facteurs d'influence tels que le béton d'origine, les contaminants, la méthode de broyage pour la production, le vieillissement (notamment la carbonatation) et les conditions de stockage. L'absorption d'eau influe considérablement sur les propriétés physiques et mécaniques du granulat et bétons.

A la suite du traitement des granulats recyclés avec un polymère à base de silicium, il y a eu amélioration de la résistance à l'absorption d'eau. Le film polymère développé dans le réseau poreux permet une réduction significative de la capacité d'adsorption de l'eau.

Axes de la recherche et problématique

AXES DE RECHERCHE ET PROBLEMATIQUE

Les besoins universels de conserver les ressources naturelles, de protéger l'environnement et de diminuer l'émission des gaz à effet de serre doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Le recyclage des déchets de construction et de démolition en tant que source de granulats pour la production de béton, a attiré des intérêts croissants de l'industrie du bâtiment.

Les granulats recyclés de bétons ont comme caractéristique une forte capacité d'absorption. Cette propriété reste vraie quelle que soit la provenance du béton parent. Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions des bétons à base des granulats recyclés nécessitent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de granulats naturels.

L'eau est l'un des paramètres les plus importants dans la confection du béton, elle est essentielle pour l'hydratation du ciment, si on ajoute beaucoup d'eau, la porosité augmente donc ses performances mécaniques et sa durabilité diminuent ; par contre, si la quantité d'eau est diminuée, c'est l'ouvrabilité du béton qui sera affectée.

Le présent travail consiste tout d'abord à quantifier l'eau absorbée par les granulats recyclés puis, de tester deux modes de confection du béton à base de ces déchets recyclés et d'en déduire enfin, la façon la plus convenable d'intégrer la quantité d'eau absorbée dans la préparation du béton. Cette méthodologie (la plus convenable) sera retenue pour la confection des bétons après formulation, et les caractéristiques mécaniques et rhéologiques seront étudiées.

Le présent travail s'intéressera aussi à la connaissance des différentes méthodes de pré-saturations, leurs avantages et inconvénients et de choisir pour l'expérimentation celle qui serait la plus convenable (précision, répétabilité, facilité d'exécution), permettant de mesurer les quantités d'eau absorbées, les temps correspondant à des saturations partielles et enfin de mesurer les temps de saturation à 100% des différentes combinaisons des granulats recyclés / granulats naturels.

L'hétérogénéité et le fort pouvoir d'absorption d'eau des granulats recyclés mènent à des difficultés de contrôle des propriétés du béton frais et par conséquent, influencent défavorablement les caractéristiques mécaniques du béton ; et par conséquent leur durabilité.

Les études sur l'utilisation des granulats recyclés durent depuis 50 ans. Cependant, le manque d'études sur les moyens de traitement améliorants certaines caractéristiques des granulats issus du recyclage et des bétons constituent un problème.

La recherche bibliographique a révélé l'existence de plusieurs moyens de traitements visant à améliorer la qualité des granulats recyclés et peut être à diminuer la quantité d'eau absorbée.

Dans ce contexte, trois traitements seront utilisés pour étudier la possibilité de diminution de cette forte absorption d'eau. Le traitement par enrobage par pâte de ciment, le traitement thermique et celui par résine ont été choisi comme moyen d'amélioration de la qualité des granulats.

A l'issu de la recherche bibliographique effectuée dans ce domaine, les axes de recherches ont été fixés et à travers lesquels, on essayera de répondre à certaines questions importantes:

- Quelle serait la relation entre la pré-saturation et le temps de submersion ?
- Quelle serait la meilleure méthode à adopter pour intégrer les granulats recyclés dans la préparation du béton ordinaire sans ségrégation et de meilleure résistance comparée à un béton ordinaire témoin ?
- Parmi les trois traitements adoptés, lequel serait le plus efficace pour diminuer l'absorption d'eau ?
- Quelles seraient les nouvelles caractéristiques des granulats recyclés après traitement ?
- Quelle serait l'apport des granulats recyclés traités pour la confection des bétons ordinaires, l'ouvrabilité et les caractérisations mécaniques seront les principaux paramètres à étudier de près ?

Toutes les réponses aux questions précédemment posées seront exposées dans les parties qui suivent.

Partie II :

**Matériaux et Méthodes
expérimentales**

Chapitre 1 :

Matériaux et méthode de formulation

II. 1. 1 INTRODUCTION

Ce travail de recherche vise à apporter une contribution à la valorisation des granulats de béton recyclés, Il s'agit de comparer l'influence de ces granulats recyclés sur les caractéristiques physico-mécaniques du béton ordinaire à court et moyen terme. Le comportement rhéologique du béton ordinaire est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, nous commençons ce chapitre par des essais de caractérisation des matériaux utilisés. Les matériaux utilisés dans la formulation des différents bétons sont identiques. La fabrication des bétons ordinaires a pu être réalisée sans problème avec des moyens conventionnels.

Les différents essais pour la détermination des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux ont été effectués dans des laboratoires spécialisés suivants :

- Laboratoire du Département de Génie Civil-FST de l'Université de Mostaganem.
- Laboratoire de recherche LCTPE de l'Université de Mostaganem.
- Laboratoire de recherche LMPC de l'Université de Mostaganem.
- Laboratoire C-MADE du Département de Génie Civil & Architecture, Université Beira Interior, Covilhã | Portugal.

II. 1. 2 MATERIAUX UTILISES

a. Le ciment

Un ciment CPA-CEM I 42.5 N nommé « CRS » en provenance de la cimenterie ZAHANA certifié et conforme à la norme algérienne (NA442) et européenne (EN CE 197-1). Les caractéristiques physiques ainsi que l'analyse chimique moyenne de ce ciment sont présentées aux tableaux (Tableau II. 1, Tableau II. 2, Tableau II. 3) :

Tableau II-1 : Caractéristique effectué dans le laboratoire.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	3 g/cm ³
Masse volumique apparente	1.04 g/cm ³
Consistance	26.5%
Début de prise	2h 38 min
Fin de prise	3h 50 min
Temps de prise	1h 12 min

Tableau II-2 : Analyse chimique depuis la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	9
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	0.04
C3S (%)	60
C3A (%)	7.5

Tableau II-3 : Propriétés physiques depuis la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	4200
Retrait à 28 jours (µm/m)	950
Expansion (mm)	2.9
Début de prise (min)	150
Fin de prise (min)	230
2 jours (MPa)	11
28 jours (MPa)	44

b. Granulats

Les granulats et le sable de carrière utilisés sont issus de la carrière de HASNAOUI de SIDI BELABES et les granulats recyclés sont récupéré du concassage de béton de la démolition de vieux poteaux construits en 1947 au siège de la Sonalgaz de la wilaya de Mostaganem.

Le Sable de mer provient de la carrière de SIDI LAKHDER.

On a utilisé quatre classes granulaires dans notre mélange de béton ordinaire et béton GR qui sont : gravier 3/8 (G3/8), gravier 8/16 (G8/16), sable carrière 0/3 (SC) et sable de mer (SM).



Figure II. 1 : La récupération des déchets de démolition des bétons.

✚ Elaboration des granulats recyclés

La fabrication des granulats recyclés passe par un processus de fabrication très complexe, dans un premier temps ; les blocs de béton sont récupérés et triés tous en s'assurant de l'élimination des polluants tels que les débris de bois, acier et autres. Les blocs triés sont concassés grossièrement dans un premier temps, puis passés au concassage automatique et tamisage pour l'obtention des différents diamètres

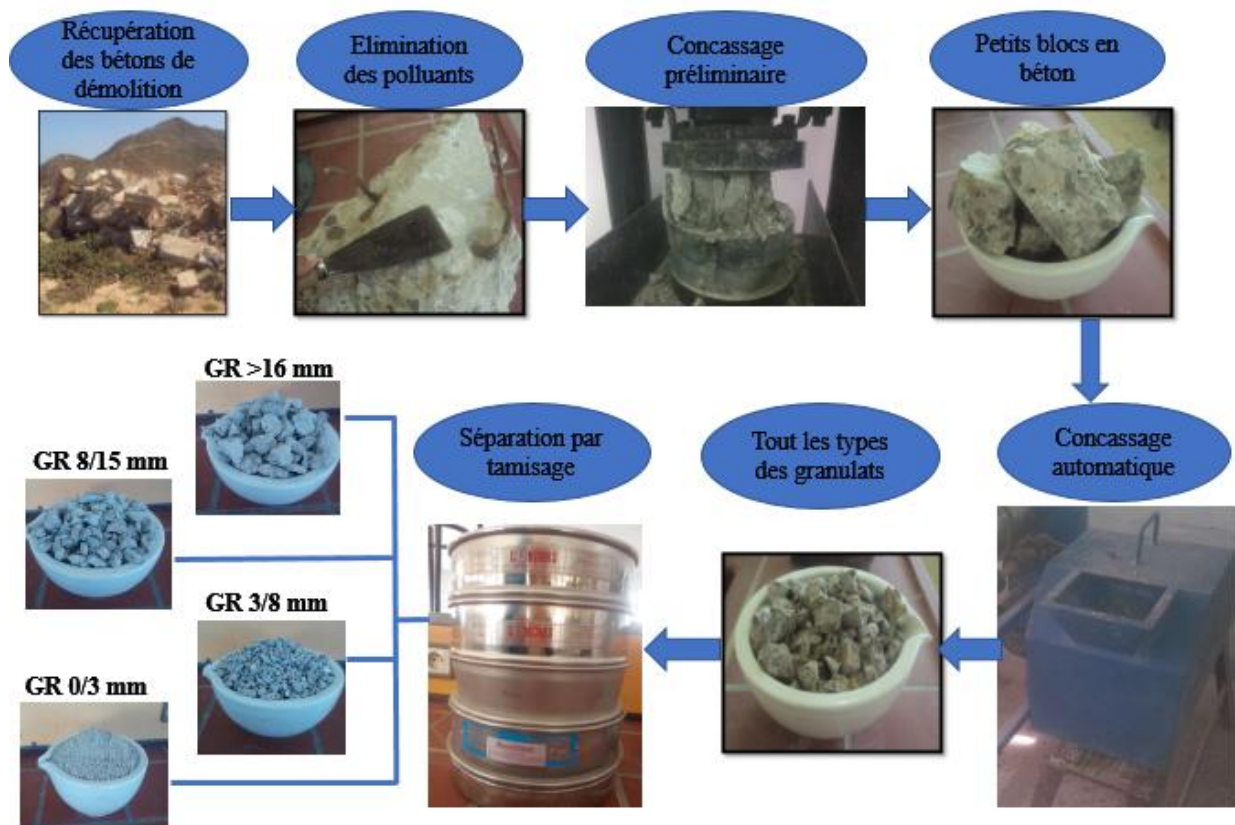








Figure II.2 : procédé pour l'obtention des granulats recyclés.

Tableau II. 4 montre les désignations, l'apparence et la nature des granulats utilisés pour le malaxage du béton ordinaire.

Tableau II. 4 : Les désignations, l'apparence et la nature des granulats.

Désignation	Sable de mer SM	Sable de carrière SC	Gravier naturel 3/8 GN3/8	Gravier naturel 8/16 GN8/16	G. recyclé 3/8 GR3/8	G. recyclé 8/16 GR8/16
Apparence						
Nature	Siliceux d/D=0/3	Calcaire d/D=0/3	Calcaire d/D=3/8	Calcaire d/D=8/16	Calcaire + Mortier attaché	Calcaire + Mortier attaché

Pour formuler un béton à partir des granulats naturels ou recyclés, il nécessite une bonne connaissance de leur propriété, et un sable bien lavé.

Les essais des granulats ont été réalisés au sein de laboratoire MDS/MDC au sein de notre université. Les résultats sont introduits au tableau II. 5 suivant. :

Tableau II. 5 : Les caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale.

Caractéristiques	SM	SC	GN3/8	GN8/16	GR3/8	GR8/16
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.63	2.5	2.62	2.66	2.36	2.34
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.5	1.43	1.69	1.70	1.41	1.42
Equivalent de sable	95.9%	95.47%	/	/	/	/
Module de finesse	1.2	3.6	/	/	/	/
Pourcentage des fines (%)	0,01	0.01	0.08	0.20	0.88	0.84
Absorption (%)	0.64%	1.82%	0.80%	0.97%	5,5%	5.7%

La valeur d'équivalent de sable dépasse 80%, significatif d'un sable propre, ceci a été constaté lors de lavage de ce sable pour la récupération des fines.

Les courbes granulométriques des granulats sont représentées par les figures suivantes (Figure II. 3, Figure II. 4, Figure II.5) :

Analyse granulométrique des granulats 3/8

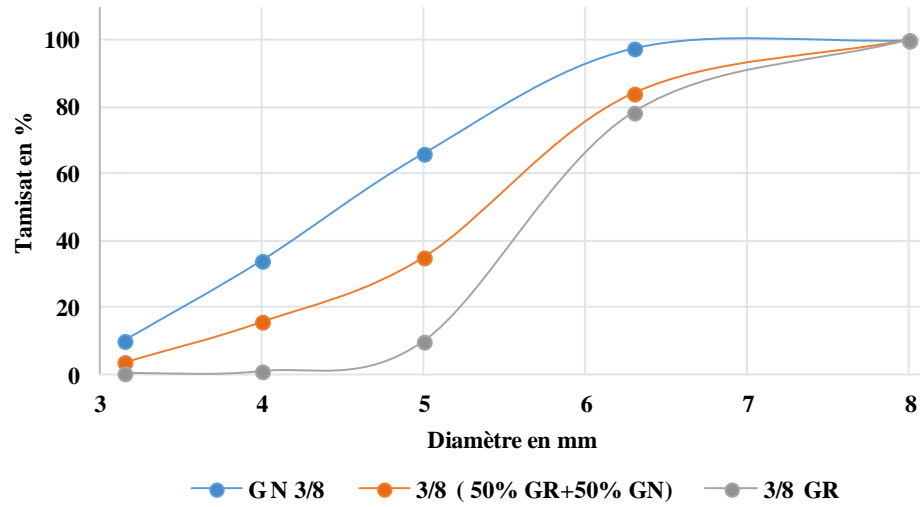


Figure II. 3 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Analyse granulométrique des granulats 8/16

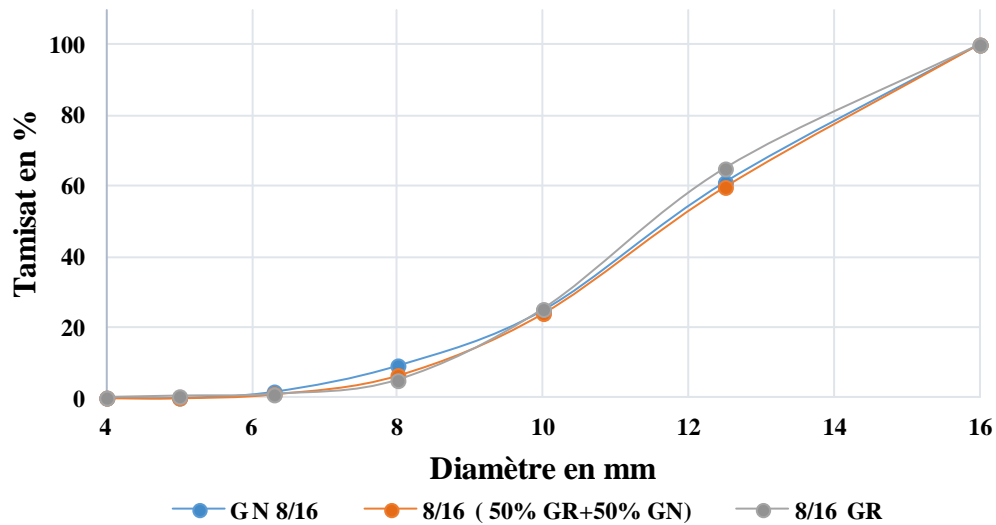


Figure II. 4 : Analyse granulométrique du gravier 8/16

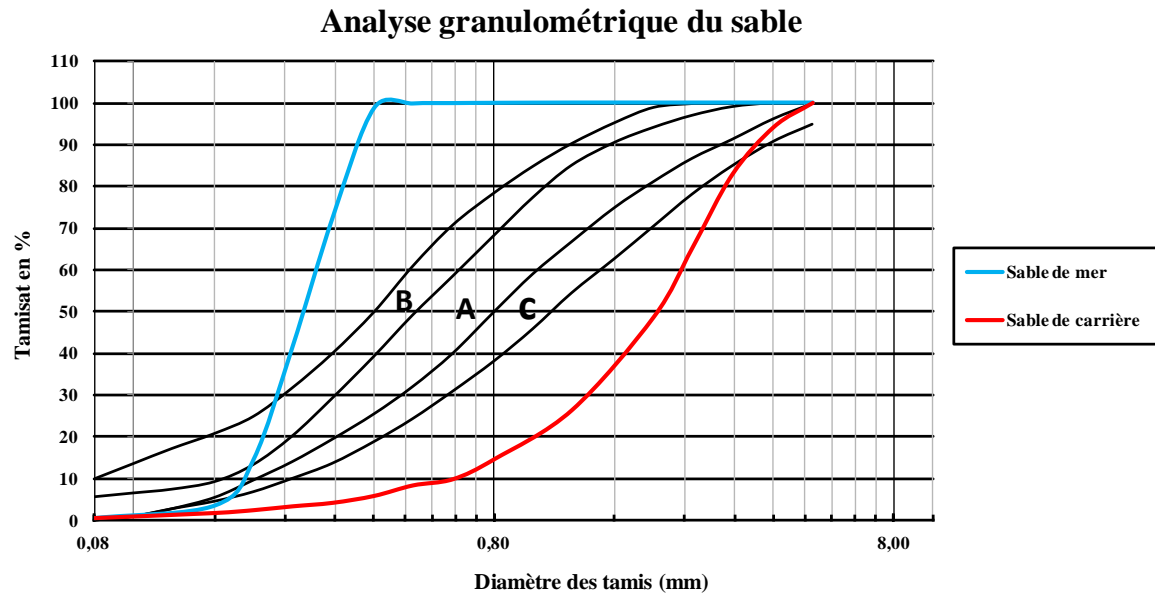


Figure II. 5 : Granulométrie des sables non corrigés

Nous remarquons que la courbe de sable de carrière n'appartient pas au fuseau privilégié, pour cette raison on a effectué des corrections par le sable de mer et les fillers calcaires en utilisant la méthode de module de finesse comme suit :

En utilisant la règle d'Abrams, on a utilisé un SC de module de finesse important $M_{f1}=3.6$ et $M_{f2}=1.2$ pour un SM fin, afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait $M_f=2.7$. Les proportions des deux sables sont les suivantes :

$$SC = \frac{(M_f - M_{f2})}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(3 - 1,2)}{(3,6 - 1,2)} = 0,75 = 75\%$$

$$SM = \frac{(M_{f1} - M_f)}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(3,6 - 3)}{(3,6 - 1,2)} = 0,25 = 25\%$$

Selon la norme Française [NF EN 206-1], avec l'ajout d'une quantité de 8% des fillers calcaire, on a trouvé un sable de $M_f= 2.38$.

La Figure II.6 représente l'analyse granulométrique des sables (avant et après correction).

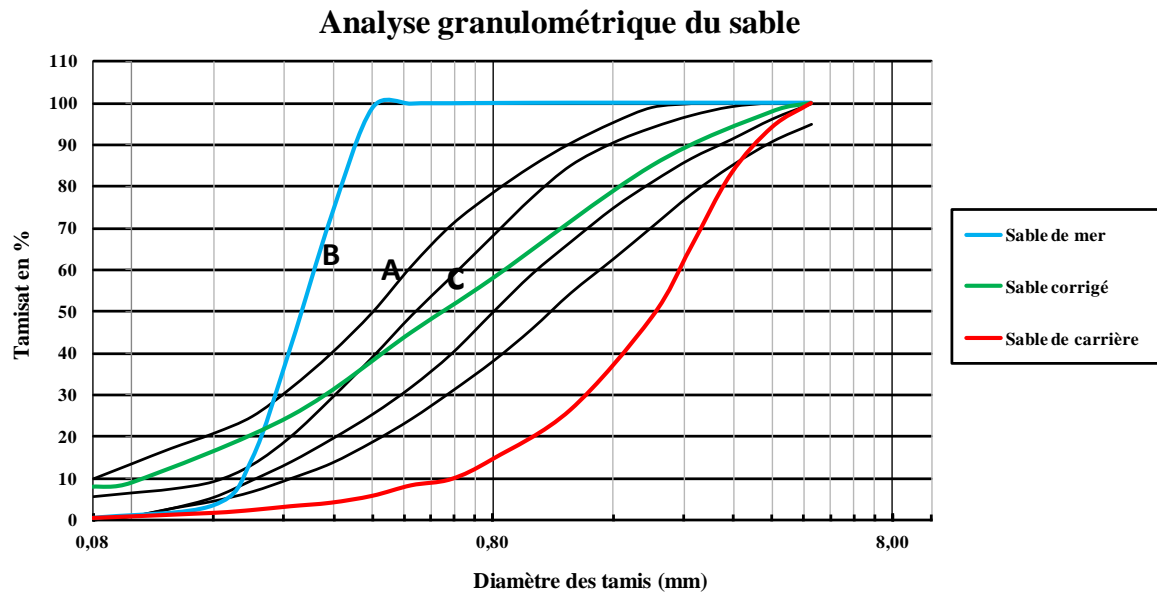


Figure II. 6: L'analyse des sables non corrigés et sable corrigé.

Le sable corrigé avec 23% sable de mer, 69% sable carrière et 8% de fine.

c. Fillers calcaires

Les fillers calcaires utilisés sont de taille inférieure à 80 μm sont de nature calcaire provenant de la carrière HASNAOUI de SIDI BELABES.

On a lavé un sable de carrière passant au tamis de 80 μm , puis on a séché les fillers obtenus dans une étuve et on les broyés.

d. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un Super plastifiant / Haut réducteur d'eau appelé SOLUFLOW 3090. Le SOLUFLOW 3090 est un super plastifiant de nouvelle génération, à base de polycarboxylate modifié particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi, les chantiers de génie civil et travaux publics.

Le SOLUFLOW 3090 est adapté à la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants homogènes sur une large gamme de résistance mécanique et transportés sur de longues distances et pompés.

Le SOLUFLOW 3090 est destiné à créer une forte réduction d'eau et/ou une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Il permet de réaliser des bétons avec un long maintien d'ouvrabilité.

- Des bétons de haute qualité.
- Des bétons avec de long maintien de rhéologie, même par temps chaud.

Il est caractérisé par :

Densité	1,050 g/cm ³ ± 0,02
PH	5.5± 1,5
Extrait sec	25 ± 1.5%
Teneur en ion Cl ⁻	< 0.1 %
Teneur en Na ₂ O éq.	< 1%
Plage d'utilisation recommandée	0,3 à 3 % du poids du ciment.

e. Eau de gâchage:

Eau incorporée au mélange liant et granulats afin d'enclencher sa prise et de conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité. La qualité de l'eau de gâchage doit répondre à la norme NF P 18-303.

L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé.

f. Résine

La résine utilisée est une peinture à hautes performances à base de polymères chlorés nommé MEDIMPER. Elle se présente sous forme de solution liquide visqueuse. Elle est étanche à l'eau et peut être appliquée sur tous supports : béton, produit céramiques, pierres naturelles, surfaces métalliques, etc. Elle est destinée au revêtement de piscines et de façade ainsi que pour la protection d'ouvrage en béton ou métallique.

Le **MEDIMPER** agit par obturation des pores et des canaux capillaires en formant une fine pellicule souple et étanche. Il permet aussi d'éviter la corrosion des ouvrages métalliques à cause de son excellente imperméabilité. Il est anticorrosif, anti-poussière, résistant aux sulfates, résistant à l'eau de mer. Elle caractérise comme suit :

Couleur	Blanche ou bleu	
Densité (ISO758)	1.22	
Viscosité (NFT30014)	110 CF4 (à 20° C)	
Finesse	8	
Extrait sec (EN 480-8)	66%	
Temps de séchage (ISO 1517)	Sec	24 h
	Dur	48 h

II. 1. 3 FORMULATIONS ADOPTEES

Le béton est formulé par la méthode de DREUX GORISSE qui repose sur les abaques et sur un choix préalable à fixer à l'avance.

On a fixé le rapport **E/C** à **0.5**, le dosage en ciment **C** à **350 kg/m³**, la résistance à la compression de **30 MPa** à 28 jours (béton courant de bonne qualité pour bâtiment), l'affaissement de classe **S3** (béton très plastique avec **Aff=10 cm**) et le diamètre maximal **D_{max}=16 mm**.

Pour la détermination des pourcentages des différentes classes granulaires entrant dans la formulation du squelette du béton avec un minimum de vides, on a tracé :

- ❖ Les courbes granulométriques des différents granulats (G3/8, G8/16 et Sable corrigé)
- ❖ La courbe théorique de référence d'un matériau à minimum de vide schématisée par une droite brisée.

-La droite de référence de Dreux Gorisse est définie par son abscisse **X** et son ordonnée **Y** :

Le point O (0.08, 0%)

Le point B (D_{max}, 100%) → B (16, 100%)

Le point A (X_A, Y_A) :

$$X_A = \frac{D_{max}}{2} = \frac{16}{2} = 8$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D_{max}} + K' \quad \text{Avec } K' = K + K_s + K_p$$

D'après les tableaux I-9 chapitre 4 (partie 1) on dégage :

K	Dosage de ciment 350, granulats concassé et vibration normale	+2
K _s	6xMf-15	-0,72
K _p	Le béton non pompable	0

$$K' = +2 - 0,72 + 0 = 1.28$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{16} + 1.28 = 47.28$$

$$\Rightarrow A (8, 47.28 \%)$$

⇒ On dessine le point A et on prend les pourcentages pour chaque type de béton.

⇒ On détermine la compacité :

$$C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3$$

C ₀	Béton plastique avec vibration normale	0.82
C ₁	Sable et gravier concassée	-0.03
C ₂	Granulats lourds	0
C ₃	Dosage du ciment= 350 kg/m ³	0

$$\Rightarrow C = 0,82 - 0,03 + 0 + 0 = 0,79$$

- a. La formulation du béton ordinaire par la méthode de Dreux Gorisse (100% graviers naturels)

Analyse granulométrique

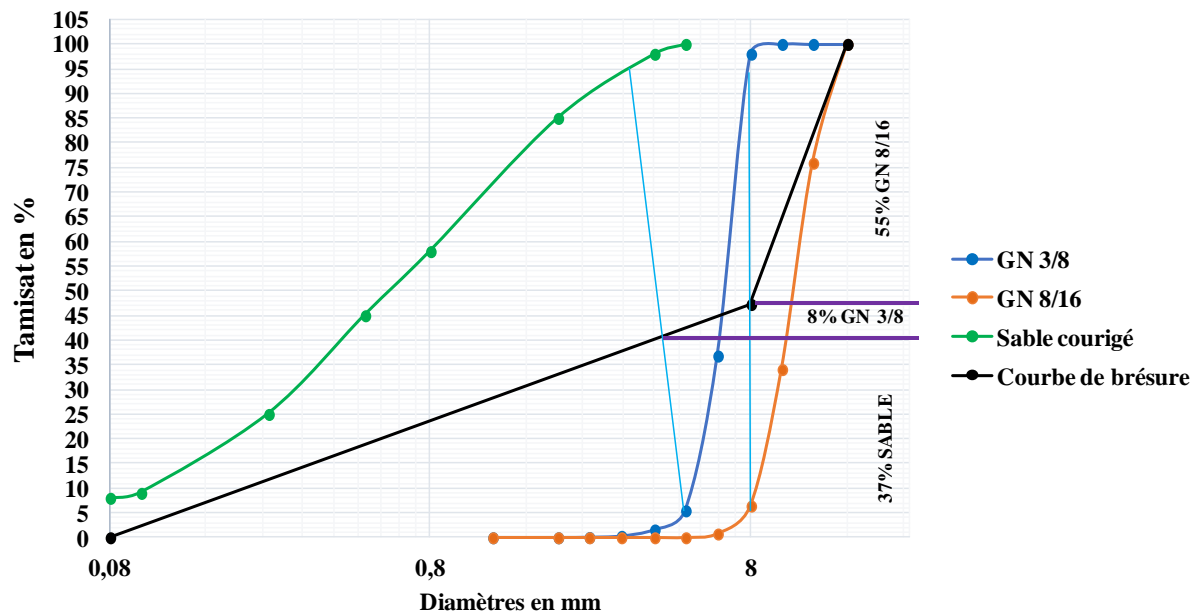


Figure II. 7 : Granulométrie du sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/16 et la courbe braisée.

On prend les pourcentages et on détermine les volumes absolus des constituants du béton puis leurs masses (Tableau II. 6):

$$\% \text{ du sable} = 37\% \quad ; \quad \% \text{ du gravier } 3/8 = 8\% \quad ; \quad \% \text{ du gravier } 8/16 = 55\%$$

Tableau II. 6: Les volumes absolus des constituants du béton.

Constituants	C	SM	SC	G 3/8	G 8/16	Fine
Volumes pour 1 m ³ (L)	120.69	56.96	170.87	53.30	366.47	19.81

⇒ Les constituants d'un 1 m³ sont (tableau II. 7) :

Tableau II. 7 : Les constituants d'un mètre cube de béton ordinaire.

Constituants	C	E	SM	SC	G 3/8	G 8/16	Fine	Adjuvant 1%
Pour 1 m ³ (kg)	350	175	149.80	427.18	136.45	978.47	49.53	3.5

b. La formulation du béton ordinaire par la méthode de Dreux Gorisse (100% gravier recyclé)

Analyse granulométrique

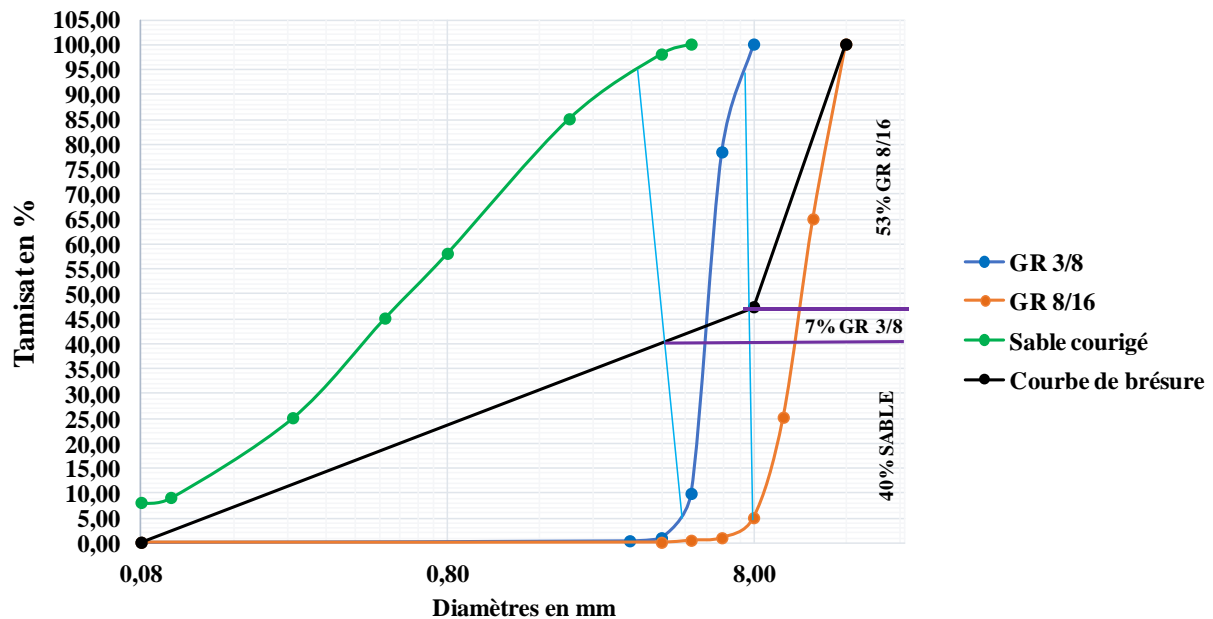


Figure II. 8: Granulométrie du sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/16 et la courbe braisée.

On prend les pourcentages et on détermine les volumes absolus des constituants du béton puis leurs masses (Tableau II. 8) :

$$\% \text{ du sable} = 40\% ; \% \text{ du gravier } 3/8 = 7\% ; \% \text{ du gravier } 8/16 = 53\%$$

Tableau II. 8: Les volumes absolus des constituants du béton.

Constituants	C	SM	SC	G 3/8	G 8/16	Fine
Volumes pour 1 m ³ (L)	120.69	61.58	184.73	46.85	354.73	21.42

Ce qui permet de donner les masses des différents composants des bétons ordinaires à élaborer correspondant à 1 m³ de béton (tableau II. 9).

Tableau II. 9 : Les constituants d'un mètre cube de béton ordinaire.

Constituants	C	E	SM	SC	G 3/8	G 8/16	Fine	Adjuvant 1%
Pour 1 m ³ (kg)	350	175	161.96	461.83	111.50	833.62	53.55	3.5

c. La formulation du béton ordinaire par la méthode de Dreux Gorisse (50% GR+50% GN)

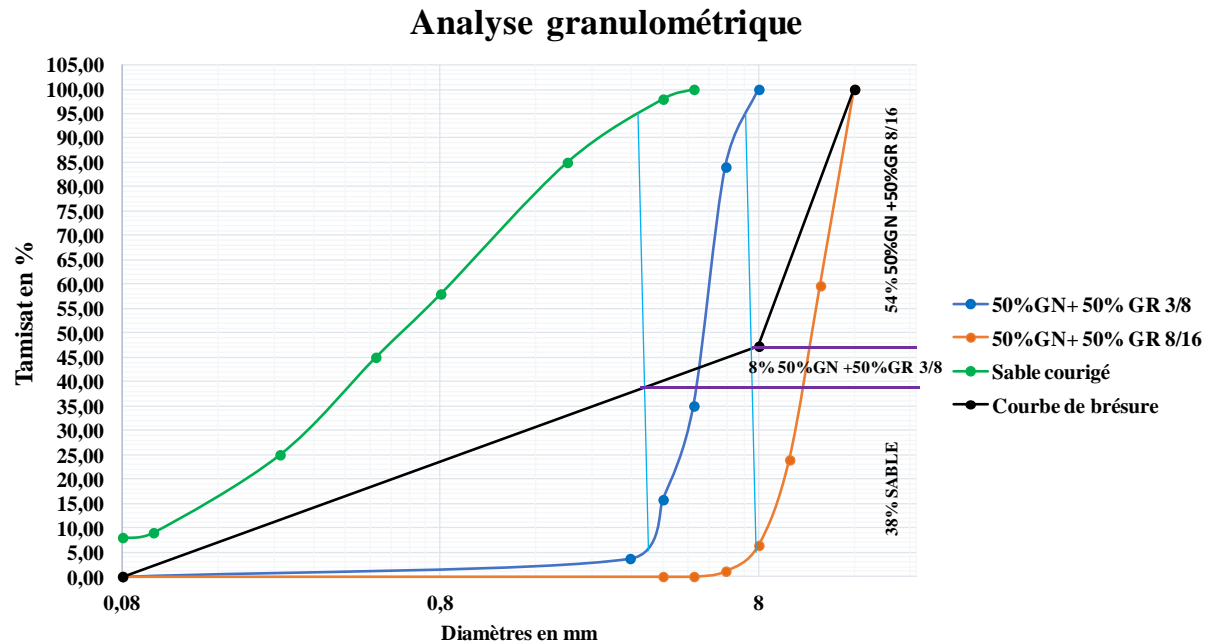


Figure II. 9 : Granulométrie du sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/16 et la courbe brisée.

On prend les pourcentages et on détermine les volumes absolus des constituants du béton puis leurs masses (Tableau II. 10) :

% du sable=38% ; % du gravier 3/8= 8% ; % du gravier 8/16=54%

Tableau II. 10: Les volumes absolus des constituants du béton.

Constituants	C	SM	SC	G 3/8	G 8/16	Fine
Volumes pour 1 m ³ (L)	120.69	58.50	175.49	53.54	361.43	20.35

⇒ Les constituants d'un 1 m³ sont (tableau II. 11) :

Tableau II. 11 : Les constituants d'un mètre cube de béton ordinaire.

Constituants	C	E	SM	SC	G 3/8	G 8/16	Fine	Adjuvant 1%
Pour 1 m ³ (kg)	350	175	153.86	438.73	133.85	903.58	50.88	3.5

d. Comparaison des trois formulations

Tableau II. 12 montre les différentes compositions des bétons ordinaires à base des granulats naturels et recyclés.

Tableau II. 12 : La comparaison entre les trois formulations.

Matériaux	Pour 1 m ³ (kg)		
	100%GN	100%GR	50%GR+50%GN
C	350	350	350
E	175	175	175
SM	149.80	161.96	153.86
SC	427.18	461.83	438.73
G3/8	136.45	111.50	133.85
G8/16	978.47	833.62	903.58
Fine	49.53	53.55	50.88

II. 1. 4 PREPARATION DES EPROUVETTES

Les moules normalisé utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules normalisés en acier de forme prismatique (7x7x28 cm³) (Figure II-10).



Figure II.10 : Les moules prismatique en acier et en bois.

A la suite d'un pré mouillage et séchage de malaxeur (à axe verticale d'une capacité de 17 litres), les matériaux y sont mis du plus gros au plus fin granulat (graviers, sables), puis on introduit la quantité de ciment déterminée. Un malaxage à sec des différents constituants, (durée allant de 60 à 90 secondes). Puis en ajoutant progressivement les 2/3 de la quantité d'eau gâchage mélangée à l'adjuvant pendant 2 minutes. Introduire la partie restante d'eau (1/3) graduellement et malaxer pendant 2 minutes.

Le remplissage des moules a été fait en deux couches, après chaque couche, les moules ont été vibrés pendant 30 secondes à l'aide d'une table vibrante. Juste après, leurs vibrations, chaque moule a été couvert avec une feuille plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et

stocké dans l'ambiance du laboratoire. Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24 h après le coulage.



Figure II. 11 : Préparation des éprouvettes du béton.

II. 1. 5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des bétons ordinaires et bétons de graviers recyclés; puis nous avons déterminé les formulations des bétons utilisés en utilisant la méthode de Dreux-Goriss, cette méthode étant la plus utilisée pour la formulation des bétons et la plus facile à mener.

Chapitre 2 :

Méthodes expérimentales

II. 2. 1 INTRODUCTION

La formulation des différents bétons ordinaires s'est faite avec les mêmes matériaux et pour toutes les échéances.

La fabrication des bétons ordinaires a pu être réalisée sans problème avec des moyens conventionnels.

Pour avoir un béton conforme aux normes en vigueur, nous avons effectués des essais de caractérisation physique et chimique de ces composants.

Nous avons effectué des essais qui qualifient les différentes propriétés du béton :

- ✓ A l'état frais : estimer leur étalement au cône d'Abrams
- ✓ A l'état durci : procéder au suivi des propriétés mécaniques à différents échéanciers en mesurant les résistances à la compression et traction par flexion.

II. 2. 2 ESSAIS DE CARACTERISATION PHYSIQUES DES MATERIAUX

II. 2. 2. A Equivalent de sable (NF P18-598)

Le sable est un élément très essentiel qui joue un rôle très important dans la composition des bétons. Pour cela, il faut être vigilant dans le choix du sable qui répond aux normes. Ses caractéristiques doivent conduire à un béton de bonne qualité. Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables utilisés pour la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable, une procédure normalisée permet de définir un coefficient de l'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

L'essai est effectué sur fraction 0/5 mm du granulat. On a rempli l'éprouvette jusqu' au premier repère avec la solution lavante, puis on a introduit l'échantillon avec l'entonnoir donné des petits coups sur l'éprouvette afin de déloger les bulles d'air et laisser imbiber pendant 10 min. On ferme l'éprouvette et on secoue (90 cycles de 20cm de course dans le sens horizontal en 30 s) manuellement. On a ôté le bouchon rincé au-dessus avec la solution lavante. On a introduit ensuite le tube de laveur au fond de l'éprouvette et on a lavé pour la suspension des éléments argileux et attendu pendant 20min. On a mesuré à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette puis la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette (Figure II.

12). Puis on a appliqué la formule
$$ES = \frac{h_2}{h_1} * 100$$



Figure II. 12 : Essai d'équivalent de sable.

II. 2. 2. B Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

L'analyse granulométrique est la distribution en poids des particules solides d'un sol suivant leurs dimensions. Elle permet de différencier les sols entre eux, roche, gravier, sable, argile...etc.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (Figure II. 13), dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le tamisage des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis contenant l'échantillon.

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans le pratique, la masse utilisée sera telle que : $m \geq 0.2D$ avec M : masse de l'échantillon en **kg** et D diamètre du plus gros granulat exprimé en **mm**

En fonction de la dimension d/D des matériaux analysés, on utilisera la série de tamis préconisée par la norme **EN 933-2** ainsi que tous les tamis nécessaires à la couverture des dimension comprises entre **0.063mm** et **2 mm** pour les fillers, entre **0.08mm** et **2D** pour les sablons et les sables, et entre **0.63d** et **2D** pour les gravillons (**norme XP P 18-540**).

Le résultat de la granulométrie se traduit par une courbe dont l'ordonnée y représente le pourcentage de tamisâts passants, et l'abscisse x représente les ouvertures de tamis.



Figure II. 13 : Analyse granulométrique.

II. 2. 2. C Module de finesse (NF P18-304)

Le module de finesse est un nombre compris entre 1.8 et 3.3 qui caractérise la finesse des granulats du matériau.

Le module de finesse est défini selon la norme française [NFP 18-540] par le 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable. Lorsque MF est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier.

II. 2. 2. D La masse volumique apparente

La masse volumique apparente est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité volume, (pores et vides compris). Plus au moins poreux, elle est en Kg/m^3 g/cm^3 T/m^3 . Le symbole de la masse volumique est $\rho = \text{Mt} / \text{Vt}$.

La masse volumique est le synonyme moderne des expressions désuètes « densité absolue » et « densité propre », ou encore « masse spécifique ».

La masse volumique d'un liquide, d'un solide ou d'une pâte peut être déterminée avec un pycnomètre.

On a rempli un récipient dont on connaît le volume $V = 1\text{L}$ en granulat avec une hauteur de 10 cm entre la main et le récipient cylindre, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On racle le granulat avec une règle. On

pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient. La masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau (Figure II. 14).

Soit : M_1 : la masse du cylindre vide

M_2 : la masse du cylindre plein

V_T : le volume total intérieur du cylindre ($V = 1L$)

La masse volumique : $MV = (M_2 - M_1) / V_T$;



Figure II. 14: La masse volumique apparente

L'essai sera répété 3 fois pour la fiabilité des résultats pour chaque matériau.

II. 2. 2. E La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

Elle est déterminée ; pour les granulats ; à l'aide d'une éprouvette graduée (Figure II. 15). On remplit l'éprouvette en eau jusqu'au repère V_1 . On pèse une masse de granulat M puis on la verse dans l'éprouvette. On prend le nouveau volume (volume d'eau + granulat) V_2 . On calcule la masse volumique par la loi $\rho_s = M / (V_2 - V_1)$.



Figure II. 15 : Les masses volumiques absolues à l'aide d'une éprouvette graduée

Remarque :

On doit utiliser un liquide non réactif au ciment pour déterminer la masse volumique absolue du ciment ex : Toluène (méthyle benzène) ou Naphta lourd (white spirit). (Figure II. 16)

La masse volumique absolue du ciment a été déterminée selon la norme [NF P 18-555], par le pycnomètre de Le Chatelier et le benzène



Figure II. 16 : La masse volumique du ciment avec benzène

II. 2. 2. F Consistance du ciment (NF EN 196-3)

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. L'objectif est de définir une telle grandeur dite : **consistance normalisée**.

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

La consistance évaluée de cette manière sera appelée **consistance Vicat**.

Préparer 500g de ciment, une pâte de rapport E/C=0,25 (rapport de départ). Verser l'eau dans la cuve de malaxeur contenant le ciment.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec.
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse lente

Quatre minutes après le début de malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance d séparant l'extrémité de la sonde et la plaque de base. (Figure II. 17)



Figure II. 17 : Consistance de ciment.

II. 2. 2. G Temps de début de prise d'un ciment (NF EN 196-3)

On mesure l'enfoncement d'une aiguille de diamètre de 1.13 mm, fixée à la partie mobile de l'appareil de VICAT dont la masse totale est de 300 g, dans une pâte de ciment maintenue dans un moule tronconique. Lorsque l'aiguille s'arrête à une distance $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de la plaque de base plane, on dit qu'il y a le début de prise ; et lorsque l'aiguille avec l'accessoire annulaire ne s'enfonce plus que 0.5 mm par rapport au sommet du moule tronconique, on a atteint le temps de fin de prise.

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue évoluent dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée, la pâte reste plus au moins malléable, voire plastique, mais au bout d'un certain temps, le matériau devient de plus en plus difficile à travailler et sa température augmente : il fait prise et s'apparente à un solide. (Figure II. 18)

La quantité d'eau nécessaire à l'obtention de cette pâte est déterminée par des essais de consistance

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille.

On règle l'appareil de VICAT muni de l'aiguille par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle. Puis on relève l'aiguille en position d'attente. On prépare la pâte de ciment comme pour l'essai de consistance en introduisant la quantité d'eau déterminée pour la pâte de consistance normalisée. On introduit

rapidement la pâte dans le moule tronconique sans tassement excessif, le moule étant placé sur la plaque de base plane. On place le moule et la plaque de base dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT ; puis on abaisse l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte. On lâche l'aiguille sur la pâte et on note cet instant comme zéro. On note la distance d entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base plane. On nettoie l'aiguille après chaque pénétration. On renouvelle la mesure de d tous les 5 min jusqu'à obtention de $d=4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. On note le temps du début de prise.

En retournant le moule tronconique rempli sur la plaque de base plane et on place le moule inversé et la plaque de base plane dans l'axe de la sonde de l'appareil de VICAT. On abaisse l'aiguille avec précaution jusqu'à arrive au contact de la pâte. Puis on libère l'aiguille sur la pâte. On renouvelle la mesure de d tous les 5 min jusqu'à obtention du $d=0.5 \text{ mm}$. On note le temps de fin de prise.

Le temps de prise est égal à la différence du temps entre le début et la fin de prise.

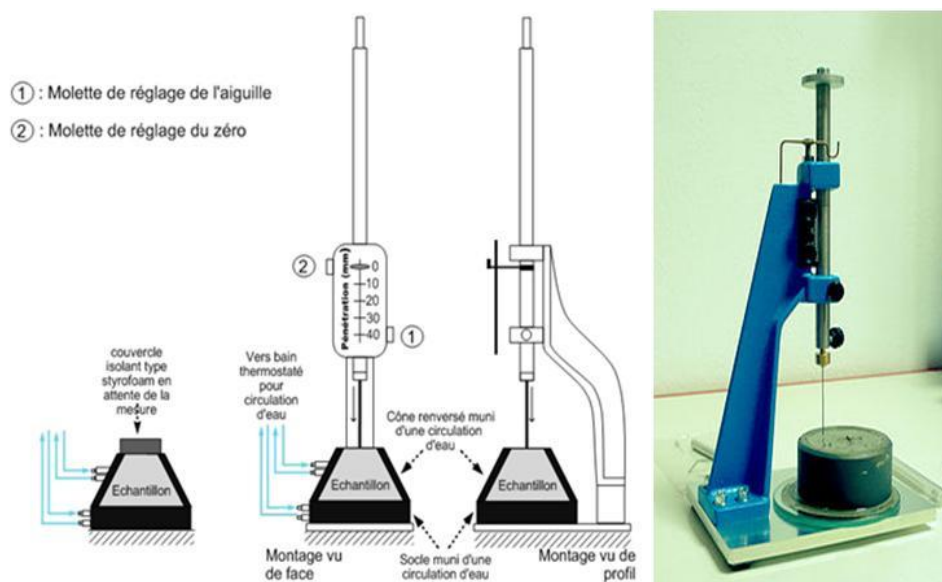


Figure II. 18 : Début et fin de prise

II. 2. 2. H Absorption des granulats recyclés (NF EN 1097-6)

La mesure du coefficient d'absorption des granulats recyclés a été réalisée en se basant sur le Protocole décrit dans la norme (NF EN 1097-6). Au préalable les échantillons sont étuves à $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur masse, constituant la masse sèche.

La **méthode du chiffon** est la seule méthode que nous présenterons puisque c'est la méthode utilisée dans le programme expérimental.

La **méthode du chiffon** (NF EN 1097-6) a été utilisée pour mesurer les quantités d'eau nécessaires à la pré-saturation des granulats recyclés (Figure II. 19) :

- On a pesé une quantité (M_s) des granulats recyclés des classes granulaires 3/8 et 8/16 après les avoir étuvés à 80°C, pour ne pas détériorer les constituants de la pâte de ciment durcie (notamment l'ettringite et les CSH)
- On a mis les granulats recyclés dans un pycnomètre et rempli d'eau.
- On a suivi l'absorption d'eau dans chaque intervalle de temps : **5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2h, 6h, 12h, 24h et 72 h**. Pour ces mesures, on étale les granulats récupérés du pycnomètre sur un tissu sec, on sèche les granulats en surface puis on les transferts sur un autre chiffon. On les laisse sécher à l'air libre jusqu'à ce que les films d'eau visibles disparaissent, et on note la masse (M_a).
- On calcule alors le taux d'absorption d'eau des granulats recyclés (A_b) par la relation suivante :

$$A_b\% = (M_a - M_s) / M_s \times 100 \quad (1)$$

Avec :

M_a = la masse de l'échantillon imbibé par l'eau (humide)

M_s = la masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 80 °C



Figure II. 19 : Le mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau par la méthode de chiffon

II. 2. 2. I Porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure est une technique d'investigation des milieux poreux. La méthode consiste à faire pénétrer le mercure dans les pores du matériau sous pression croissante. Le mercure est, vis à vis de la quasi-totalité des solides, un fluide non mouillant, c'est à dire qu'il ne pénètre pas spontanément dans la porosité comme le ferait l'eau par exemple. Ceci permet de contrôler l'injection au moyen de la pression. A mesure que la pression augmente, le mercure occupe des régions de plus en plus confinées de la porosité, remplissant des pores de plus en plus fins. Les appareils les plus puissants sur le marché permettent de faire varier la

pression de 3 kPa à 400 MPa, donnant accès aux pores dont la taille va de 400 nm à 6 micromètres environ.

Sans entrer dans le détail du fonctionnement des appareils, il faut indiquer quelques points importants pour l'interprétation des résultats obtenus. L'opération est pratiquée sur des échantillons de petite taille, typiquement centimétrique, qu'on introduit dans une cellule appelée pénétromètre (Figure II.16). L'échantillon peut se présenter sous différentes formes.

Il peut s'agir d'un fragment unique du matériau, ou de plusieurs fragments, ou de granulés, voire de poudre, dans la mesure où les particules composant la poudre sont elles-mêmes poreuses et la taille des pores comprise dans la gamme de l'appareil.

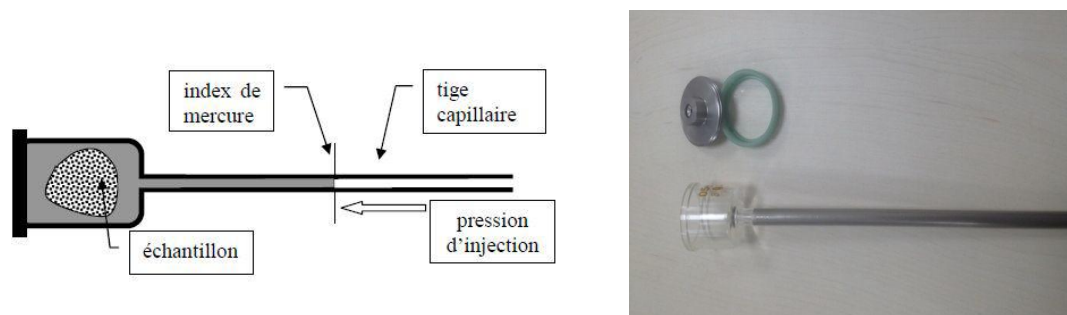


Figure II. 20: Pénétromètre

L'échantillon préalablement séché est placé dans le *pénétromètre* (Figure II.20). Un vide poussé est ensuite établi. C'est la raison pour laquelle l'échantillon doit être sec, car la pression lors de la mise sous vide est en principe inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau. Lorsqu'on veut opérer sur un échantillon incomplètement séché, il faut modérer la mise sous vide. Le mercure est ensuite introduit dans le pénétromètre à basse pression, puis la pression est augmentée progressivement palier par palier. A chaque palier de pression, le volume qui pénètre dans les pores est mesuré après stabilisation. En effet, la pénétration n'est pas instantanée, et les porosimètres sont équipés d'un dispositif de régulation de la pression jusqu'à stabilisation à la valeur de consigne. Le volume de mercure pénétré est mesuré au moyen de la position du ménisque dans la tige capillaire du pénétromètre. Il est poussé par de l'air pour les pressions comprises entre la pression de remplissage et la pression atmosphérique ambiante, puis par de l'huile.

En faisant l'hypothèse de pores cylindriques, on peut relier la pression d'injection au rayon des pores accessibles par l'équation de Washburn (Laplace) :

$$r = \frac{2\sigma Hg \cos \theta}{PHg}$$

Où :

- r : rayon des pores remplis (m)
- σ_{Hg} : tension superficielle du mercure (N/m)
- θ : angle de contact du mercure sur le solide ($^{\circ}$)
- P_{Hg} : pression d'injection (Pa)

Les essais ont été réalisés à 20°C à l'aide d'un porosimètre à mercure AUTOPORE IV de Micromeritics qui peut détecter des pores jusqu'à 3nm (Figure II.21).

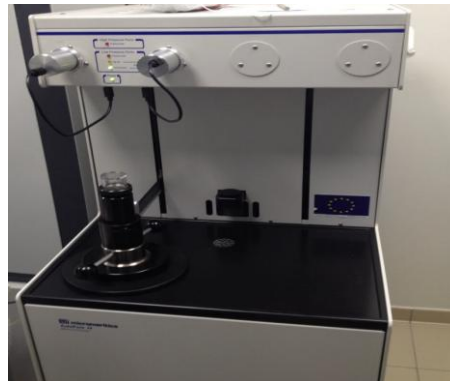


Figure II. 21: Porosimètre à mercure AUTOPORE IV de Micromeritics

Cet appareil nous permet d'avoir des informations très fiables concernant la distribution et la taille des pores. L'essai a été effectué à l'âge de 120 jours avec des pressions d'intrusion de mercure allant de 0.1 à 206 MPa. Les résultats sont ensuite combinés pour obtenir la distribution porale sur toute la gamme de rayons étudiés (3 nm à 100 μm). Préalablement à l'essai, les échantillons sont séchés en étuve à 50°C puis ramenés à température ambiante dans un dessiccateur.

II. 2. 3 TRAITEMENT DES GRANULATS RECYCLES

II. 2. 3. A Traitement des granulats recyclés par voie thermique

On a traité les granulats recyclés par la méthode thermique, en suivant ces étapes :

- Un échantillon global recyclé a été préparé, après avoir éliminé toutes sortes d'impuretés
- L'échantillon est séché dans un moufle à une température de 500 ° C pendant deux heures, pour obtenir l'évaporation de l'eau incluse dans les pores du mortier, en augmentant la température de 25°C par minute jusqu'au palier désiré.
- On laisse le four refroidir pour qu'on puisse les sortir du four.

- Le stockage des granulats recyclés se fait dans des sacs hermétiques.



Figure II. 22: Traitement thermique des granulats recyclés.

II. 2. 3. B Traitement des granulats recyclés par la pâte de ciment

Prendre une quantité des graviers recyclés (de classe 3/8 et aussi 8/16) et les verser dans une pâte de ciment fluide d'un rapport E/C=0.4 et une consistance de 40 mm. Malaxer à l'aide d'un malaxeur ensuite séparer les grains les uns des autres puis mettre ces granulats sur un grillage en plastique et les laisse sécher. Lorsque les granulats seront secs et durcis, on les stocke dans des sacs.



Gravier recyclé 8/16 après traitement.

Gravier recyclé 3/8 après traitement.

Figure II. 23 : Traitement des granulats recyclés de classe 3/8 et 8/16.

Les compositions fixées au chapitre 1 de la partie 2 nous ont facilité la tâche pour finaliser la composition définitive pour les deux types de bétons.

La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien lubrifier afin de faciliter le décoffrage.
- Vérifier que les matériaux sont bien séchés.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super plastifiant est ajouté dans le tiers de l'eau de gâchage.
- Introduire les matériaux dans le malaxeur pré humidifié.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 1 minute.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première quantité d'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant), et mélanger pendant 2 minutes.
- Introduire la partie restante d'eau graduellement et malaxer pendant 2 minutes.

Nous avons fixé un dosage minimum en adjuvant, après malaxage (Figure II. 23) nous vérifiâmes la composition si elle répondait bien aux critères de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams pour les BO. Dans le cas contraire, on ajuste le dosage du super plastifiant et on reprend l'essai.

II. 2. 3. C Traitement des granulats recyclés par résine

On a pris une quantité de granulats recyclés et on les immergé dans la résine obtenue par le mélange de deux composant (1/3 de durcisseur et 2/3 de la résine). Les granulats sont mis sur un grillage plastique pour sécher. Une fois les granulats seront secs et durcis, on les sépare les uns des autres. Enfin, on les stocke dans des sacs.



Figure II. 24 : Traitement par résine

II. 2. 4 ESSAIS DE CARACTERISATIONS PHYSIQUES DES BETONS ORDINAIRES

II. 2. 4. A À l'état frais (Essais de cône d'Abrams (NF P 18 451))

La plaque d'appui et le moule fixé sur cette dernière sont légèrement humidifiés. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche. Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins, suivant sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté A, mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage (Figure II. 25).



Figure II. 25 : L'essai d'affaissement au cône d'Abrams

II. 2. 4. B Essais de caractérisations mécaniques des bétons

II. 2. 4. B. 1 Essai de traction par flexion par trois points

Il détermine la contrainte de traction par flexion σ_{tf} conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton. Il s'effectue sur les éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28) cm³. Les essais sont réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (figure II. 26). Ils sont élaborés au laboratoire de la pathologie LMPC de l'université de Mostaganem.

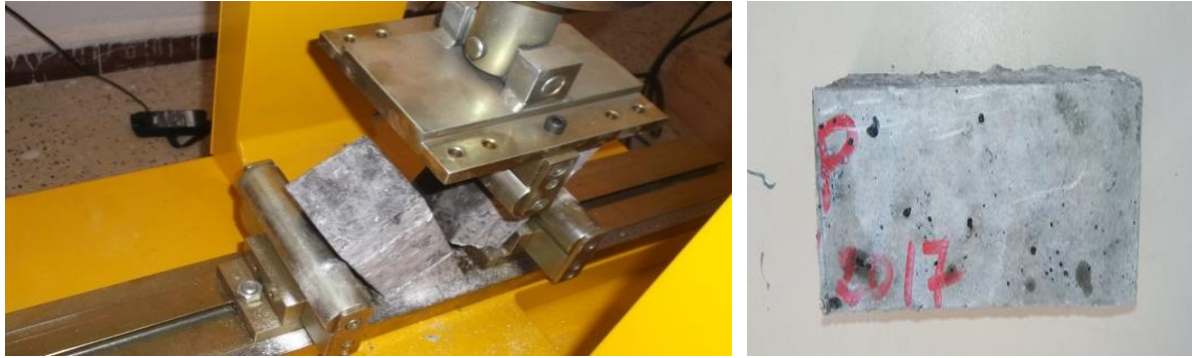


Figure II. 26 : Essai de traction par flexion.

II. 2. 4. B. 2 Essai de compression

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression σ_c conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton. Il s'effectue sur les deux parts des éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28) cm³ obtenues après la traction par flexion.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, asservie en force. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme [NF P 18-455]. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (figure II. 27).

Les essais d'écrasements en compression ont été effectués au laboratoire LMPC.



Figure II. 27 : Essai de compression.

II. 2. 5. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a défini les modes opératoires qui donnent les caractéristiques physiques des matériaux, la méthode de quantification d'eau absorbée par les granulats recyclés, les modes de malaxage et de coulage du béton. Nous avons aussi présenté les essais de caractérisation physiques et mécaniques des bétons ordinaires.

Partie III :

Analyse des Résultats

Chapitre 1 :

Résultats de pré-saturation des granulats recyclés

III. 1. 1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats des travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de notre recherche. Des interprétations seront émises sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons ordinaires. Pour montrer la meilleure méthode de confection des bétons à base de granulats recyclés, deux façons de travailler ont été mises au point, la première procédure concernera l'ajout de la quantité d'eau absorbée par les granulats lors du malaxage et la seconde, de pré-saturer les granulats recyclés avant de les introduire lors de malaxage, puis observer laquelle des deux méthodes permettant d'obtenir de bonnes caractéristiques des béton ainsi obtenus.

III. 1. 2 RESULTATS ET ANALYSE

III. 1. 2. 1 La pré-saturation des granulats recyclés

La méthode du chiffon a été utilisée pour mesurer les quantités d'eau nécessaires à la pré-saturation des granulats recyclés. La détermination des quantités d'eau absorbée s'est étalée jusqu'à 72 heures (4320 min) où l'on a observé une stabilisation de la masse des échantillons.

Les valeurs des variations des quantités d'eau absorbées par les deux classes granulaires de graviers recyclés de béton sont montrées ci-dessous :

Absorption d'eau

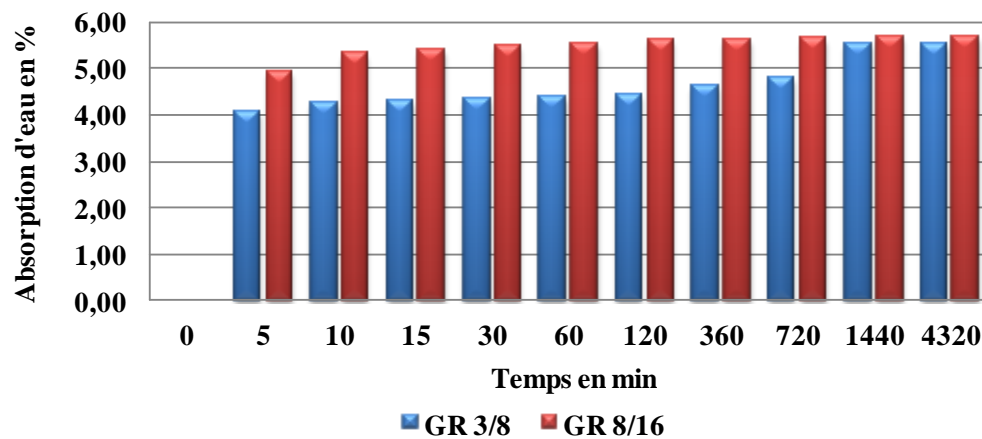


Figure III. 1 : Histogramme de l'absorption d'eau en fonction du temps

La figure III. 1 illustre les résultats des essais d'absorption d'eau par les granulats recyclés. On constate que l'absorption d'eau des granulats recyclés évolue de la même façon aussi bien pour les graviers recyclés GR 3/8 que pour les GR 8/16. Le diagramme d'évolution de l'absorption d'eau en fonction de temps montre que les granulats recyclés absorbent une quantité d'eau énorme dans les dix premières minutes ; les graviers recyclés saturent après 24 heures d'immersion dans l'eau. On remarque que les graviers 8/16 absorbent une quantité

d'eau supérieure à celle des graviers 3/8. Cela peut être dû au volume surfacique des granulats, le volume de la pâte entourant ces granulats étant supérieur à celui des granulats de diamètres inférieurs.

III. 1. 3 CARACTERISTIQUES DU BETON ORDINAIRE

III. 1. 3. 1 Caractérisation du béton ordinaire à l'état frais

Les résultats à l'état frais des bétons ordinaires concernent essentiellement les mesures de l'affaissement au cône d'Abrams. Les essais conventionnels ne faisant pas l'objet de ce travail, on s'est donc limité aux essais d'affaissement du cône d'Abrams pour les différentes formulations des bétons ordinaires (à base de 100% graviers naturels (GN), 100% de graviers recyclés (GR) et une combinaison de 50% graviers naturels et 50% de graviers recyclés).

BGN : Béton à base de 100% Granulats Naturels

B50% GN+ 50% GR : Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés

BGRS : Béton à base de 100% Granulats Recyclés Saturés

BGRNS : Béton à base de 100% Granulats Recyclés Non Saturés

a. Essai de cône d'Abrams (Norme NF P 18541)

Les essais ont été réalisés au laboratoire du Département de Génie Civil et Architecture de l'université de Mostaganem.

Tableau III. 1 : Résultats d'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Essai	Valeur	Classe
Béton ordinaire témoin (cm) (BGN)	12	S3
Béton (GR 50% + GN 50%) Saturé (B 50% GN+50% GR)	11	S3
Béton (100% GR) Saturé (BGRS)	10	S3
Béton (100% GR) Non Saturé (BGRNS)	28	S5

Le tableau III. 1 illustre les résultats d'essai d'affaissement au cône d'Abrams. Il est à noter que notre essai sur les bétons ordinaires (BO) est conforme aux normes.

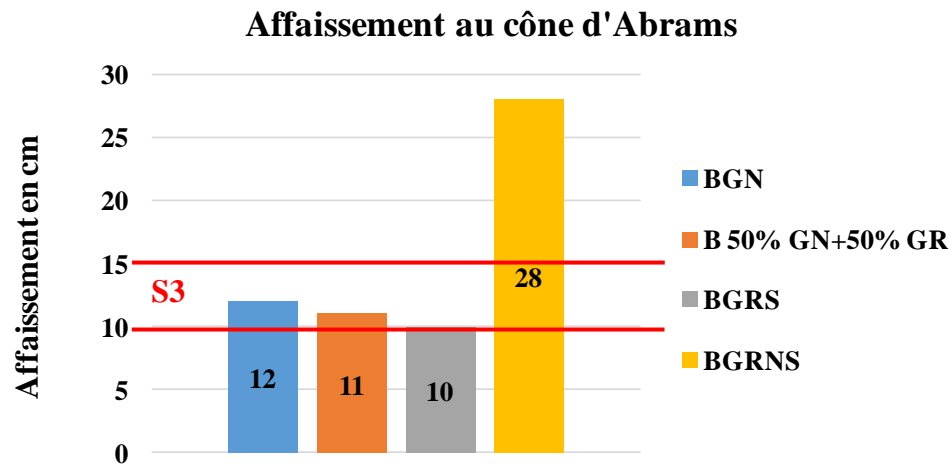


Figure III. 2 : L'affaissement au cône d'Abrams des bétons.

Le diagramme montre les affaissements des bétons à base des granulats naturels, recyclés et un mélange de 50% graviers naturels et 50% de graviers recyclés. D'après l'histogramme, on constate que le béton de 50% GR et 50% GN et le béton de 100% GR saturé sont des bétons très plastique par ce qu'ils ont un affaissement de classe S3 du même ordre que le béton témoin. Alors que le béton à 100% GR non saturé a un affaissement très fluide de classe S5 qui ne rentre pas dans la même classe que celle du béton témoin.



Figure III. 3 : Apparence des bétons à l'état frais

a) On a ajouté une quantité d'eau absorbé par les graviers au cours de malaxage → on a remarqué un excès d'eau lors de malaxage.

b) On a pré-saturé des graviers 24 H en avance puis on les introduire dans le béton.

III. 1. 3. 2. Caractéristique du béton à l'état durci

Les résistances ont été mesurées à 2, 7, 14 et 28 jours selon la norme européenne EN 206-1

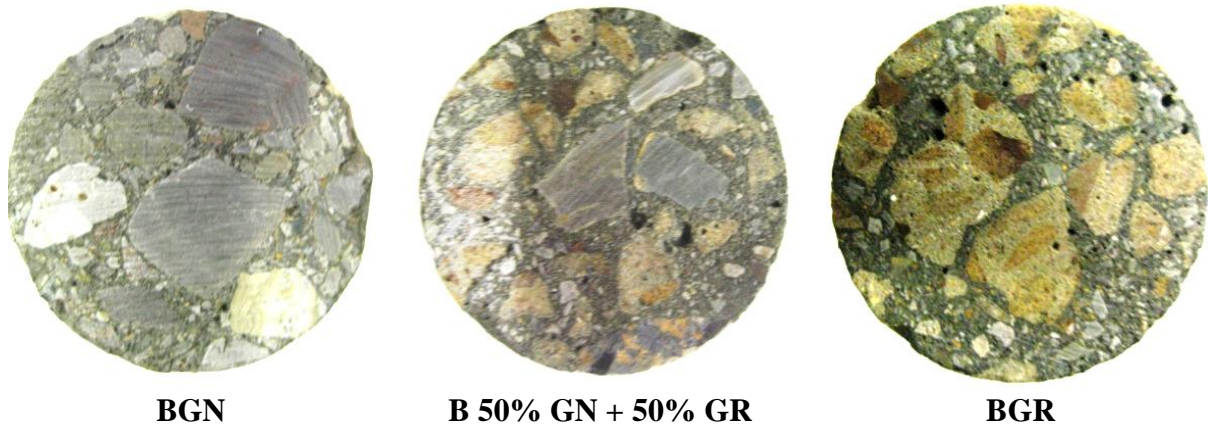


Figure III. 4 : Apparence des bétons à l'état durcie

La figure III.4 montre clairement la différence d'aspect de surface de chaque béton. Le BGN a une surface compacte et une faible porosité. Cependant, le B 50% GN+ 50% GR a un minimum de pores mais les petits agrégats remplissent bien les vides. Le BGR a plusieurs pores mais il est plus dense que les autres.

a. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée sur des demi-épreuves obtenues après l'essai de traction par flexion (si celles-ci ne sont pas endommagées). Ces mesures ont donc été effectuées sur six (06) demi-épreuves. La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance à la compression.

Tableau III. 2 : Résultats des mesures des résistances à la compression en fonction de temps des bétons ordinaires.

	Résistance en compression en MPa			
	2j	7j	14j	28j
BGN	22,35	27,01	33,67	40,05
B 50% GN+ 50% GR	15,9	25,03	28,64	33,07
BGRS	12	24,15	27,59	31,68
BGRNS	8,67	17,92	21,93	25,59

Les figures III. 5 et III. 6 ci-après présentent respectivement, les courbes de résistances à la compression et leur évolution, par rapport au témoin, des bétons à différents pourcentages des granulats recyclés.

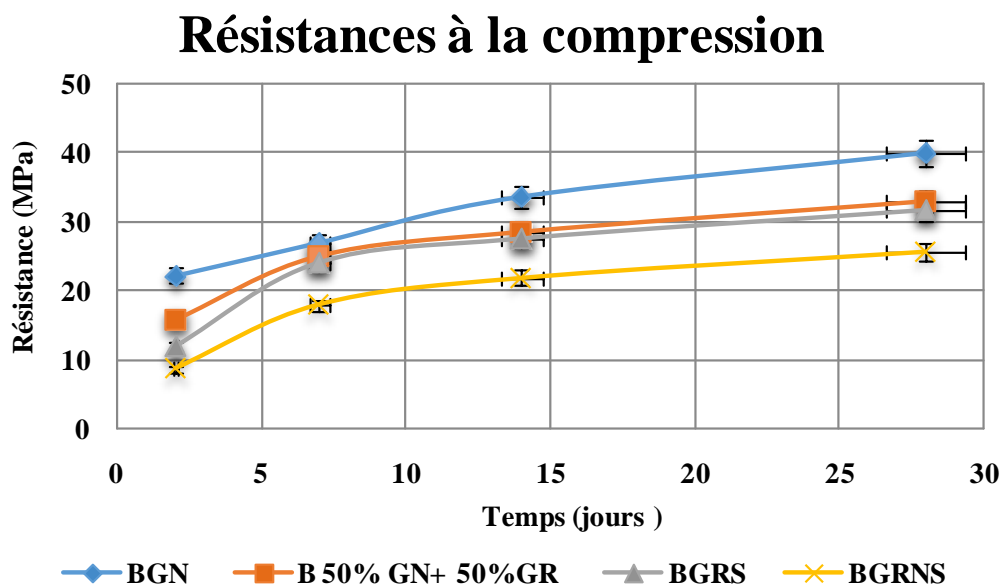


Figure III. 5 : Courbe de résistances à la compression des différentes éprouvettes.

A première vue, toutes les résistances augmentent en fonction du temps, c'est-à-dire en fonction de la maturité du béton.

A toutes les échéances et jusqu'à 28 jours de durcissement, toutes les résistances évoluent de la même façon. La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de granulats recyclés du béton à 2, 7, 14 et 28 jours. La résistance la plus faible a été observée pour les bétons confectionnés à base de granulats recyclés non saturés (la quantité d'eau initialement absorbée et mesurée a été injectée lors du malaxage) ceci peut être expliqué par l'évaporation de la quantité d'eau ajoutée lors du malaxage du béton qui crée des pores dans le béton. Par ailleurs, le béton témoin présente de bonnes résistances à la compression et supérieures à celles des autres bétons. Seuls les bétons confectionnés avec des graviers recyclés non saturés se distinguent du lot et présentent des résistances légèrement plus faibles. Les autres résistances avoisinent celles du béton témoin aux jeunes âges. Au final, les bétons confectionnés à base de granulats recyclés ont développé des résistances d'au moins 25 MPa à 28 jours, qui se valent très acceptables comme bétons pour structures courantes.

Les bétons avec des granulats recyclés pré-saturés représentent des évolutions de résistances intéressantes par rapport aux bétons avec des granulats non saturés, ce qui signifie que pour assurer une bonne utilisation des graviers recyclés dans les bétons ordinaires, il est préférable de les pré-saturés initialement parce qu'ils ont développé des meilleures résistances que les bétons à base de granulats non saturés.

Afin de connaître les différences entre ces résistances, nous avons établi la figure III. 6 ci-dessous représentant l'évolution des résistances des différentes formulations des bétons

ordinaires à base des graviers recyclés par rapport aux bétons de références (confectionnés à 100% de graviers naturels).

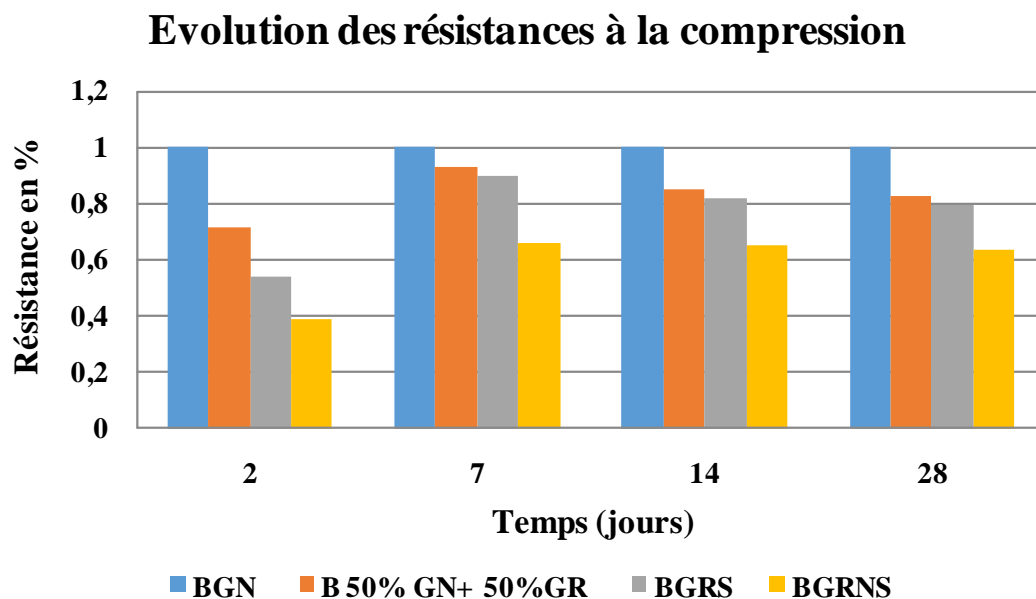


Figure III. 6 : Histogramme de l'évolution des résistances à la compression.

De cette figure, apparaît clairement que le béton de 50% GR et 50% GN et le béton de 100% GR saturé ont présenté des évolutions intéressantes qui avoisinent les 80% des résistances des bétons de référence à 28 jours. Seuls les bétons à base de 100% GR non saturés se sont démarqués avec leurs faibles évolutions à différentes échéances. Ceci peut être expliqué par l'évaporation de la quantité d'eau ajoutée lors du malaxage du béton et qui crée des pores dans le béton.

En effet, les éprouvettes confectionnées avec un mélange de 50% GR et 50% GN initialement saturés ont présenté des évolutions de résistances intéressantes par rapport aux autres bétons, ce qui signifie que cette façon de faire est la plus appropriée.

b. Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été mesurée sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ jusqu'à l'échéance de 28 jours. La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance moyenne à la compression.

Le tableau III. 3 présente les valeurs des résistances à la traction par flexion (MPa) des différents bétons en fonction du temps.

Tableau III. 3 : Valeurs des résistances à la traction par flexion

	Résistance à la traction par flexion en MPa			
	2j	7j	14j	28j
BGN	4,04	5,03	6,23	7,58
B 50% GN+ 50% GR	3,67	4,53	5,44	6,54
BGRS	1,99	3,65	4,7	5,36
BGRNS	1,29	2,86	3,87	4,93

La figure III. 7 ci-dessous présente les résistances à la traction des différentes éprouvettes élaborées pour les bétons à base de graviers recyclés avec des taux différents en plus de celles du béton témoin à différentes échéances.

Résistances à la traction

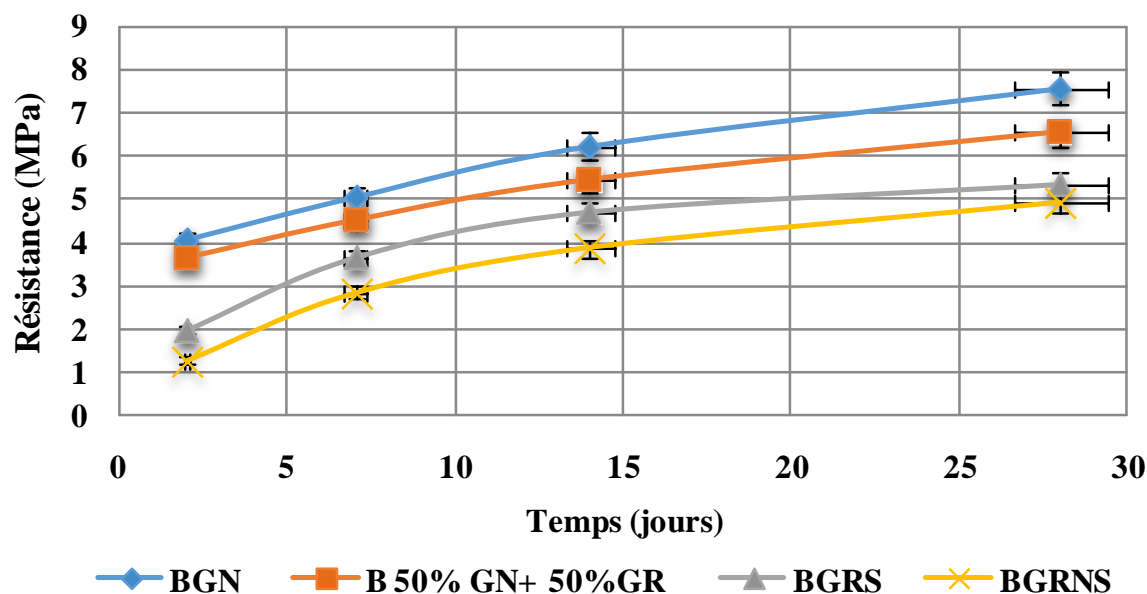


Figure III. 7 : Courbe de résistance à la traction des différents bétons.

De la figure III. 7, on remarque clairement que toutes les résistances ont évolué de la même façon et d'une façon similaire à celles du béton témoin à base 100% graviers naturels. On constate aussi une augmentation régulière des résistances à la traction par flexion des différents bétons avec l'âge (2, 7, 14 et 28 jours).

La figure III. 8 suivante représente l'évolution des résistances par rapport au béton de référence.

Evolution des résistances à la traction

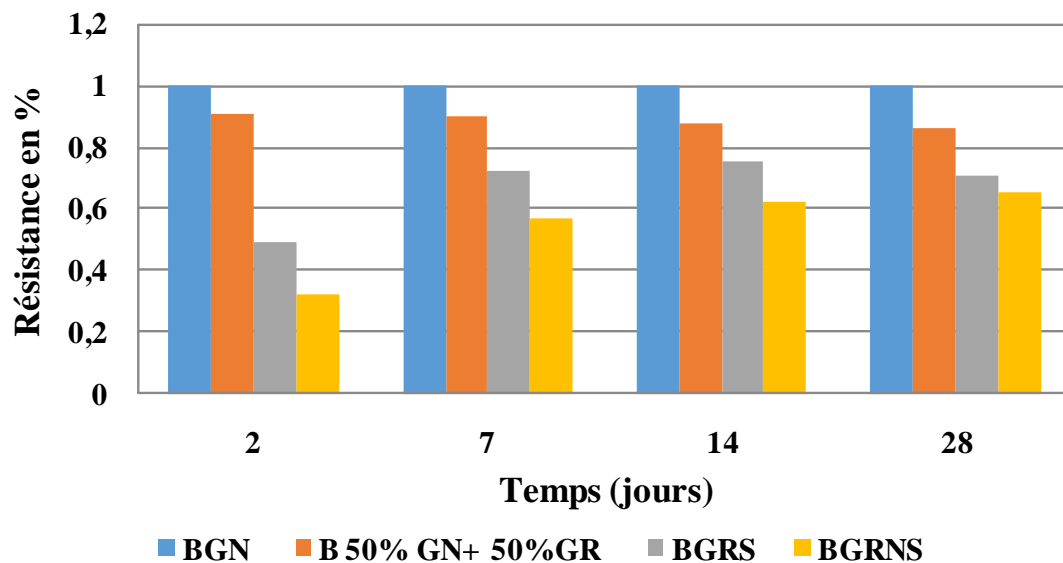


Figure III. 8 : Histogramme de résistance à la traction des différents bétons.

A part les bétons à base de 100% graviers recyclés saturés ou non saturés qui représentent des valeurs faibles, les bétons élaborés avec un mélange des graviers naturels et recyclés initialement saturés présentent des évolutions assez intéressantes puisqu'ils ont produit des résistances très proches (proches de 90 %) de celles du béton témoin.

III. 1. 4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons effectué des essais sur le béton ordinaire à l'état frais et à l'état durci. Nous avons aussi comparé et commenté les résultats trouvés, en constatant que le béton à base de mélange de 50% GR et 50% GN initialement saturés est la meilleure façon de procéder pour assurer une bonne formulation du béton ordinaire à base de granulats recyclés issus des bétons de démolition. Le béton à base des graviers recyclés non saturés a donné les résistances les plus faibles. Pré-saturer les graviers recyclés et les introduire dans le béton est recommandé pour obtenir des bétons ordinaires performants.

Chapitre 2 :

Résultats des traitements des granulats recyclés

III. 2. 1 INTRODUCTION

Les granulats recyclés ont la propriété d'absorber une importante quantité d'eau, c'est ce qui a été constaté dans le précédent chapitre. Pour palier cet inconvénient, nous avons procédé aux traitements des granulats par trois procédés, les plus connus et inspirés de la littérature. Il s'agit du traitement thermique des granulats recyclés, du traitement par pâte de ciment et enfin, du traitement à la résine. Le but principal de ces traitements est de diminuer la porosité de ces granulats en essayant de diminuer les diamètres et les volumes des pores. Ce chapitre présente les résultats des travaux expérimentaux réalisés. Des interprétations claires seront émises sur les propriétés des granulats avant et après traitement et les résistances mécaniques des bétons ordinaires.

III. 2. 2 LES GRANULATS RECYCLES TRAITES PAR LA VOIE THERMIQUE

GN : Granulats Naturels

GR : Granulats Recyclés Avant traitement

GR-T : Granulats Recyclés Après traitement thermique

III. 2. 2. 1 Masse volumique absolue

Les masses volumiques des granulats utilisés ont été mesurées et présentés au tableau III.4

Tableau III.4 : La masse volumique absolue des granulats naturels et recyclés avant et après traitement thermique

	GN (g/cm³)	GR (g/cm³)	GR-T (g/cm³)
Granulats 3/8	2.62	2.37	2.38
Granulats 8/16	2.66	2.34	2.50

A première vue, les masses volumiques des granulats naturels sont caractéristiques de la calcite, ils sont de nature calcaire. Celles des granulats recyclés avant et après traitement sont équivalentes pour la classe 3/8 et légèrement différente pour la classe 8/16. Le traitement thermique a donc peu d'influence sur la modification de la masse volumique absolue.

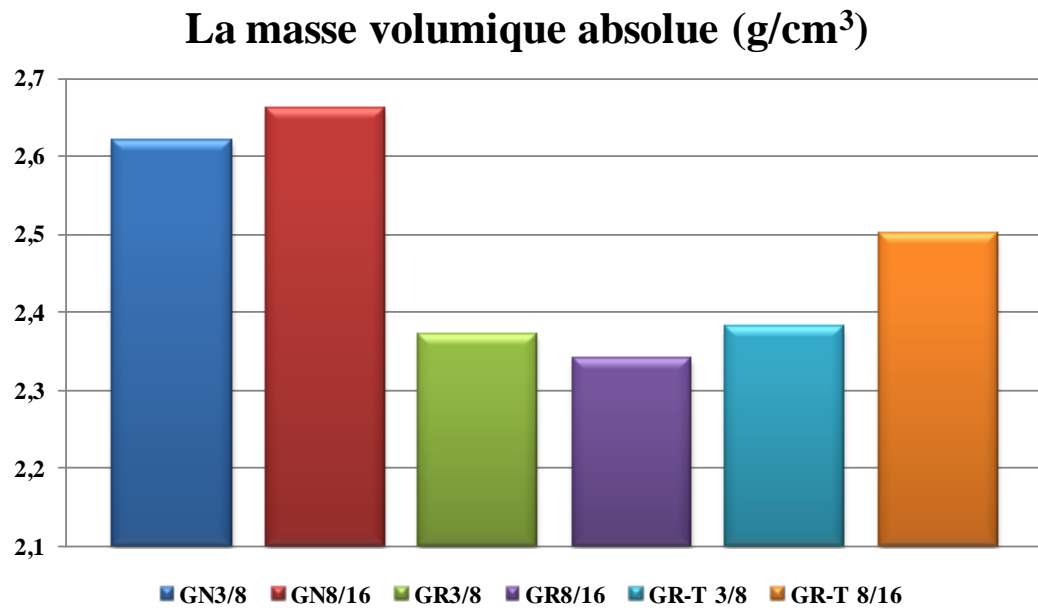


Figure III.9 : Histogramme de variation des masses volumiques absolues avant et après traitement thermique

On observe que la masse volumique absolue des granulats recyclés traités a augmenté légèrement pour la granulométrie 8/16. Cette augmentation serait essentiellement due à la diminution du volume des granulats (granulats légèrement rétrécis) après traitement thermique.

III. 2. 2. 2 Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes ont aussi été mesurées et les valeurs trouvées sont données par le tableau III.5.

Tableau III. 5 : La masse volumique apparente des granulats naturels et recyclés avant et après traitement thermique

	GN (g/cm ³)	GR (g/cm ³)	GR-T (g/cm ³)
Granulat 3/8	1.69	1.41	1.44
Granulat 8/16	1.70	1.42	1.41

Comme pour les masses volumiques absolues, les masses volumiques apparentes des granulats recyclés avant et après traitement thermiques sont équivalents.

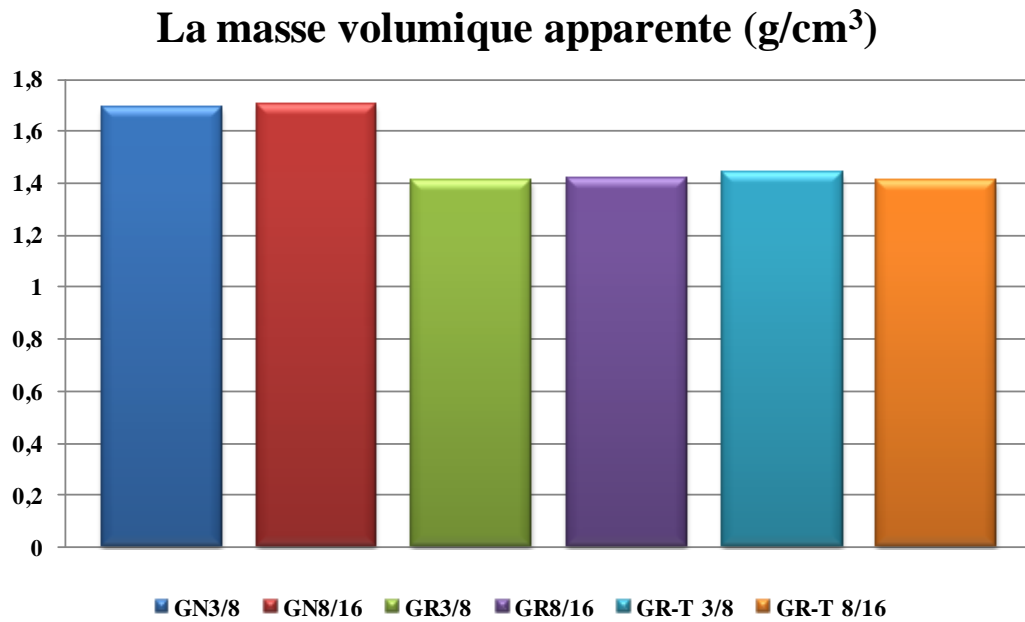


Figure III.10 : Histogramme de la masse volumique apparente avant et après traitement thermique

L'histogramme de la figure III.10 montre que la masse volumique apparente a été légèrement augmentée après traitement thermique pour les granulats recyclés 3/8, de 1,41 à 1,44 g/cm³. Pour les granulats 8/16, on remarque qu'il y a une légère diminution de la masse volumique apparente de 1420 Kg/m³ à 1410 Kg/m³.

III. 2. 2. 3 Absorption d'eau des granulats recyclés

L'absorption d'eau est un paramètre très important qu'il faut mesurer. Les mesures ont été effectuées sur les granulats recyclés avant et après traitement thermique pour se rendre compte de cet effet. Les résultats obtenus sont présentés au tableau III.6 et illustrés à la figure III.11.

Tableau III.6 : Absorption d'eau des granulats naturels et recyclés avant et après traitement thermique

	GN (%)	GR (%)	GR-T (%)
3/8	0.8	5.5	7.44
8/16	0.97	5.7	8.48

La figure ci-dessous représente les diagrammes de variation des quantités d'eau absorbées pour chaque type de granulat.

Absorption d'eau (%)

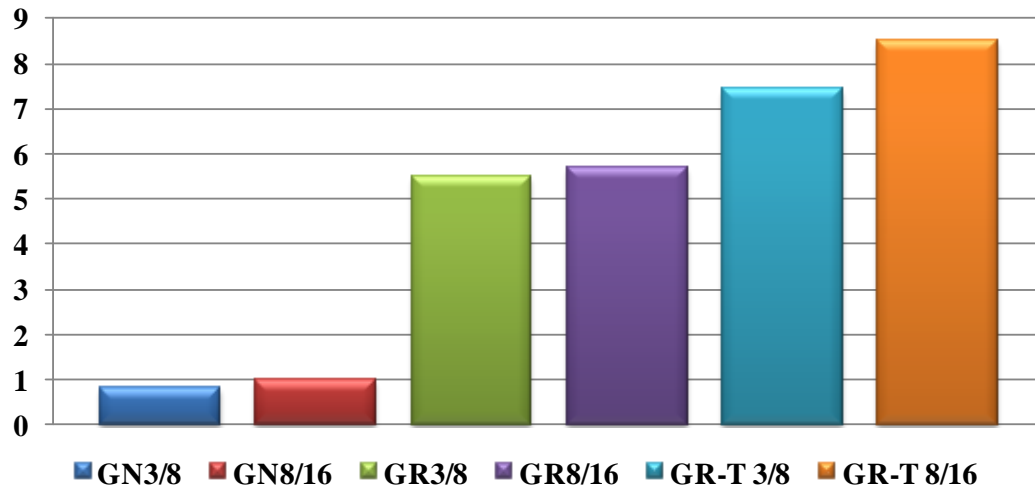


Figure III.11 : Histogramme de l'absorption d'eau avant et après traitement thermique

Il apparaît clairement d'après l'histogramme et le tableau que la quantité d'eau absorbée par les granulats recyclés après traitement est supérieure à celle d'avant traitement, une augmentation d'environ 35% pour les granulats 3/8 et de près de 47 % pour les granulats 8/16 a été enregistrée. Cela peut s'expliquer par une augmentation de la porosité apparente des granulats recyclés avec la montée de la température qui a atteint 500°C. En effet, le traitement thermique aurait provoqué l'évaporation des eaux que contenaient les granulats (humidité, eau liée, eau de constitution) laissant des vides supplémentaires. En plus des pores, des vides supplémentaires viennent s'ajouter et qui sont dus à la fissuration de l'ancienne pâte de ciment, cette fissuration s'explique par l'effet de la température (500°C). A cette température, il y a décomposition de la portlandite en chaux libre et endommagement de la pâte. On constate alors l'apparition de fissures clairement visibles à l'œil nu. Elles apparaissent principalement aux interfaces « pâte – granulat d'origine » et se propagent de façon radiale dans la matrice entre les granulats proches.

Selon Pliya [143] l'évolution de la porosité se fait en deux temps. La première phase, entre 60 et 300°C est liée à la perte d'eau liée. Au-delà de 300°C, l'augmentation de la porosité est causée par l'ouverture de fissures engendrées par les déformations thermiques incompatibles de la pâte et les granulats.

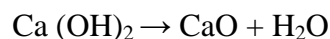
III. 2. 2. 4 Perte de masse après traitement thermique (Pm)

L'exposition des granulats recyclés à hautes températures entraîne une suite de dégradations au niveau microstructural qui conduisent à une perte de masse.

La perte de masse moyenne constatée après traitement thermique est de 3,4 %.

Au cours du chauffage (entre 30°C et 170°C), la masse globale des GR diminue en raison du départ de l'eau adsorbée liée et de la décomposition de certains de ses constituants comme le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Autour de 180°C et jusqu'à 370°C environ, on a comme première étape la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton. Ensuite, il y a des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques). Au-delà de 370°C jusqu'à 550°C, il y a décomposition de la portlandite en chaux libre:



III. 2. 2. 5 Analyse granulométrique

Il est nécessaire de procéder à une nouvelle analyse granulométrique après traitement thermique des granulats recyclés, puisque ce traitement a provoqué une diminution de la dimension des granulats due au rétrécissement de la pâte de ciment entourant les granulats, comme l'illustre les courbes de la figure III. 12.

Analyse granulométrique

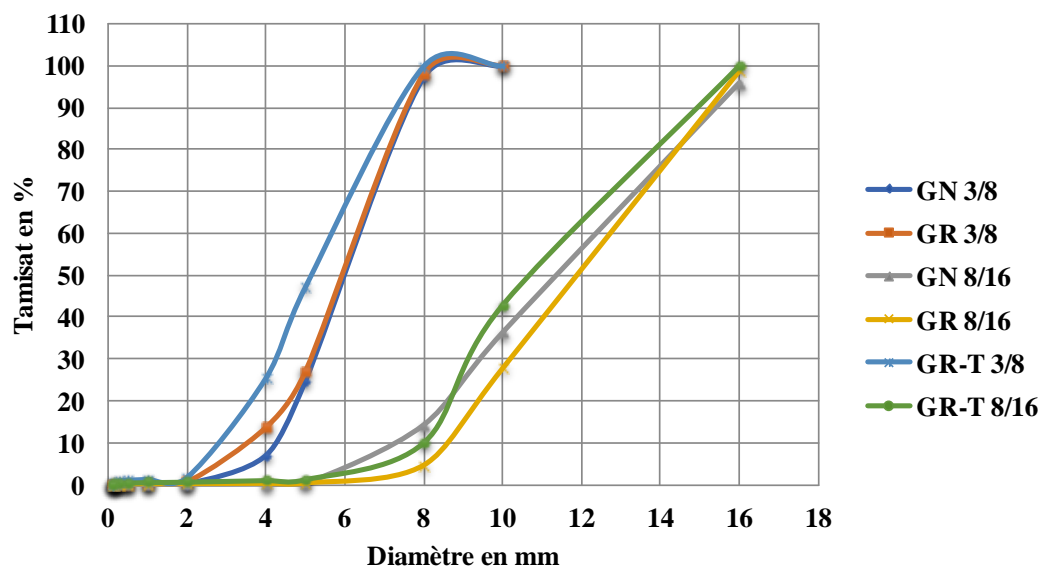


Figure III. 12 : Les courbes granulométriques des graviers naturels et recyclés (3/8 et 8/16) avant et après traitement thermique.

La lecture de ces courbes montre que les granulats recyclés traités thermiquement ont diminué de diamètre et ce pour les classes granulaires 3/8 et 8/16.

III.2. 2. 6 Affaissement au cône d'Abrams

BGN : Béton à base de 100% Granulats Naturels

BGR : Béton à base de 100% Granulats Recyclés

BGR-T : Béton à base de 100% Granulats Recyclés traité Thermiquement

B 50% GN+ 50% GR: Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés

B 50% GN+ 50% GR-T : Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés traité Thermiquement

Affaissement au cône d'Abrams (cm)

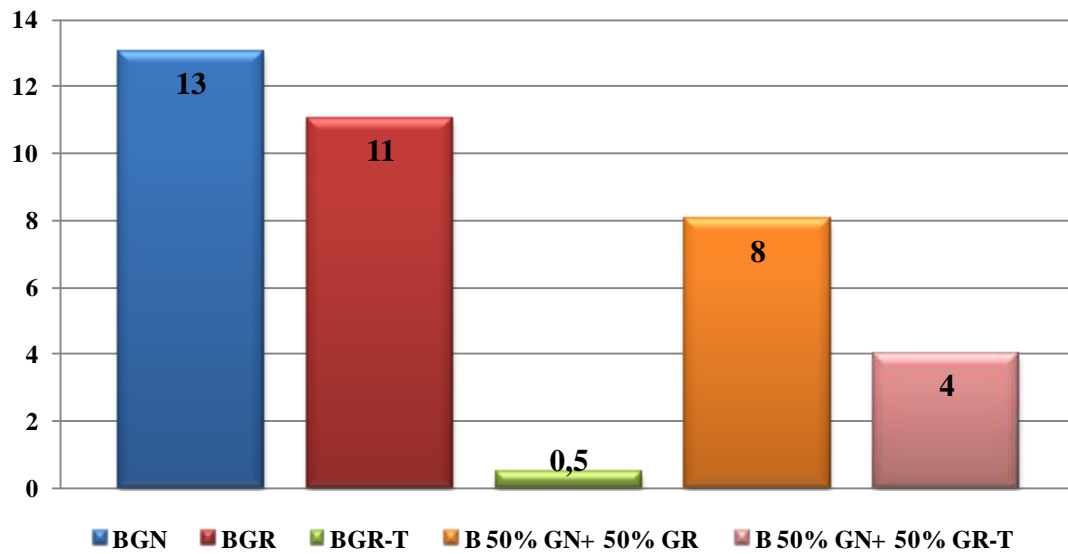


Figure III. 13 : L'affaissement au cône d'Abrams

L'histogramme montre que les bétons à 100% GN et 100% GR ont la même classe d'affaissement S3 (bétons très plastique). Les bétons à 100% GR-T et 50% GN+50% GR-T ont un affaissement de classe S1 (bétons fermes), alors que le béton à 50% GN+ 50% GR a présenté un affaissement de classe S2 (béton plastique).

III.2. 2. 7 Résistances mécaniques

III. 2. 2. 7. A Résistance à la compression

✓ Béton à 100% de granulats

La figure ci-dessous représente les variations des résistances mécaniques à la compression des différents bétons à base de 100% de granulats naturels (BGN), 100 % de granulats recyclés (BGR) et 100 % de granulats recyclés traités thermiquement (BGR-T).

Résistance à la compression

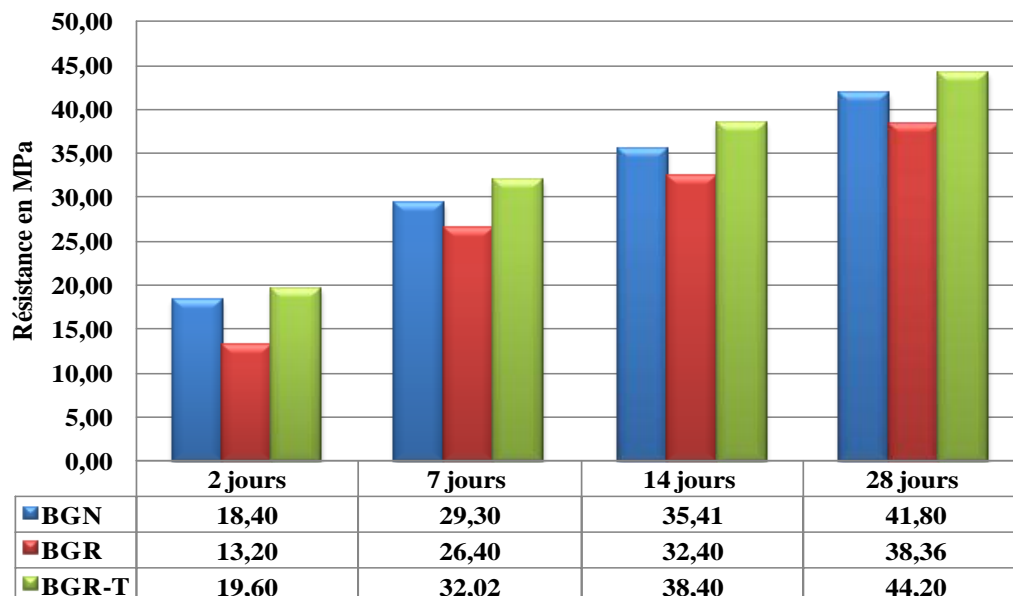


Figure III. 14 : Evolution des résistances à la compression des éprouvettes à différentes échéances.

La figure montre que le béton à 100% de granulats traités thermiquement présente des valeurs de résistances à la compression supérieures à celle des bétons témoins (BGN) et ce, à toutes les échéances. Seul le béton à base de 100% granulats recyclés non traité (BGR) se démarque avec sa faible évolution aux différentes échéances.

Ces mêmes variations sont représentées sous forme de courbes (Figure III. 15) pour faciliter les analyser.

Résistance à la compression

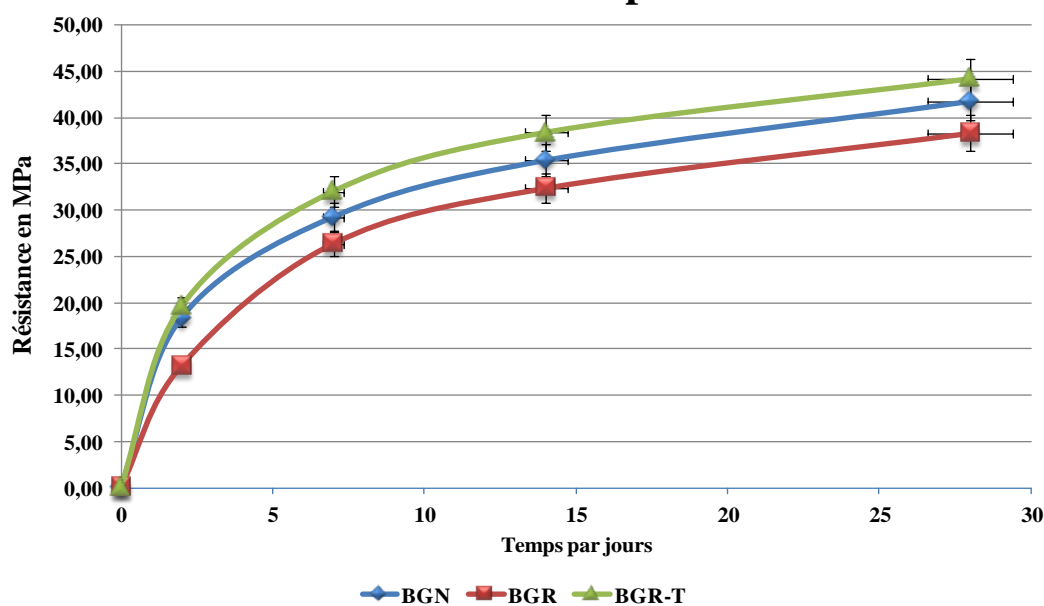


Figure III. 15 : Courbes de résistances à la compression des différents bétons à base de 100% granulats.

A première vue, toutes les résistances augmentent en fonction du temps, c'est à dire en fonction de la maturité du béton.

A toutes les échéances et jusqu'à 28 jours de durcissement, toutes les résistances évoluent de la même façon et avoisinent celles des bétons témoins à 100% GN (BGN). Cela veut dire que les résistances obtenues sont toutefois équivalentes à 5% d'erreurs. Le béton à 100% granulats recyclés non traités présente des résultats légèrement faibles à celles du béton à 100% granulats naturels et à 100% granulats recyclés traité thermiquement (BGR-T). Au contraire le béton à 100% granulats recyclés traité a des résistances les plus élevées. Ceci peut être expliqué par l'effet du faible affaissement sur les résistances mécaniques des bétons, ce qui est conforme aux travaux de M. DRISSI et al [144] et S.M.A. Boukli Hacene et al [145].

✓ Résistance à la compression à base de 50% des granulats recyclés

Les variations des résistances des bétons à base de 50% de granulats naturels et 50% de granulats recyclés (50 % GN- GR) puis 50% de granulats naturels combinés à 50 % de granulats recyclés traités thermiquement (50% GR-T), sont présentées dans la figure III.16.

Résistance à la compression

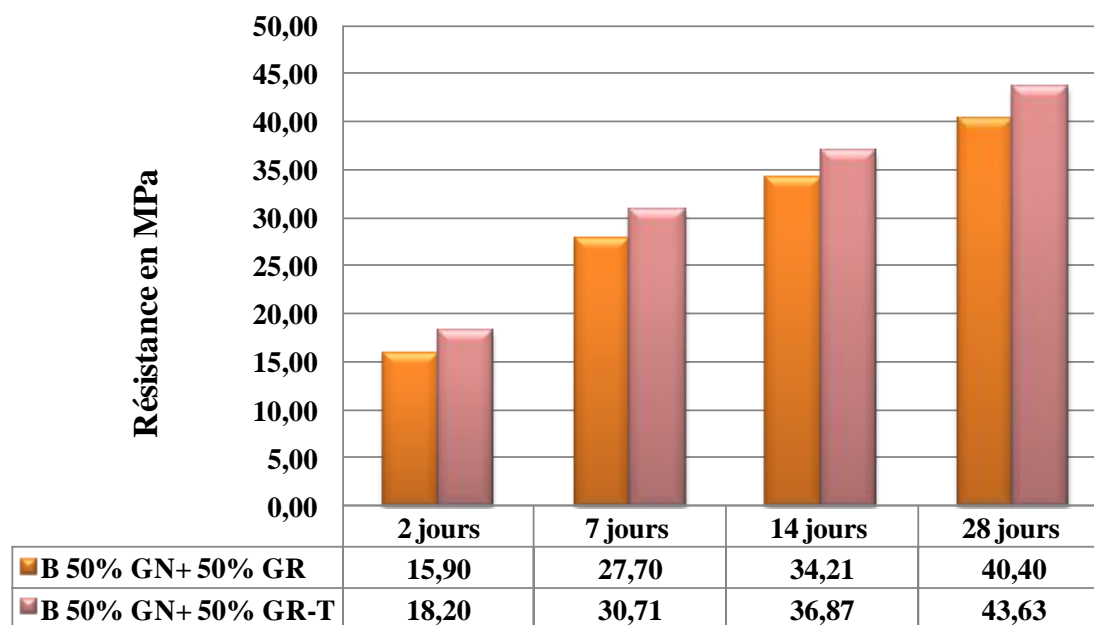


Figure III. 16: Histogramme des résistances à la compression de béton à 50% GR.

Les résultats obtenus ont été tracés sous forme de courbes pour plus de clarté et sont représentés dans la figure III.17.

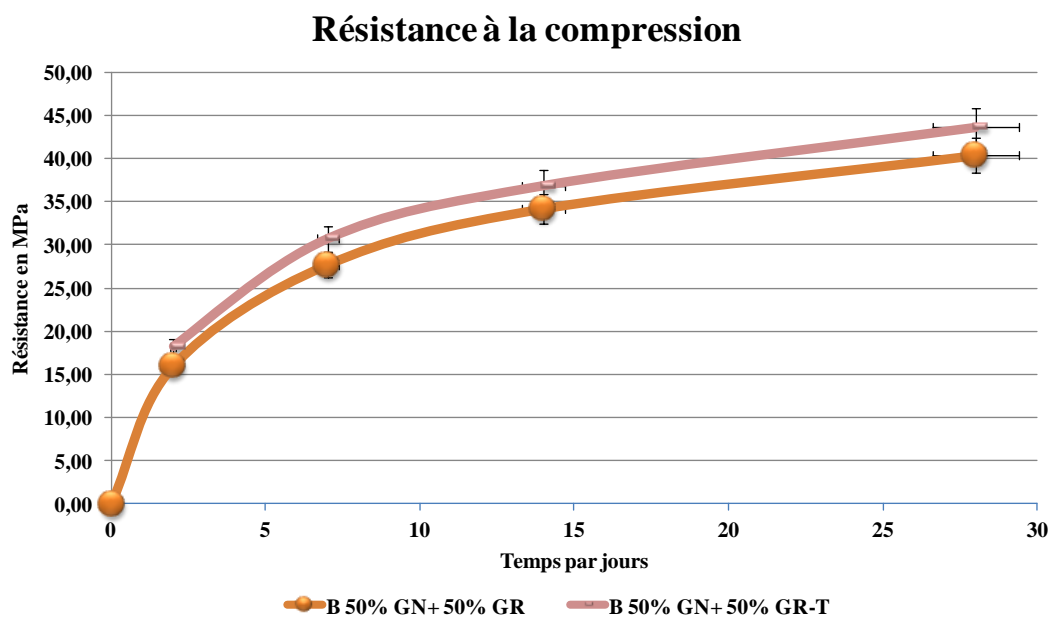


Figure III. 17: Les courbes de résistances à la compression des bétons à 50% GR.

De la figure III. 16 et figure III.17, on constate que les résistances des bétons à base de 50% des granulats recyclés traités et non traités évoluent avec une même cinétique et coïncident parfaitement à toutes les échéances. Les éprouvettes confectionnées avec 50% de granulats recyclés traités thermiquement (B 50% GN+50% GR-T) ont marqué des évolutions de résistances intéressantes par rapport aux bétons confectionnées avec 50% des granulats recyclés non traités, ce qui signifie qu'on peut remplacer un taux des granulats naturels par les granulats recyclés traités pour avoir des résistances équivalentes voire supérieures et pour contribuer à diminuer la quantité de déchet dans les zones de stockage et pouvoir ainsi préserver les ressources naturelles.

III. 2. 2. 7. B Résistances à traction

La résistance à la traction par flexion a aussi été mesurée sur les différentes éprouvettes jusqu'à l'échéance de 28 jours.

✓ **Résistance à la traction par flexion des bétons à base de 100 % granulats :**

La figure III.18 représente les variations des résistances à la traction des bétons composés de 100% de granulats naturels (BGN), de 100% de granulats recyclés avant traitement (BGN) et bétons avec 100 % de granulats recyclés traités à la température (BGR-T) en fonction du temps.

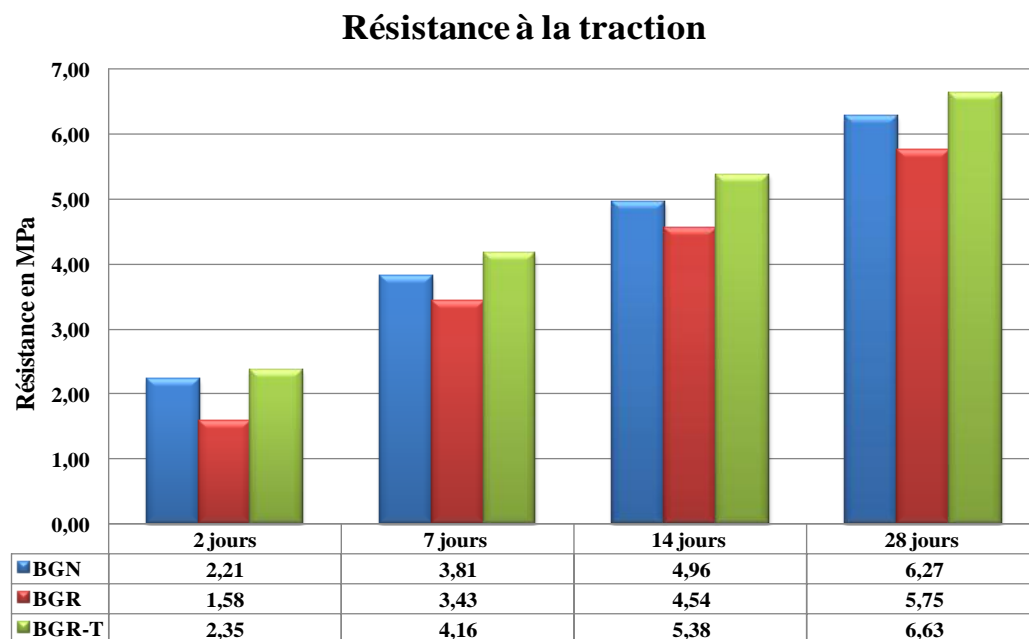


Figure III.18: Evolution de résistances à la traction des bétons à 100% de granulats.

La figure III.19 représente les mêmes résultats mais sous forme de courbes. Les résistances à la traction de tous les bétons évoluent de la même façon. Comme précédemment, les bétons à granulats traités thermiquement ont donné les résistances les plus élevées.

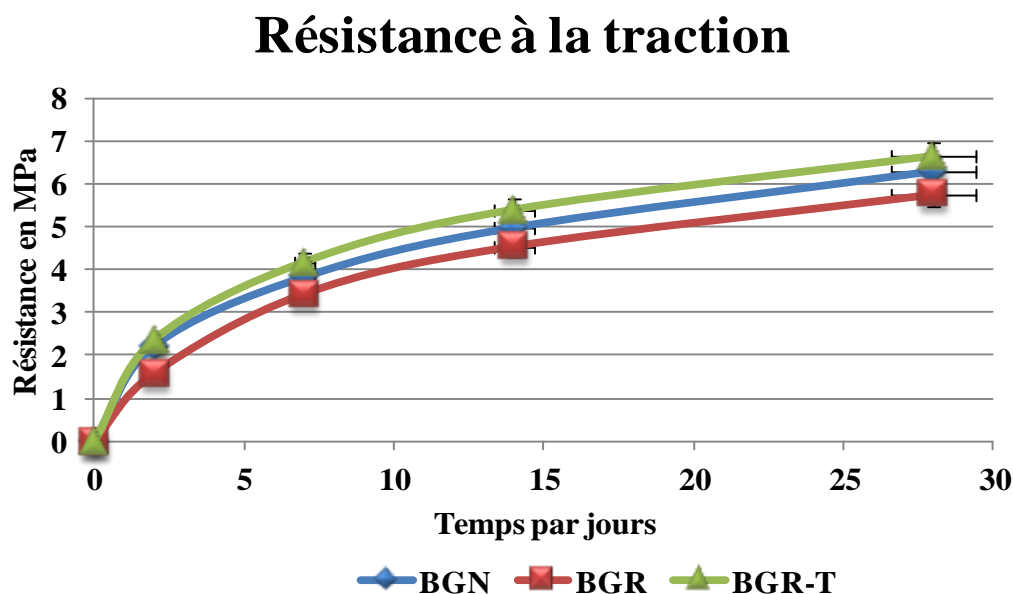


Figure III.19: Les courbes de résistances à la traction des bétons à 100% de granulats.

On a pu observer que les résistances à la traction coïncident parfaitement surtout entre les bétons de granulats naturels et ceux des granulats traités thermiquement et ce, jusqu'à 28 jours d'échéance.

Les résistances à la traction des bétons à base de 100 % de granulats non traités restent les plus faibles par rapport aux autres bétons, ceci serait dû à la fragilité de ces granulats et de la pâte qui les entoure qui résiste moins à l'arrachement et donc aux efforts de traction.

✓ Résistance à la traction par flexion des bétons à base de 50 % granulats

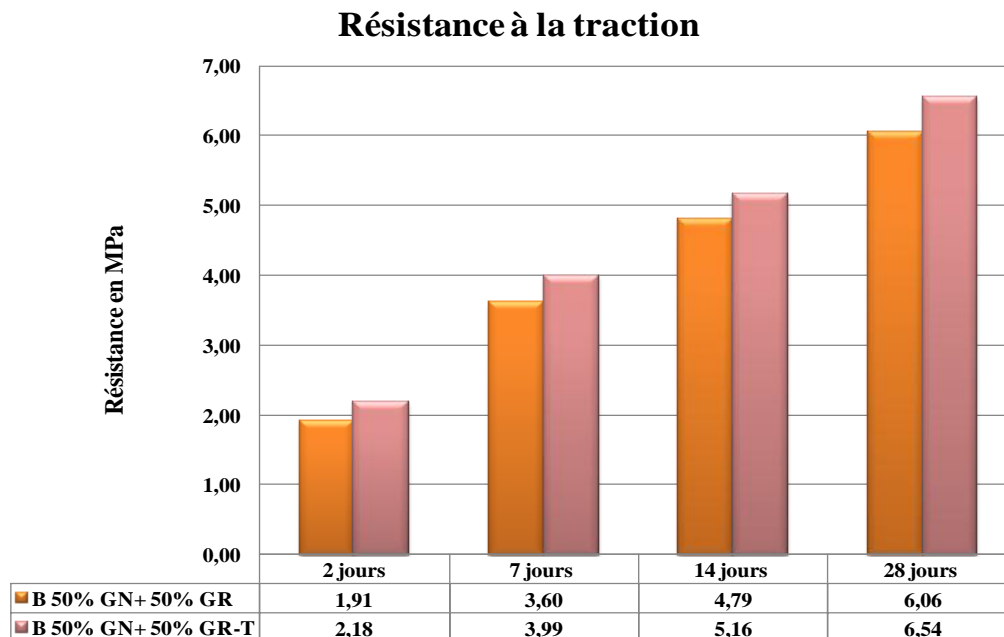


Figure III. 20: Evolution de résistances à la traction des bétons à 50% de granulats recyclés.

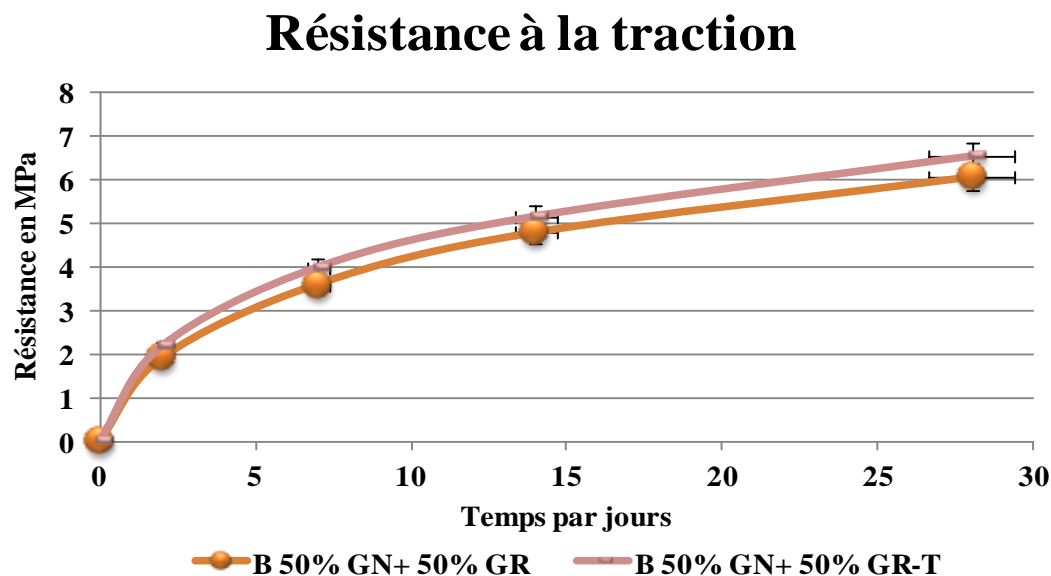


Figure III. 21 : Les courbes des résistances à la traction des bétons à 50% granulats recyclés.

Les courbes et l'histogramme de variation des résistances à la traction (Figure III.20 et III.21) montrent clairement que les résistances à la traction des bétons évoluent de la même façon et coïncident parfaitement en fonction du temps, mais les résistances des bétons (50 GR-T) à base de 50 % de granulats naturels et 50% granulats recyclés traités restent légèrement supérieures. L'utilisation de 50% de granulats traités par effet thermique n'a apporté aucun gain de résistances.

III. 2. 3 LES GRANULATS RECYCLES TRAITES PAR PATE DE CIMENT

Les deux classes granulaires 3/8 et 8/16 ont subi un traitement d'enrobage par la pâte de ciment. Il est clair que le dépôt d'une couche de ciment autour des granulats va modifier non seulement leurs diamètres mais aussi leurs masses. Pour cela, on a procédé aux mesures des différentes masses volumiques et quantités d'eau absorbées.

GN : Granulats Naturels

GR : Granulats Recyclés Avant traitement

GR-P : Granulats Recyclés Après traitement par pâte de ciment

III. 2. 3. 1 Masse volumique absolue

Les masses volumiques de l'ensemble des granulats utilisés ont été mesurées et les résultats sont présentés au tableau ci-dessous.

Tableau III. 7: Comparaison de la masse volumique absolue des granulats recyclés avant et après traitement par pâte de ciment.

	GN (g/cm ³)	GR (g/cm ³)	GR-P (g/cm ³)
Classe 3/8	2.62	2.37	2.63
Classe 8/16	2.66	2.34	2.63

Pour plus de clarté, les résultats sont présentés dans le diagramme de la figure ci-dessous.

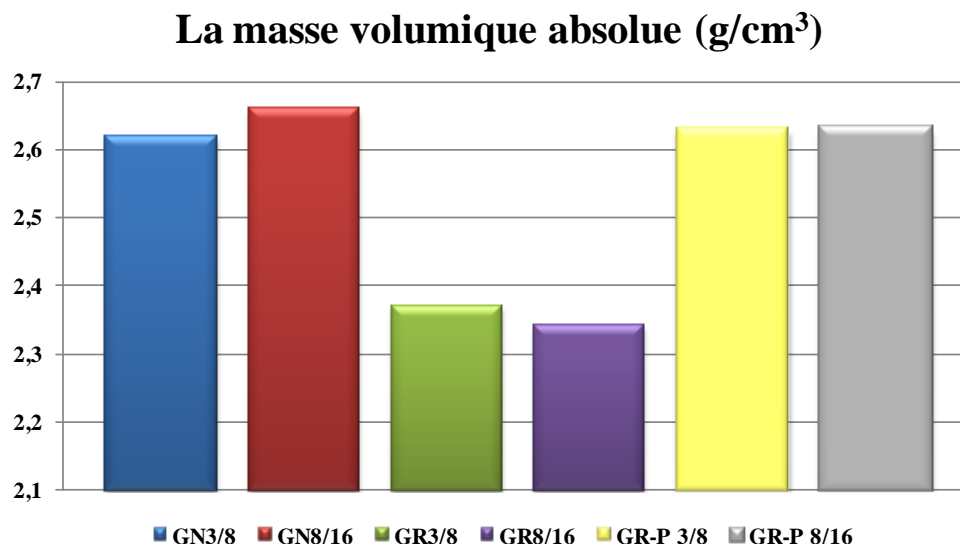


Figure III. 22 : Histogramme de la masse volumique absolue avant et après traitement par pâte de ciment.

On constate de la figure III.22 que la masse volumique absolue des granulats recyclés traités par pâte de ciment a augmenté pour la granulométrie 3/8 et 8/16. Cette augmentation serait essentiellement due à l'augmentation de la masse des granulats.

III. 2. 3. 2 Masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes ont aussi été mesurées et les valeurs trouvées sont données par le tableau III.8.

Tableau III. 8 : Comparaison de la masse volumique apparente des granulats recyclés avant et après traitement.

	GN (g/cm ³)	GR (g/cm ³)	GR-P (g/cm ³)
Classe 3/8	1.69	1.41	1.12
Classe 8/16	1.70	1.42	1.22

La masse volumique apparente (g/cm³)

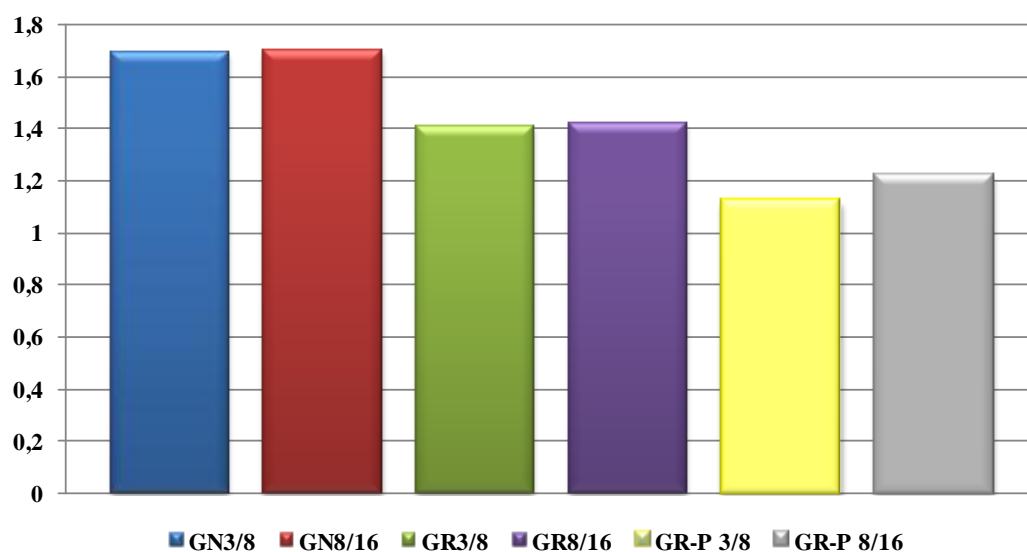


Figure III. 23 : Histogramme de la masse volumique apparente avant et après traitement par pâte de ciment.

La figure III. 23 montre que la masse volumique apparente a diminué après traitement par la pâte de ciment pour les granulats recyclés 3/8 de 1.17 à 1.12 g/cm³, alors que la masse volumique a augmenté de 1.12 à 1.22 g/cm³ pour les granulats recyclés 8/16. Cela peut être expliqué par le fait qu'après enrobage des granulats 8/16 par la pâte de ciment, l'augmentation des masses de ces granulats a été supérieure à l'augmentation de leurs volumes, ce qui a donné un plus grand rapport masse/volume; et c'est quasiment l'inverse qui est arrivé aux granulats de diamètres inférieurs (3/8).

III. 2. 3. 3 Absorption d'eau des granulats recyclés

L'absorption d'eau est un paramètre très important qu'il faut mesurer. Les mesures ont été effectuées sur les granulats recyclés avant puis après traitement par la pâte de ciment pour connaître l'effet du traitement, mais aussi sur les granulats naturels pour pouvoir procéder à

des comparaisons. Les résultats obtenus sont présentés dans tableau III.3 et illustrés dans la figure III.24.

Tableau III. 9 : Comparaison d'absorption d'eau des granulats recyclés avant et après traitement.

	GN (%)	GR (%)	GR-P (%)
Classe 3/8	0.80	5.50	8.38
Classe 8/16	0.97	5.70	7.98

La figure ci-dessous représente les variations des différentes quantités d'eau absorbées par les granulats de différentes natures et de différents diamètres.

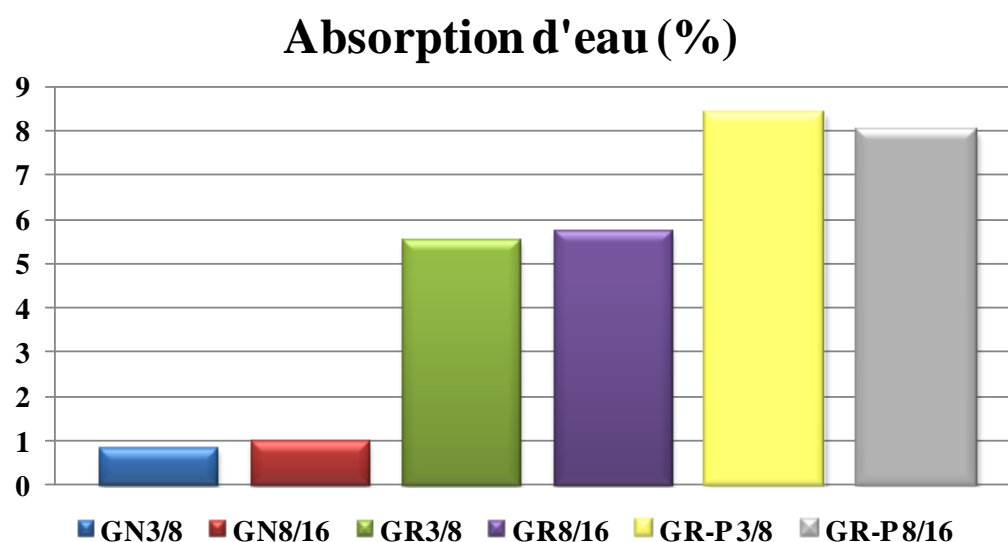


Figure III. 24: Histogramme de l'absorption d'eau avant et après traitement par pâte de ciment.

On constate de ce diagramme que pour les granulats 3/8 et 8/16, le traitement par la pâte de ciment a provoqué une augmentation de la quantité d'eau absorbée de près de 50% pour les 3/8 et d'environ 40% pour les 8/16. Cela peut s'expliquer par une augmentation de la porosité des granulats recyclés avec l'augmentation de la quantité de la pâte cimentaire autour des granulats. Un volume de pâte de ciment supplémentaire mènerait à absorber une quantité plus importante d'eau.

III. 2. 3. 4 Analyse granulométrique

La figure III. 25 montre que les granulats traités par pâte de ciment ont augmenté les diamètres. En effet, le dépôt d'une couche de pâte supplémentaire de nouvelle pâte sur l'ancienne a fait augmenter les diamètres des deux types de granulats recyclés.

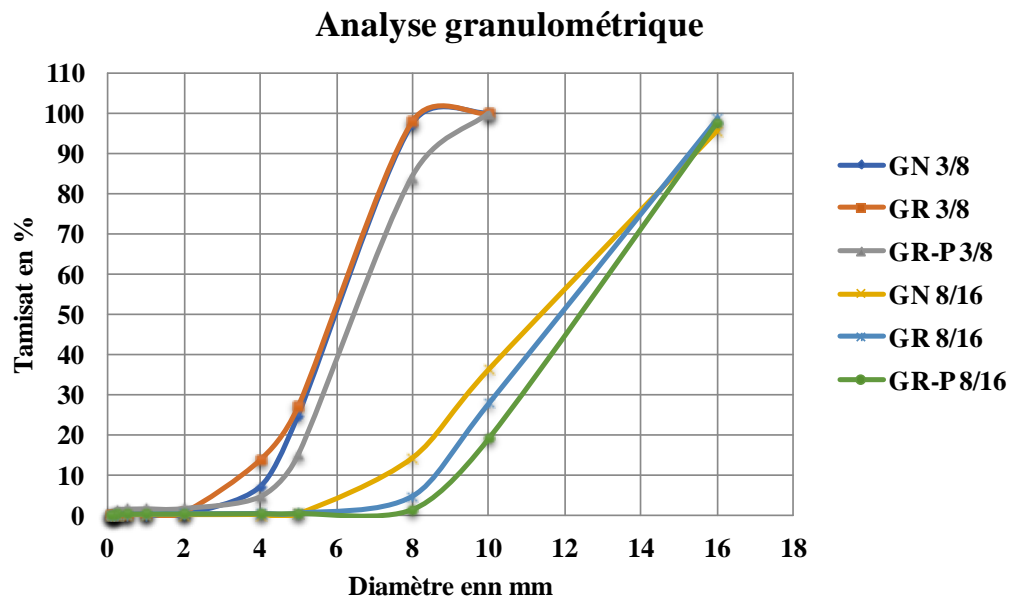


Figure III. 25 : L'analyse granulométrique des granulats (3/8 et 8/16) naturels et recyclés avant et après traitement par pâte de ciment.

III. 2. 3. 5 Affaissement au cône d'Abrams

BGN : Béton à base de 100% Granulats Naturels

BGR : Béton à base de 100% Granulats Recyclés

BGR-P : Béton à base de 100% Granulats Recyclés traité par Pâte de ciment

B 50% GN+ 50% GR: Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés

B 50% GN+ 50% GR-P : Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés traité par Pâte de ciment

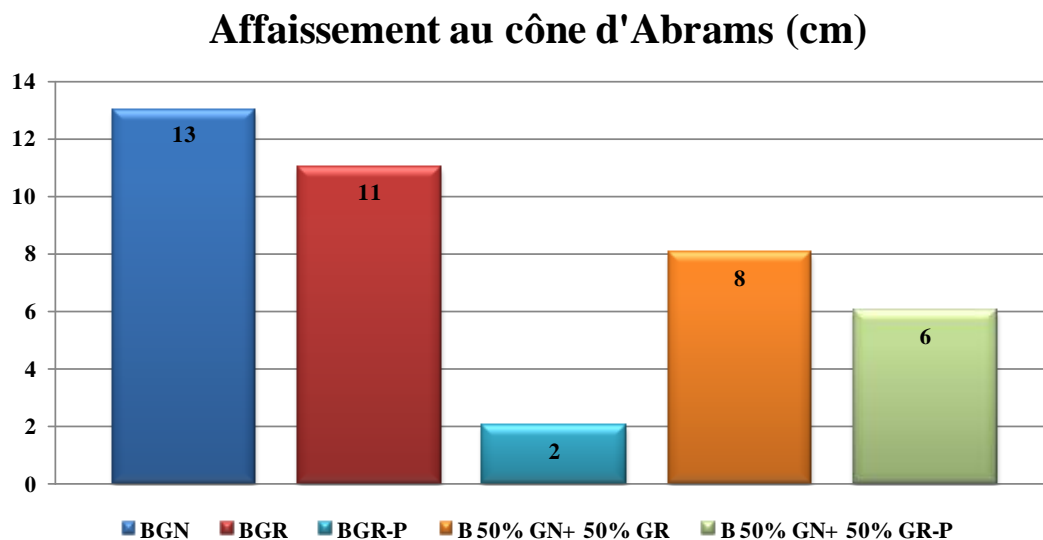


Figure III. 26 : L'affaissement au cône d'Abrams.

De l'histogramme, on constate que les bétons BGN et BGR ont un caractère très plastique : classe d'affaissement S3. Le béton BGR-P est ferme et de classe d'affaissement S1. Les bétons B 50%GN + 50%GR et B 50%GN + 50%GR-P ont un affaissement de classe S2 et sont plastiques.

III. 2. 3. 6 Résistances mécaniques

III. 2. 3. 6. A Résistances à la compression

Les résistances à la compression ont été effectuées sur les demi-éprouvettes issues des essais à la traction par flexion.

✓ Résistances à la compression des bétons à base de 100 % granulats

La figure ci-dessous représente les variations des résistances mécaniques à la compression des différents bétons à base de 100% de granulats naturels (100 GN), puis à base de 100 % de granulats recyclés (100 GR), et enfin à base de 100 % de granulats recyclés traités à la pâte de ciment (100 GN-P).

Résistance à la compression

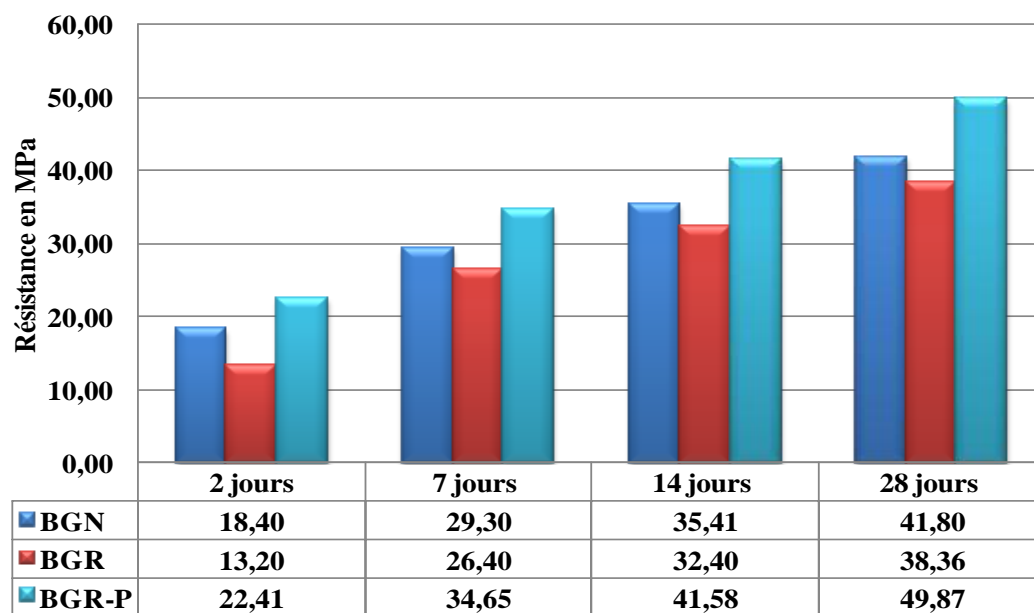


Figure III. 27: Evolution des résistances à la compression des bétons à 100% granulats.

L'histogramme fait apparaître clairement l'évolution des résistances des bétons à 100% de granulats traités par pâte de ciment qui atteignent une valeur supérieure à celle du béton témoins à 100% des granulats naturels. Par contre, le béton à 100% des granulats recyclés non traités qui avait des résistances inférieures à celles des bétons témoins. On peut donc dire que pour avoir des bétons ordinaires résistant, les bétons confectionnés avec 100% de granulats

recyclés traités par la pâte de ciment sont les plus favorables et produisent des résistances élevées.

Ces mêmes variations sont représentées sous forme de courbes (Figure III.28) pour pouvoir analyser clairement les résultats obtenus.

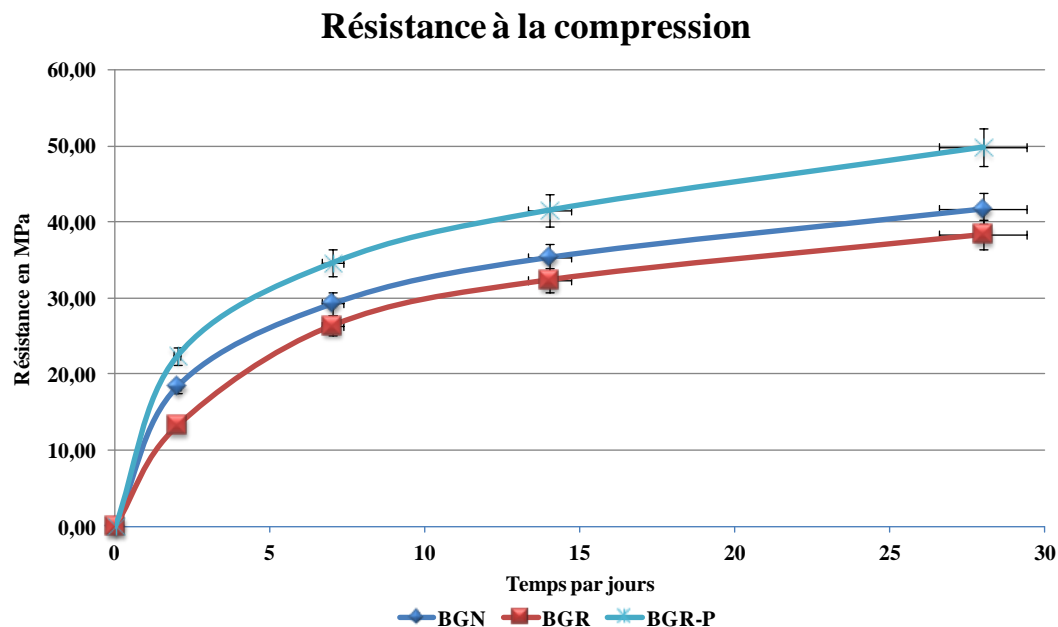


Figure III. 28: Courbe des résistances à la compression des bétons à base de 100% granulats.

Les figures III. 27 et III. 28, montrent que les résistances de béton à base de 100% granulats recyclés augmentent de même façon que celles du béton témoin à 100% des granulats naturels. Les courbes de résistances des bétons à base de granulats recyclés ne présente aucun point en commun avec les autres courbes et à toutes les échéances. Seuls les bétons confectionnés avec des granulats recyclés traités par la pâte de ciment se distinguent du lot et présentent des résistances élevées. Ce surplus de résistance serait dû au dépôt de la nouvelle pâte de ciment sur l'ancienne, de ce fait les granulats recyclés deviennent plus durs.

✓ Résistances à la compression des bétons à base de 50 % de granulats

Les variations des résistances des bétons à base de 50% granulats naturels et 50% de granulats recyclés (50 % GN- GR) puis 50 % granulats naturels combinés à 50 % de granulats recyclés traités par pâte de ciment (50% GR-PC), sont présentées dans la figure ci-dessous.

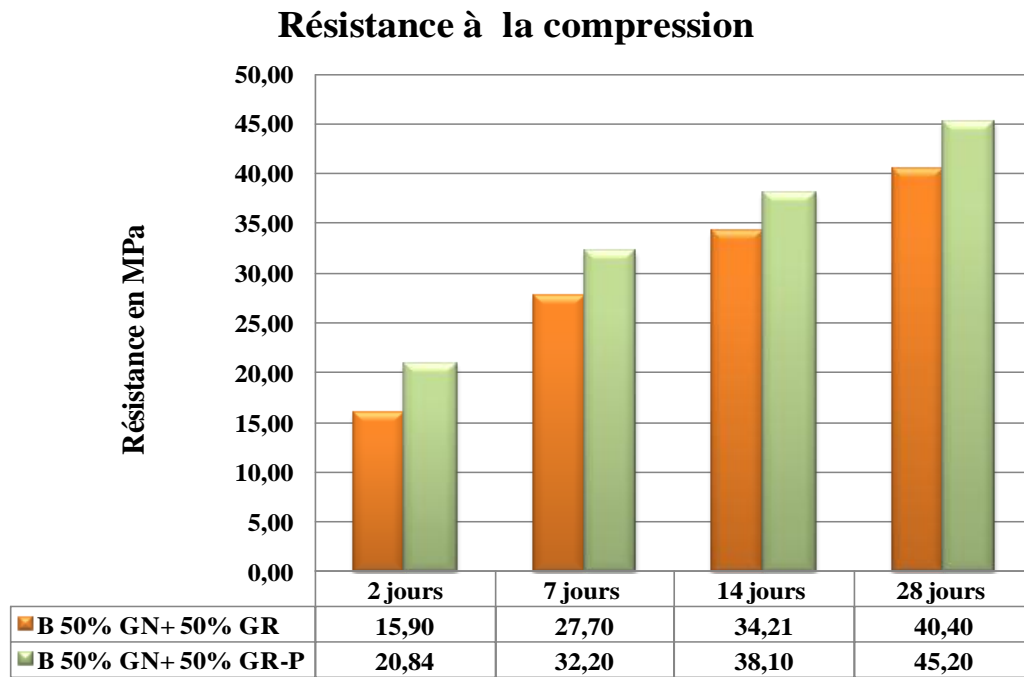


Figure III. 29: Les résistances à la compression des bétons à base de 50% granulats.

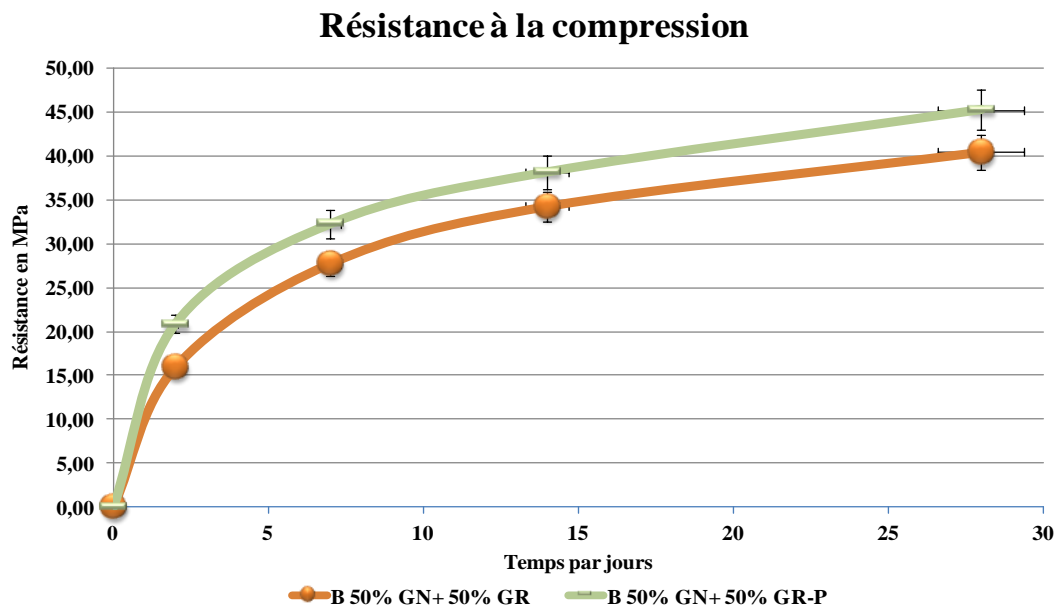


Figure III. 30: Les courbes de résistances à la compression des bétons à base de 50% granulats.

Les figures III. 29 et III.30 montrent que le béton avec 50% de granulats recyclés traités par la pâte de ciment a des résistances légèrement supérieures par rapport à celle de 50% des granulats recyclés non traités.

III. 2. 3. 5. B. Résistances à la traction

Les résistances à la compression ont été effectuées sur les demi-épreuves issues des essais à la traction par flexion.

✓ Résistances à la traction par flexion des bétons à 100 % des granulats

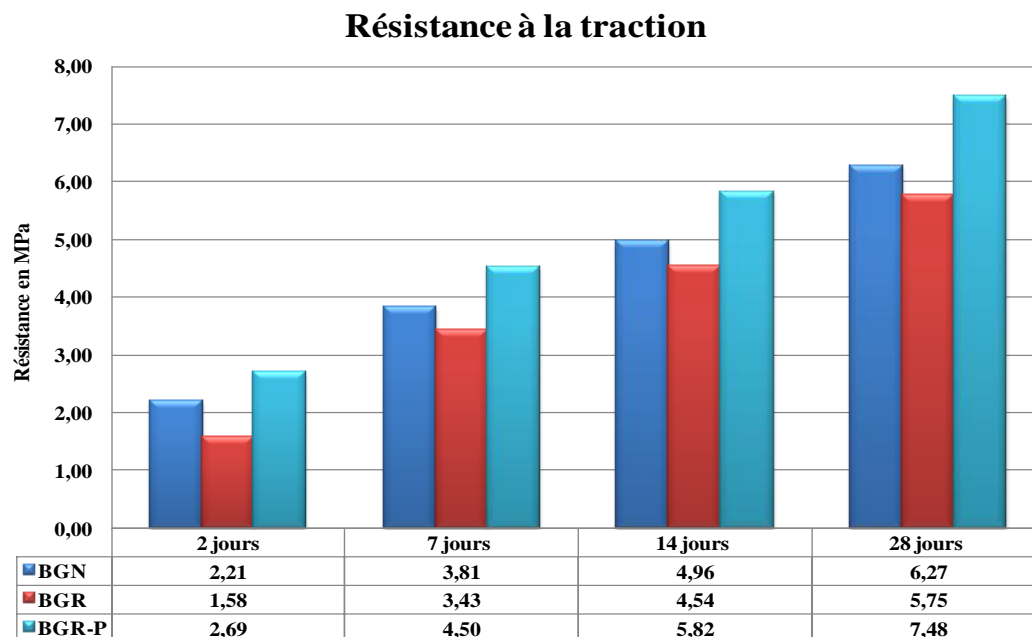


Figure III. 31: Les résistances à la traction des bétons à base de 100% granulats.

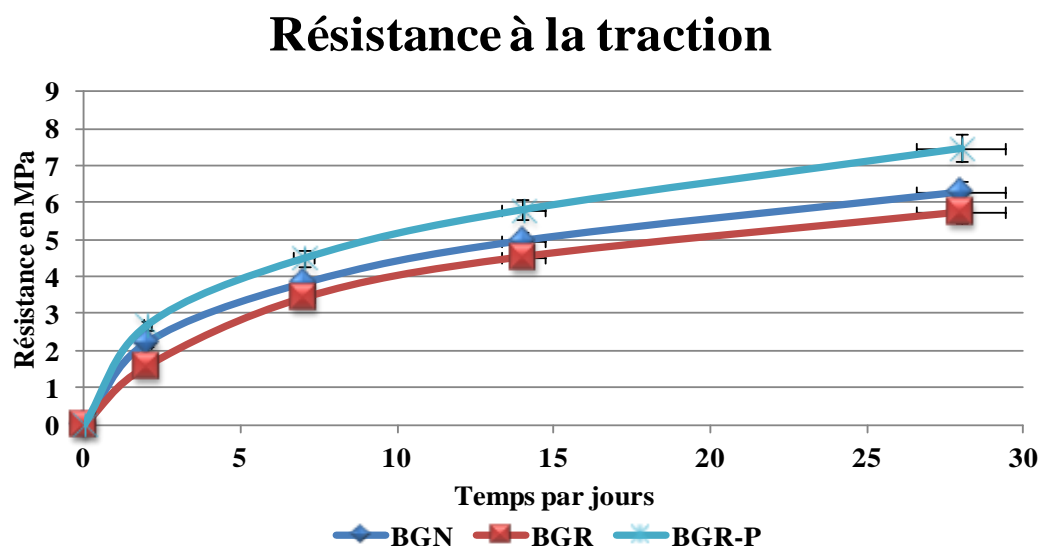


Figure III. 32: Les courbes de résistances à la traction des bétons à base de 100% granulats.

Les figures III. 31 et III. 32 illustrent les résistances à la traction par flexion à trois points des bétons à 100% GN, 100 % GR et 100% GR-P.

Au court du temps, les résistances des bétons à base des granulats recyclés traités augmentent de la même façon que celles du béton témoins (100% GN). Cependant, les bétons confectionnés avec 100% RG traité par pâte de ciment (100% GR-P) restent très élevés et évoluent à part.

La figure III. 32 montre que les granulats recyclés non traités et les granulats naturels ont des résistances similaires, sauf en ce qui concerne les granulats recyclés traités qui sont caractérisés par des résistances plus élevés.

✓ Résistances à la traction par flexion des bétons à 50 % des granulats

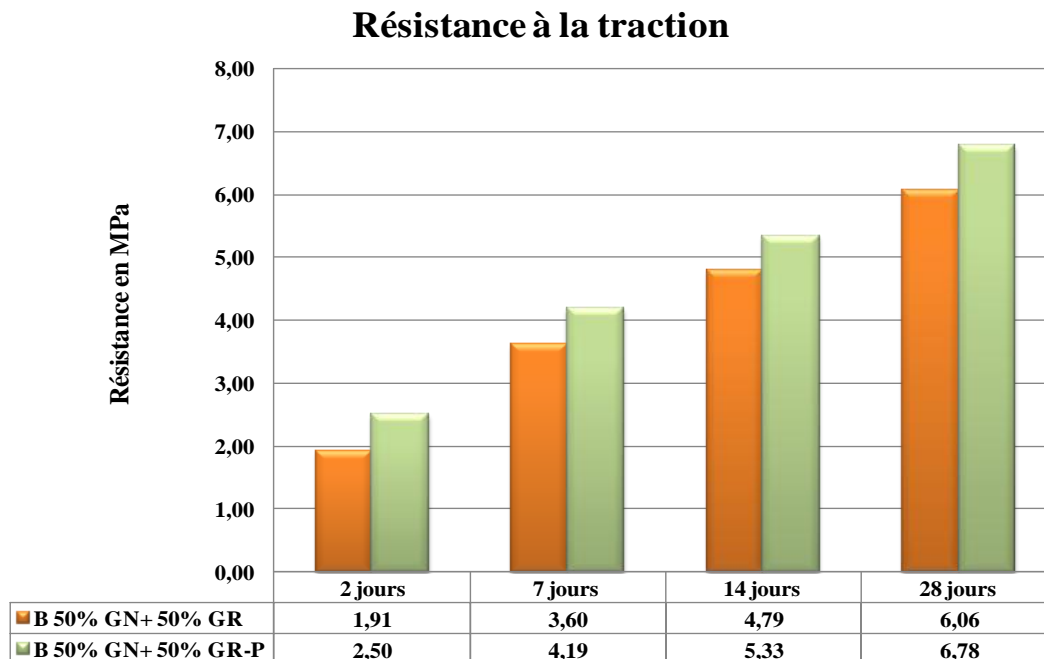


Figure III. 33: Les résistances à la traction des bétons à base de 50% granulats.

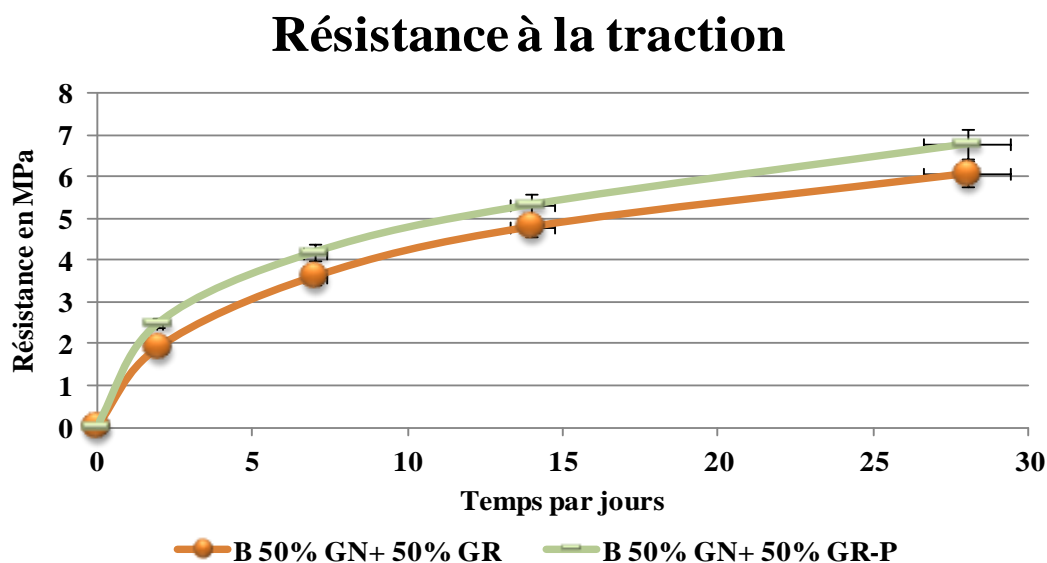


Figure III. 34: Les courbes de résistances à la traction des bétons à base de 50% granulats.

A la lecture des figures III. 33 et III. 34, on voit que les résistances à la traction par flexion ont évolué de façons similaire. Le béton élaboré avec 50% de granulats recyclés traité par pâte de ciment présente des résistances assez intéressantes. Cela peut confirmer que l'introduction des granulats traités peut augmenter les résistances mécaniques.

III. 2. 4 LES GRANULATS RECYCLES TRAITES PAR RESINE

GN : Granulats Naturels

GR : Granulats Recyclés Avant traitement

GR-R : Granulats Recyclés Après traitement par Résine

III. 2. 4. 1 Masse volumique absolue

Les masses volumiques de l'ensemble des granulats avant et après traitement par la résine ont été mesurées et les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III. 10 : Comparaison de la masse volumique absolue des granulats recyclés avant et après traitement

	GN (g/cm ³)	GR (g/cm ³)	GR-R (g/cm ³)
Classe 3/8	2.62	2.37	2.19
Classe 8/16	2.66	2.34	2.14

Les résultats obtenus montrent que les granulats recyclés ont donné des valeurs de masse volumique à celles des granulats naturels.

La masse volumique absolue (g/cm³)

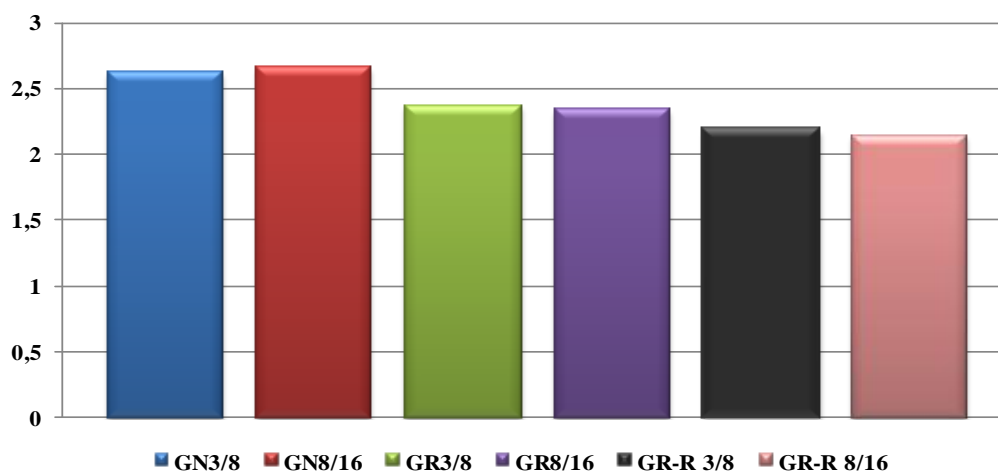


Figure III.35 : Histogramme de la masse volumique absolue avant et après traitement par résine

On voit que la masse volumique absolue des granulats recyclés traités a diminué pour les deux classes granulaires. En effet, en plus de l'augmentation de leurs masses due au traitement par la résine, le volume des grains dans l'eau serait augmenté en raison du colmatage des pores et des fissures par la résine.

III. 2. 4. 2 La masse volumique apparente

Les masses volumiques apparentes ont aussi été mesurées et les valeurs trouvées sont données par le tableau ci-dessous.

Tableau III. 11 : Comparaison de la masse volumique apparente des granulats recyclés avant et après traitement

	GN (g/cm ³)	GR (g/cm ³)	GR-R (g/cm ³)
Classe 3/8	1.69	1.41	1.13
Classe 8/16	1.70	1.42	1.03

La masse volumique apparente (g/cm³)

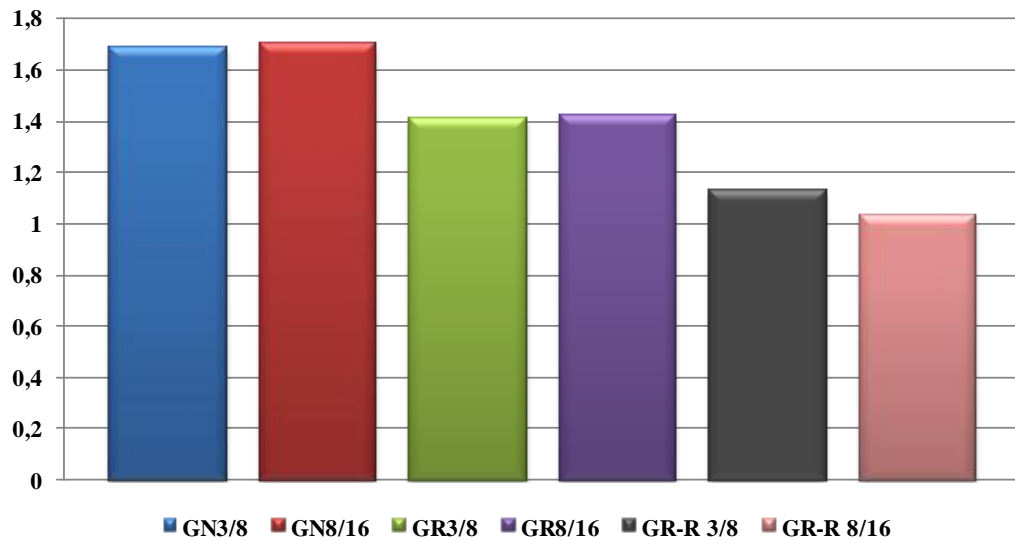


Figure III. 36 : Histogramme de la masse volumique apparente avant et après traitement par résine

L'histogramme de la figure III.36 montre que la masse volumique apparente a été diminuée après traitement par résine pour les granulats recyclés 3/8, de 1.41 à 1.13 g/cm³ et de 1.42 à 1.03 g/cm³ pour les granulats 8/16.

III. 2. 4. 3 Absorption d'eau des granulats recyclés

Les mesures ont été effectuées sur les granulats recyclés avant et après traitement pour connaître l'effet du traitement, mais aussi sur les granulats naturels à des fins de comparaisons. Les résultats obtenus sont présentés au tableau III. 12 et illustrés dans la figure III. 43.

Tableau III. 12 : Comparaison de l'absorption d'eau des granulats naturels et recyclés avant et après traitement

	GN (%)	GR (%)	GR-R (%)
Classe 3/8	0.80	5.5	1.8
Classe 8/16	0.97	5.7	1.6

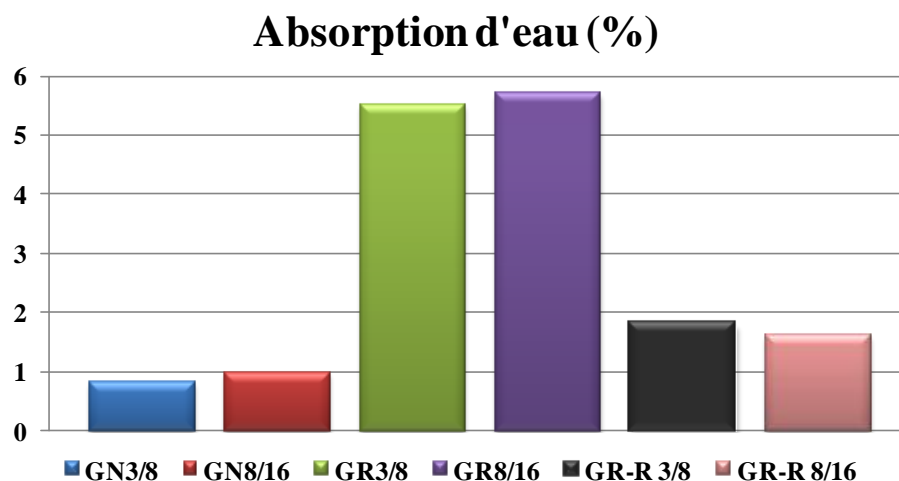


Figure III. 37 : Histogramme de l'absorption d'eau avant et après traitement par résine

On constate clairement d'après le diagramme que la quantité d'eau absorbée par les granulats recyclés avant traitement est nettement supérieure à celle des granulats ayant subi un traitement par la résine. Les valeurs mesurées sont 3 fois plus grandes pour les GR 3/8 et plus de 3,5 fois pour les GR 8/16. Cela peut s'expliquer par le fait que le traitement à la résine a fait diminuer l'absorption en empêchant l'eau de pénétrer dans les pores et les interstices de la pâte des granulats recyclés. La résine rend les granulats imperméables à l'eau et en conséquence diminue l'absorption d'eau.

III. 2. 4. 4 Analyse granulométrique

Il est nécessaire de procéder à une nouvelle analyse granulométrique après traitement des granulats recyclés par la résine, puisque celle ci a provoqué une augmentation de la dimension des granulats. En effet, la couche de résine qui vient enrober chaque granulat a augmenté son diamètre, c'est ce qu'on a pu observer à travers les courbes de la figure III.38 ci-dessous.

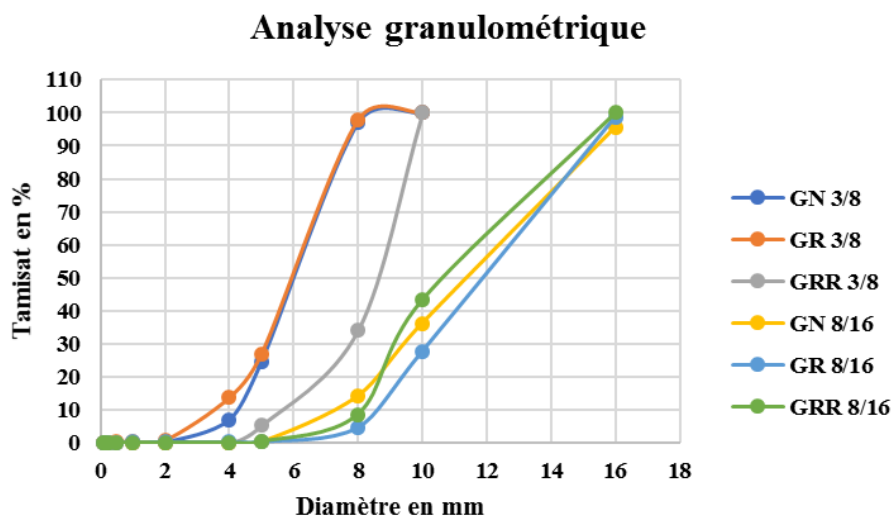


Figure III. 38 : Analyse granulométrique des granulats naturels et recyclés (3/8 et 8/16) avant et après traitement par résine

III. 2. 4. 5 Porosimétrie au mercure des granulats recyclés

La porosimétrie au mercure est un moyen d'investigation permettant de caractériser la porosité d'un matériau par application de différents niveaux de pression à un échantillon immergé dans du mercure. La pression nécessaire pour que le mercure pénètre dans les pores de l'échantillon est inversement proportionnelle à la taille des pores. L'essai a été effectué au laboratoire du Département de Génie Civil et Architecture de l'université Beira Interior (Covilhã - Portugal). Une période d'utilisation de l'appareillage très restreinte nous a été réservée. Pour cela, notre choix était de faire les mesures de porosimétrie sur les granulats recyclés traités par résine. Les bétons confectionnés à base de ces granulats avaient développé les meilleures caractéristiques. La figure III.48 illustre la distribution de la taille des pores des différents granulats recyclés, traités et non traités par la résine, en vue de faire des comparaisons et comprendre l'apport de ce traitement et son influence sur la taille des pores.

La gamme des pressions de mercure appliquée a fait apparaître des variations de diamètres des pores qui s'étendent de 0,05 μm à 400 μm .

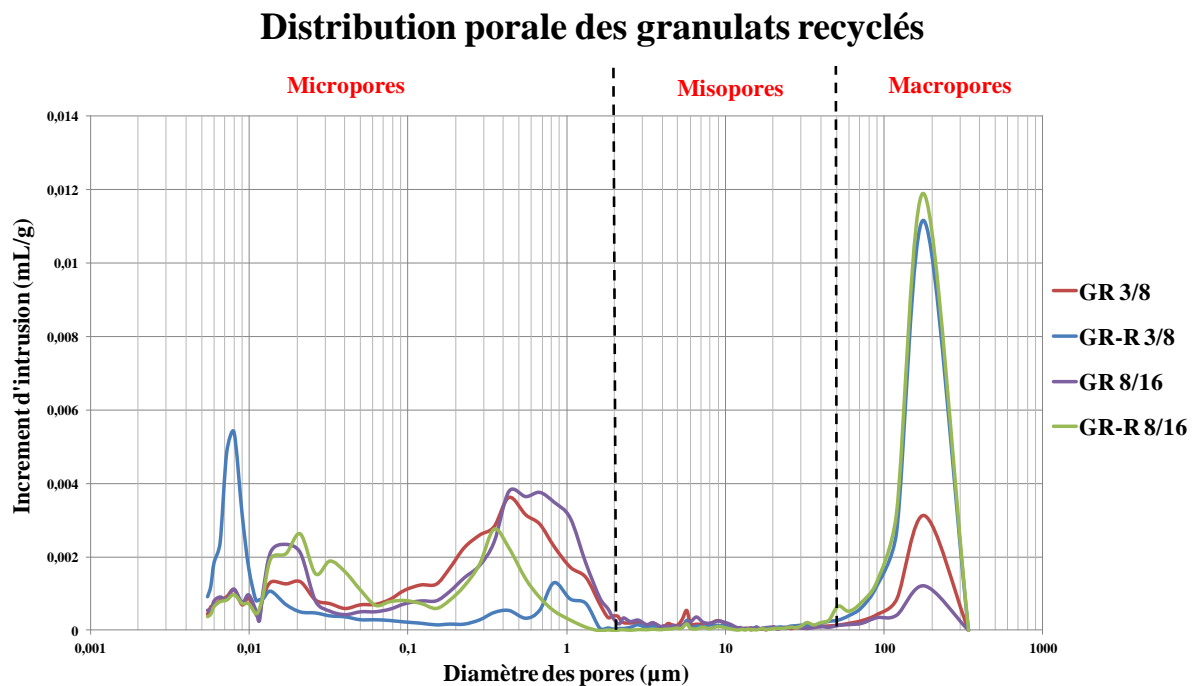


Figure III. 39: Distribution porales des granulats recyclés traités et non traités par résine.

La figure III.39 montre une répartition de trois intervalles de tailles de pores. Il s'agit de micropores (entre 0,001 μm et 2 μm), de misopores (entre 2 μm et 50 μm) et de macropores (supérieures à 50 μm).

Les résultats des mesures ont montré que les granulats recyclés de diamètres 3/8 mm et 8/16 mm (résinés et non résinés) ne contiennent pas de micropores (pas de pores de diamètres compris entre 2 et 50 μm), les volumes de mercure mesurés sont proches de 0 ml/g.

Dans la zone micropores, la distribution des diamètres des pores des granulats GR 3/8 a nettement été diminuée suite à l'effet de remplissage des pores par la résine. C'est aussi le cas des granulats GR 8/16, sur lesquels le traitement à la résine a diminué les volumes de mercure mesurés à 0,04 μm de 0,0035 ml/g à moins de 0,001 ml/g, réduisant ainsi le diamètre des pores de plus de 2/3 par rapport à leur diamètre initial avant traitement.

Le traitement à la résine effectué sur les granulats 8/16 mm a réduit les diamètres des pores, le volume mesuré a chuté pour les granulats GR-R8/16.

Au-delà du 50 μm (dans la zone de macropores), les GR-R3/8 et GR-R8/16 (traités) ont développé une quantité de pores très élevés par rapport au GR 3/8 et GR8/16 (non traités). Les volumes de mercure mesurés ont augmenté au lieu de diminuer suite au traitement, ceci peut être expliqué par l'endommagement de la surface des granulats recyclés traités par résine, sous l'effet de la pression d'intrusion du mercure dans les pores des granulats.

III. 2. 4. 6 Affaissement au cône d'Abrams

BGN : Béton à base de 100% Granulats Naturels

BGR : Béton à base de 100% Granulats Recyclés

BGR-R : Béton à base de 100% Granulats Recyclés traité par Résine

B 50% GN+ 50% GR: Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés

B 50% GN+ 50% GR-R: Béton à base de 50% Granulats Naturels et 50% de Granulats Recyclés traité par Résine

Affaissement au cône d'Abrams

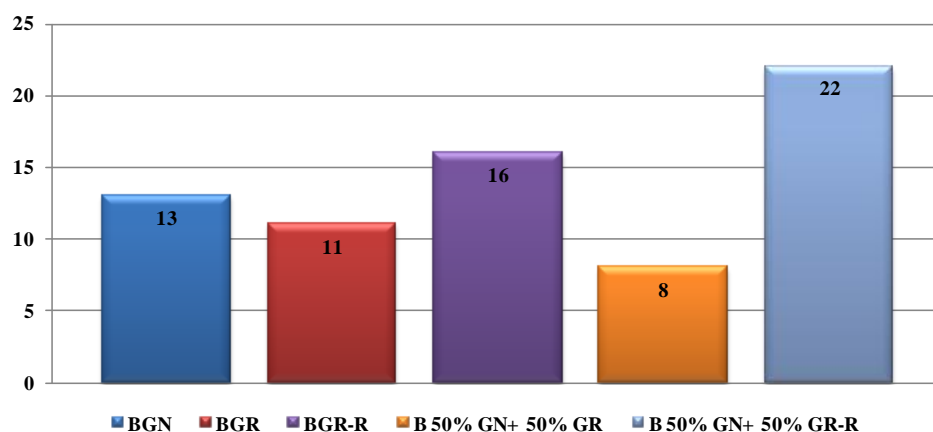


Figure III. 40 : Affaissement au cône d'Abrams

Les bétons BGN et BGR sont des bétons très plastiques de classe d'affaissement S3. Le béton BGR-R et B 50% GN + 50% GR-R sont des bétons fluides d'affaissement de classe S4 et S5 respectivement. Le B 50% GN + 50% GR est un béton plastique de classe S2.

III. 2. 4. 6 Résistances mécaniques

III. 2. 4. 6. A. Résistance à la compression

✓ Résistances à la compression (100 % de granulats)

La figure III. 41 représente les variations de résistances à la compression des bétons composés de 100% granulats naturels (100 GN), 100% granulats recyclés avant traitement (100 GR) et 100 % de granulats recyclés traités à la résine (100 GR-R) en fonction du temps.

Résistance à la compression

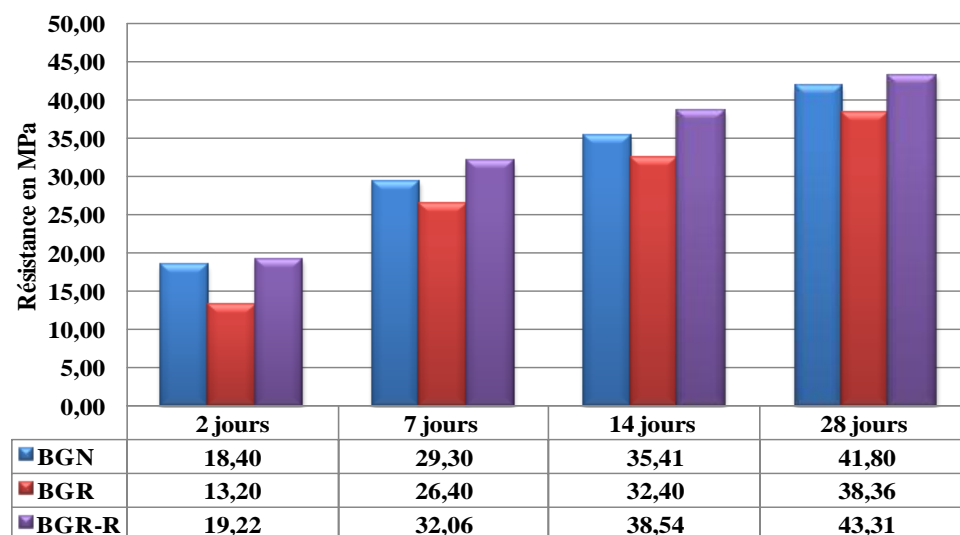


Figure III. 41: Variation des résistances à la compression à base de 100% de granulats

Résistance à la compression

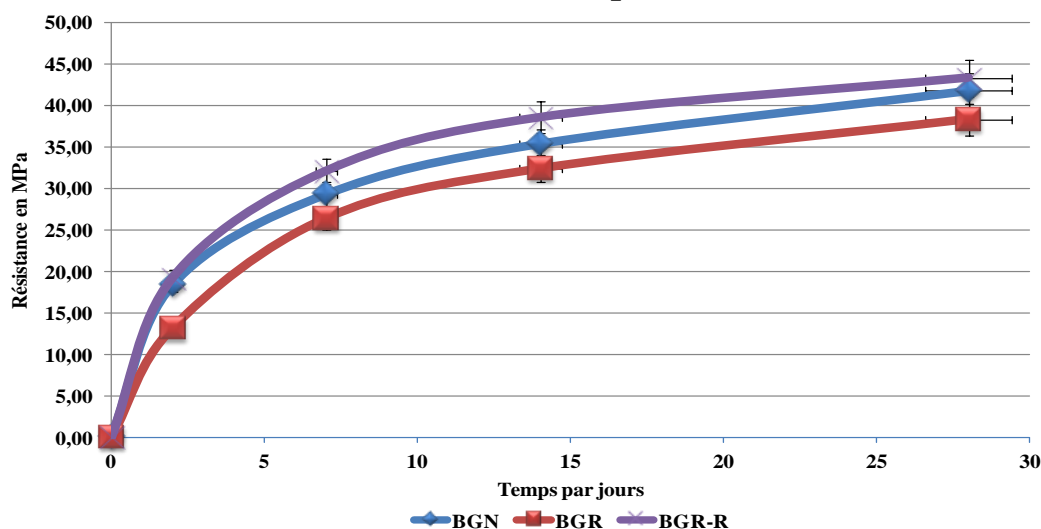


Figure III. 42: Courbes des résistances à la compression à base de 100% de granulats.

Les figures III.41 et III.42 montrent en relief l'évolution similaire des résistances. Les résistances des bétons (100 GR) ont développé les résistances les plus faibles à toutes les échéances. Jusqu'à 7 jours, les bétons (100% GN) et (100% GR-R) ont donné des résistances similaires. C'est à partir de 14 jours que les écarts entre leurs valeurs commencent à être observés. Les résistances de granulats traités à la résine ont montré les résistances les plus élevées.

On remarque aussi que les résistances à la compression coïncident parfaitement, surtout entre les bétons de granulats naturels et ceux des granulats traités à la résine et ce, jusqu'à 28 jours d'échéance. Cela veut dire qu'on peut parfaitement remplacer les granulats naturels par des granulats recyclés mais traités à la résine, ce qui peut participer considérablement à diminuer le prix de revient du mètre cube du béton, puisque les granulats naturels sont plus chers que granulats recyclés et traités à la résine.

✓ **Résistances à la compression (50 % de granulats combinés)**

Les variations des résistances des bétons à base de 50% granulats naturels et 50% granulats recyclés (50 GR-GN) puis 50 % granulats naturels combinés à 50 % de granulats recyclés résinés (50 GR-R), sont présentés dans la figure ci-dessous.

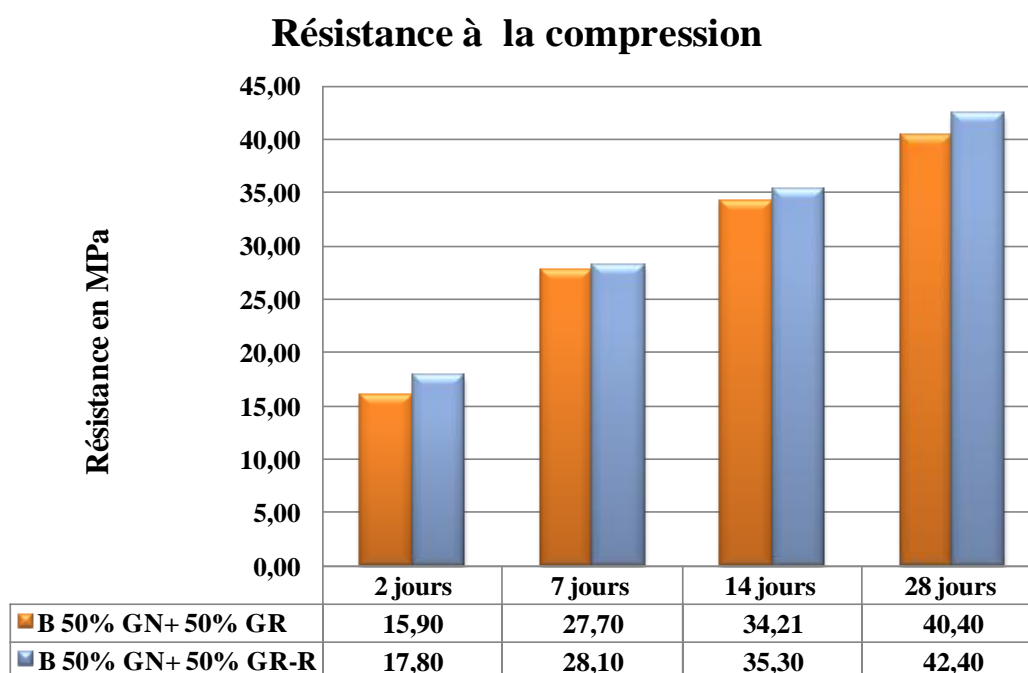


Figure III. 43: Variation des résistances à la compression à base de 50% de granulats combinés

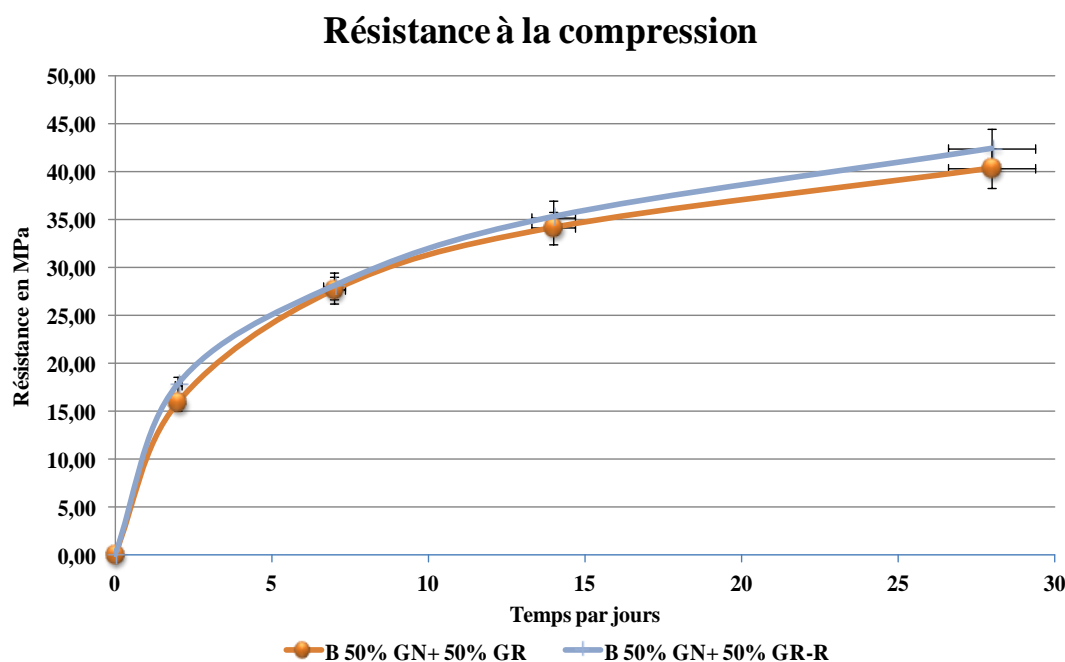


Figure III. 44: Courbes des résistances à la compression à base de 50% de granulats combinés

Les courbes de ces variations (Figure III.44) montrent clairement que les résistances à la compression des bétons évoluent de la même façon, mais les résistances des bétons (50 GR-R) à base de 50 % de granulats naturels et 50% granulats recyclés résinés restent légèrement supérieures. La confection des bétons avec 50 % de granulats recyclés traités à la résine a apporté un supplément moyen de résistance de 1 MPa à 2 MPa pour toutes les échéances, par rapport aux bétons contenant 50% de granulats recyclés non traités..

III. 2. 4. 6. B. Résistance à la traction

✓ Résistances à la traction (100 % de granulats)

La figure III. 45 représente les variations des résistances à la traction des bétons composés de 100% de granulats naturels (100 GN), 100% granulats recyclés avant traitement (100 GN) et 100 % de granulats recyclés traités à la résine (100 GR-R) en fonction du temps.

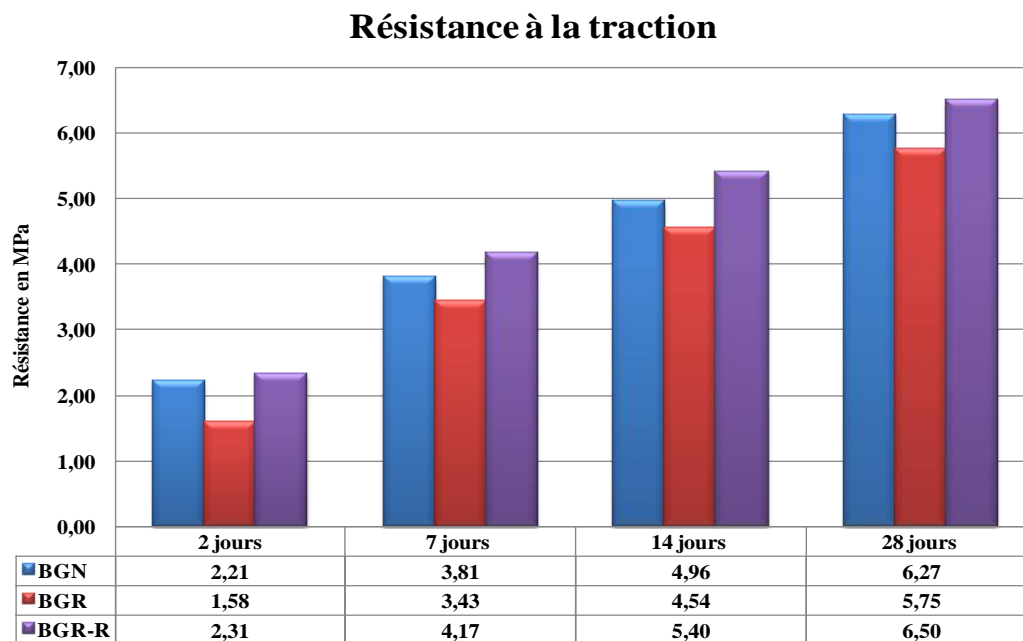


Figure III. 45: Variation des résistances à la compression à base de 100% de granulats

La figure III.45 ci-dessous représente les courbes des résistances à traction par flexion des différents bétons. Les résistances à la traction de tous les bétons évoluent de la même façon. Comme précédemment, les bétons à granulats résinés ont donné les résistances les plus élevées.

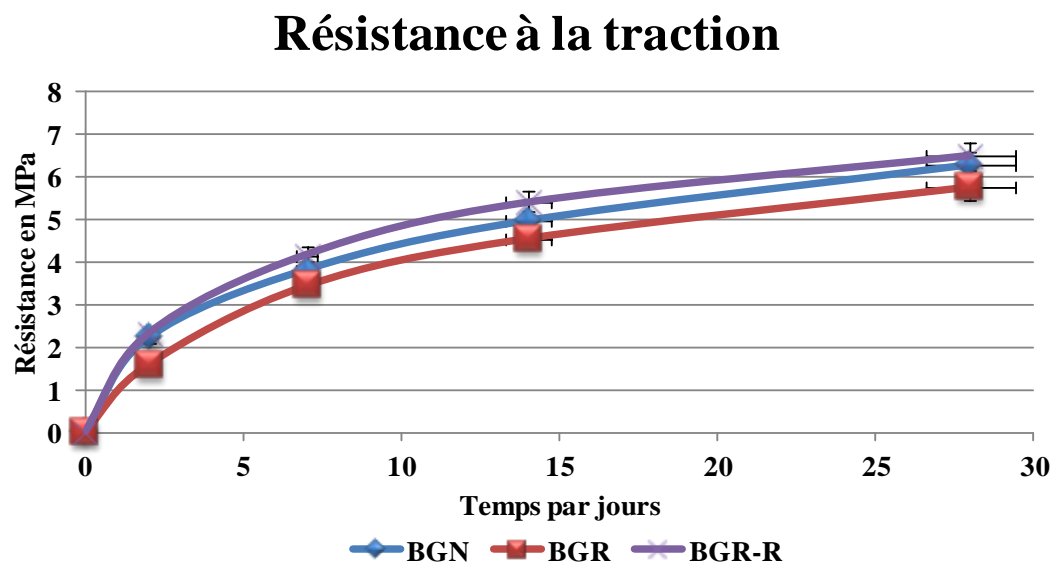


Figure III. 46: Courbes des résistances à la compression à base de 100% de granulats

La figure III.46 montre que les résistances à la traction coïncident parfaitement surtout entre les bétons de granulats naturels et ceux des granulats traités à la résine et ce, jusqu'à 28 jours d'échéance.

Les résistances à la traction des bétons à base de 100 % de granulats non traités restent les plus faibles par rapport aux autres bétons, ceci serait dû à la fragilité de ces granulats et de la pâte qui les entoure qui résiste moins à l'arrachement donc aux efforts de traction.

✓ Résistances à la traction (50 % de granulats combinés)

Les variations des résistances à la traction des bétons à base de 50% granulats naturels et 50% granulats recyclés (50 % GR-GN) puis 50 % granulats naturels combinés à 50 % de granulats recyclés résinés (50 GR-R), sont présentées par la figure III.46.

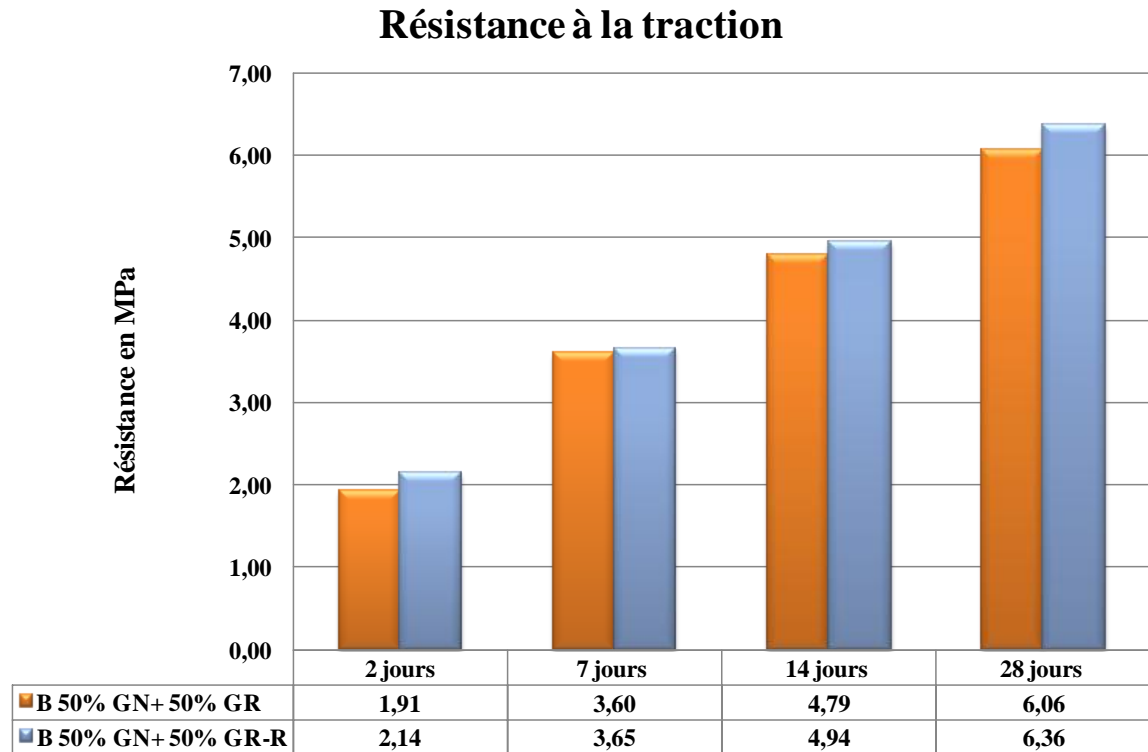


Figure III. 47: Variation des résistances à la traction à base de 50% de granulats combinés

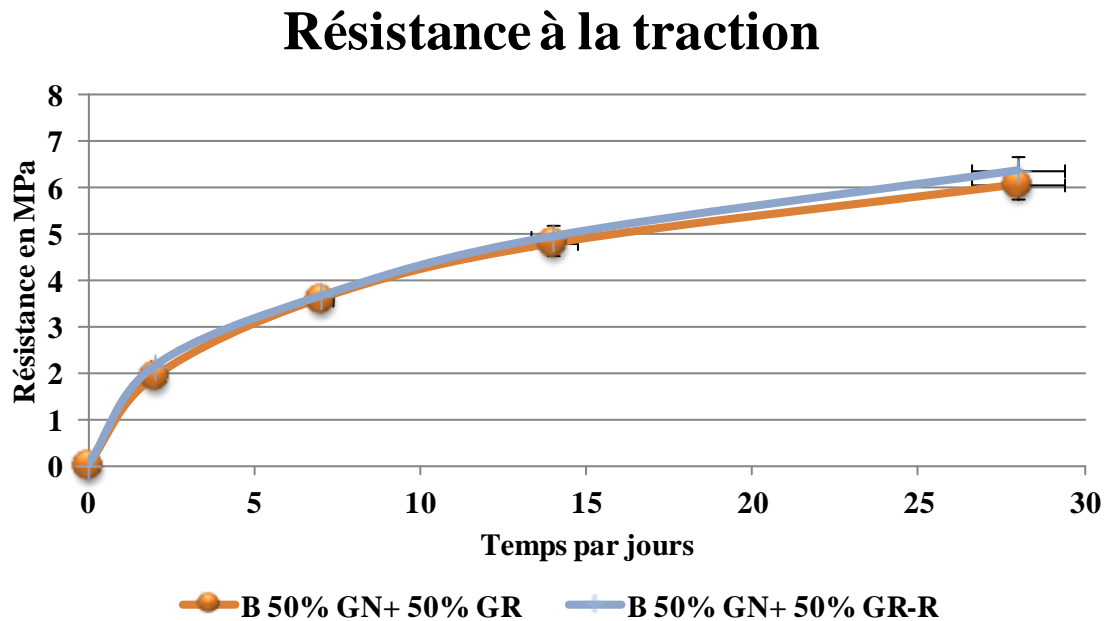


Figure III. 48: Courbes des résistances à la compression à base de 50% de granulats naturels, recyclés traités et non traités par résine.

Les courbes de ces variations (Figure III.48) et l'histogramme montrent clairement que les résistances à la traction des bétons évoluent de la même cinétique, mais les résistances des bétons (50 GR-R) à base de 50 % de granulats naturels et 50% granulats recyclés résinés restent légèrement supérieures. L'utilisation de 50% de granulats traités à la résine n'a apporté aucun gain de résistances.

III. 2. 5 CONCLUSION

A travers l'ensemble des essais effectués sur les granulats et sur les bétons tels que les résistances mécaniques (à la compression et à la traction), plusieurs constats faits sont résumés dans ce qui suit:

- ✓ Les masses volumiques des granulats naturels restent plus élevées que celles des granulats recyclés.
- ✓ Le traitement des granulats recyclés par effet thermique ou par la résine a fait diminuer légèrement les masses volumiques absolues et apparentes. Par contre, le traitement des granulats recyclés par pâte de ciment a fait augmenter les masses volumiques absolues et diminuer les masses volumiques apparentes.
- ✓ Les granulats recyclés traités thermiquement ont une absorption d'eau plus élevée par rapport aux granulats recyclés non traités et naturels. Ceci serait dû à l'augmentation des volumes des pores et des fissures suite aux évaporations d'eau ainsi qu'aux réactions chimiques dans la pâte de ciment qui enrobe les granulats. Le traitement des granulats recyclés par pâte de ciment a, aussi, fait augmenter l'absorption d'eau. Par contre, le traitement des granulats recyclés par la résine a fait diminuer l'absorption d'eau de plus du tiers (1/3).
- ✓ Les granulats recyclés (GR 3/8 et 8/16) traités thermiquement ont des diamètres inférieurs par rapport aux mêmes granulats non traités. Par contre, les granulats recyclés traités par pâte de ciment ou par résine ont des diamètres supérieurs par rapport aux mêmes granulats non traités.
- ✓ Les bétons BGN et BGR ont la même classe d'affaissement S3 (bétons très plastique). Les bétons BGR-T, BGR-P et B 50% GN+50% GR-T ont un affaissement de classe S1 (bétons fermes), alors que le béton B 50% GN + 50% GR et B 50% GN + 50% GR-P a présenté un affaissement de classe S2 (béton plastique). Le béton BGR-R et B 50% GN + 50% GR-R sont des bétons fluides d'affaissement de classe S4 et S5 respectivement.

- ✓ Toutes les résistances mesurées ont évolué favorablement sans interruption avec même cinétique jusqu'à l'échéance de 28 jours.
- ✓ Les résistances des bétons à base de granulats naturels et granulats recyclés traités ont développé des résistances similaires avec une légère augmentation pour celles des bétons à granulats traités par effet thermique, par pâte de ciment ou à la résine.
- ✓ Pour béton à base de 100 % de granulats recyclés, les traitements par pâte de ciment, par effet de température et par résine seraient avantageux. On peut donc remplacer les granulats naturels par ceux traités.
- ✓ On peut le cas échéant, traiter 50 % de granulats recyclés et fabriquer des bétons pouvant avoir des résistances aussi intéressantes.
- ✓ Les résistances à la traction des bétons à base de granulats recyclés sont les plus faibles, ceci serait dû à la fragilité de l'ancienne pâte de ciment entourant les granulats.

Conclusion générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE

De nos jours, le secteur de la construction nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux dans la production de béton. Ce dernier est le matériau le plus utilisé au monde. Parallèlement à cela, on assiste à une accélération de la déconstruction d'ouvrages anciens en béton. Aux regards des évolutions anthropiques, il devient ainsi essentiel de développer des nouvelles approches de la construction permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre. Parmi les nombreuses méthodes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la déconstruction a pour double objectif de préserver les ressources naturelles (environnemental) ainsi que de désengorger les sites de stockage (économique).

Les granulats constituent la matière première principale des bétons en représentant 60 à 70 % de leur volume. Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés issus de la déconstruction présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influe sur leurs propriétés, notamment une absorption élevée. Les propriétés des bétons réalisés avec ces matériaux recyclés peuvent alors être modifiées.

En Algérie, la totalité de la production du béton dans le bâtiment et les travaux publics est composée seulement de granulats d'origine naturelle. Les contraintes liées à la croissance de la demande ces dernières années pour ce type de granulats, nécessitent le recours à d'autres alternatives que les granulats naturels. Par ailleurs, les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la déconstruction du vieux bâti sont en quantité croissante.

L'augmentation inquiétante des quantités des déchets provenant de la construction et de la démolition, ainsi que l'extraction étendue des ressources naturelles nécessaires à la production des matériaux de construction sont sujettes aux critiques des écologistes. Toutefois, de grandes parties des déchets peuvent être partiellement recyclées. L'un des principaux déchets de construction susceptibles d'être recyclés est le béton démolé. La réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets de construction et de démolition et, surtout, de protéger les gisements et les montagnes contre l'ouverture de nouvelles carrières.

L'étude a été effectuée sur trois grandes parties dont la première concerne une synthèse de recherche bibliographique reportant les principaux résultats des différentes recherches entamées sur les granulats recyclés en tant que déchets (récupération, préparation, concassage...) puis en tant que granulats substituables aux granulats naturels dans la

confection des béton (caractérisations, classements granulométriques, capacités d'absorption d'eau...), la seconde porte sur une série d'essais expérimentaux effectués sur les granulats (naturels et recyclés) en ce qui concerne leurs propriétés physiques (masse volumiques, granularité, absorption), les méthodes de traitement choisies pour améliorer leurs caractéristiques, à la fin, différentes combinaisons entre GN et GR ont été adoptées pour la confection des bétons. La troisième concerne la présentation des différents résultats obtenus, leurs analyses et discussion.

Notre projet a été mené dans le but d'atteindre un principal objectif qui consiste à trouver la meilleure méthode d'utilisation de ces granulats dans les bétons, sachant que le problème majeur rencontré par les chercheurs est le phénomène d'absorption d'eau élevé par ces derniers. Il a été constaté que la confection des bétons a posé un grand problème d'ouvrabilité. Compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), avoir une bonne consistance conduit à une demande d'eau de gâchage plus que celui de béton témoin.

En effet, ce problème est bien évidemment posé par la présence de la pâte de ciment, mais plus particulièrement de sa structure alvéolaire. En effet, la pâte de ciment est reconnue pour être un matériau poreux. Les interstices ont tendance à capter l'eau et à la retenir. Il n'y a donc pas suffisamment d'eau libre pour hydrater les grains de ciment.

Pour palier à ce problème d'absorption et d'ouvrabilité, le premier volet de notre travail consiste à mesurer les différentes quantités d'eau absorbées par chaque fraction de granulats recyclés et la confection de bétons ordinaires à base de différentes combinaisons entre granulats tout en prenant en considération les quantités d'eau absorbées et initialement mesurées. L'élaboration des bétons à base des granulats recyclés a été faite par deux méthodes; la première était d'ajouter la quantité d'eau absorbée par les graviers au cours de malaxage et la deuxième était de pré-saturer les graviers durant 24 H avant de les introduire dans le béton.

Les résultats obtenus ont montré que le béton de 50% GR et 50% GN et le béton de 100% GR saturé sont des bétons très plastiques par ce qu'ils ont un affaissement de classe S3 du même ordre que le béton témoin, alors que le béton à 100% GR non saturé (dont l'eau absorbée a été ajoutée lors du malaxage) a un affaissement très fluide de classe S5 qui ne rentre pas dans la même classe que celle du béton témoin (ségrégation). Les bétons confectionnés par des GR pré-saturés et ce de combinaison de 50%GR et 50%GN ont développé des résistances à la compression au minimum 25 MPa à 28 jours, généralement

cette résistance est reconnue acceptable par les maitres d'ouvrages pour les constructions courantes. Donc, pré-saturer les graviers recyclés durant 24 H est la meilleure façon recommandée pour obtenir des bétons ordinaires résistant.

Néanmoins, cette méthode s'avère difficilement réalisable (longue durée, demande un grand espace adéquat où mettre ces granulats pour la pré-saturation, consommation élevée d'eau), pour cela, on a pensé qu'il serait plus judiciable de trouver une autre façon de faire pour palier et réduire leurs absorption d'eau.

Le deuxième volet du présent travail concerne l'effet différents traitements des granulats pour réduire leurs absorptions d'eau et améliorer les caractéristiques des bétons à base de ces granulats. Il s'agit du traitement thermique, du traitement par enrobage par pâte de ciment et du traitement par la résine.

On a constaté en premier lieu que les masses volumiques des granulats naturels étaient plus élevées que celles des granulats recyclés traités et non traités ; et que le traitement thermique à 500°C et par pâte de ciment n'ont provoqué aucun effet sur leurs masses volumiques apparente et absolue (avec une légère différence pour les GR8/16). En revanche, ces traitements ont augmenté l'absorption d'eau des granulats recyclés, ceci serait dû à l'augmentation des volumes des pores et des fissures suite aux évaporations des eaux et des réactions chimiques dans la pâte de ciment qui entoure les granulats (cas traitement thermique). Par contre le traitement par résine a fait diminuer l'absorption d'eau de plus du tiers (1/3).

Il était constaté, aussi, que le traitement par résine et par pâte de ciment a augmenté la taille des granulats recyclés 3/8 et 8/16, par contre le traitement thermique fait diminuer leurs granularités, ça peut être due au rétrécissement des volumes des pâtes attachées aux granulats.

Les bétons à 100% GN et 100% GR ont la même classe d'affaissement S3 (bétons très plastique). Les bétons à 100% GR-T, 100% GR-P et 50% GN+50% GR-T ont un affaissement de classe S1 (bétons fermes), alors que les bétons à 50% GN+ 50% GR et B 50%GN + 50%GR-P ont présenté un affaissement de classe S2 (béton plastique). Le béton BGR-R et B 50% GN + 50% GR-R sont des bétons fluides d'affaissement de classe S4 et S5 respectivement.

En ce qui concerne les essais mécaniques effectués sur les bétons formulés avec différents pourcentage de granulats après traitements, ils ont présenté des résistances mécaniques mesurées évolutifs jusqu'à 28 jours.

En comparant toutes les résistances des bétons confectionnés par la combinaison des différents granulats (100% GN ,100% GR, 100% GR-T, 50% GR et 50% GR-T, 100% GR-P, 50% GR et 50% GR-P, 100% GR-R, 50% GR et 50% GR-R), les bétons à base de (50% GR + 50% GN) ont présenté les meilleures résistances après traitement. On peut donc, le cas échéant, choisir de traiter les granulats issus du recyclage et les incorporer à raison de 50 % pour obtenir des performances mécaniques proches de celles des bétons témoins aux mêmes échéances.

D'après cette étude, on peut dire que traité les granulats recyclés par résine parut la meilleure méthode pour les introduire dans le béton ordinaire de point de vue de diminution d'absorption d'eau, amélioration des propriétés des granulats recyclés et augmentation des résistances mécaniques des bétons.

Cette étude se voulait préliminaire. Elle laisse donc de nombreuses perspectives à prévoir parmi lesquelles :

- Notre travail s'est basé sur les bétons non armés, nous proposons de faire les mêmes essais sur les bétons armés et de procéder à des essais d'arrachement pour faire valoir la résistance de l'ancienne pâte de ciment (interface pâte/granat) ainsi que la cohésion de ces granulats avec les aciers de ferrailage.
- Etude microstructurale par des investigations au MEB, au porosimétrie à mercure, pour suivre l'évolution de la porosité et de la microfissuration en fonction de la température.
- Les études ont montré qu'une admissible absorption d'eau moyenne de 5% (équivalente à celle des granulats naturels), en fixant la quantité d'eau à cette limite, nous proposons de chercher la combinaison optimale entre GN et GR ainsi que le traitement adéquat qui satisfassent cette limite.
- Enfin, nous proposons une étude de quelques indicatifs de durabilité (carbonatation, gel-dégel...) pour compléter les connaissances apportées par la présente recherche.

Références bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Neville M., Brooks J. J., Concrete Technology, 2nd , 2010, pp. 434.
- [2] Fathifazl G., Abbas A., Razaqpur A. G., Isgor, O. B., Fournier, B. et Foo, S. (2009). New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering, volume 21, numéro 10, p. 601-611.
- [3] Etxeberria M., Vazquez E., Mari A. et Barra M. (2007)., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Research, volume 37, numéro 5, PP. 735-742.
- [4] Tam V. W. Y., Gao X. F. et Tam C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and Concrete Research, volume 35, numéro 6, p. 1195-1203.
- [5] RECYC-QUEBEC, “Guide information sur le recyclage des matériaux secs”, 1999.
- [6] F. Laby, Actu-Environnement.com, Le recyclage des déchets de démolition pourrait être amélioré par la déconstruction sélective, mars 2007.
- [7] Commissariat Général au Développement Durable, 254 millions de tonnes de déchets produits par l’activité construction en France en 2008, Chiffres et Statistiques n° 164, octobre 2010.
- [8] Ministère de l’Équipement, des Transports et du Logement – division nuisances, ressources, sécurité, déchets, Déchets du BTP – Plan de Gestion pour Paris et la Petites couronne, Juillet 2004.
- [9] DRE Haute Normandie, Prendre en compte la gestion des déchets de chantier de démolition ou de réhabilitation lourde dans les marchés publics – Guide de recommandations à destination des maîtres d’ouvrage et des maîtres d’oeuvre , 2005.
- [10] Molin C., Larsson K., Arvidsson, H., Quality of reused crushed concrete strength, contamination and crushing technique, RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne.

- [11] Québaud M., Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats, Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
- [12] Cléo Laneyrie, Valorisation des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés, thèse de doctorat, université de Cergy Pontoise, décembre 2014.
- [13] CHAREF, A., La problématique des granulats au Maroc, Push-Button Publishing, (2007).
- [14] HANSEN T. C., Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985, demolition and recycling of concrete, 19(3), pp:201-246, (1986).
- [15] HUSSAIN H. & LEVACHER D., Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons, XXIemes Rencontres Universitaires de Génie Civil, (2003).
- [16] Chakradhara Rao M., Bhattacharyya S. K. et Barai S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 44, numéro 1, p. 205-220.
- [17] De Juan M. S. et Gutierrez P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 872-7.
- [18] Padmini A. K., Ramamurthy K. et Mathews M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 829-36.
- [19] Sagoe-Crentsil K., Brown T. et Taylor A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 5, p. 707-712.
- [20] Butler L., West J. S. et Tighe S. L. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, volume 41, numéro 10, p. 1037-1049.

- [21] Levy S. M. et Helene P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 11, p. 1975-1980.
- [22] Malesev M., Radonjanin V. et Marinkovic S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, volume 2, numéro 5, p. 1204-25.
- [23] Tam V. W. Y. et Tam C. M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA_{sc}. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 10, p. 2068-77.
- [24] Lopez-Gayarre F., Serna P., Domingo-Cabo A., Serrano-Lopez M. et Lopez-Colina C. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, volume 29, numéro 12, p. 3022-3028.
- [25] Tabsh S.W., Abdelfatah A.S., Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1163–1167.
- [26] Roy R L, Parant E, Boulay C. (2005). Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. *Cement & Concrete Research*, 2005, 35(4):770-775.
- [27] Ferreira L. and al., “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties”, *Magazine of concrete research*, Vol 63 issue 8, p. 617-627, 2011.
- [28] De Oliveira M. B. et Vazquez E. (1996). Influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, volume 16, numéro 1-3, p. 113-117.
- [29] Tam V. W., Gao X. et Tam C. M. (2006). Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, volume 58, numéro 7, p. 477-84.
- [30] Tam V. W. Y. et Tam C. M. (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, volume 42, numéro 10, p. 3592-602.

- [31] Tam V. W. Y., Tam C. M. et Wang Y. (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials*, volume 21, numéro 10, p. 1928-1939.
- [32] Fathifazl G., Razaqpur A. G., Isgor O. B., Abbas, A., Fournier, B. et Foo, S. (2010). Shear strength of reinforced recycled concrete beams with stirrups. *Magazine of Concrete Research*, volume 62, numéro 10, p. 685-699.
- [33] Ferreira L. and al., “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties”, *Magazine of concrete research* , Vol 63 issue 8, p. 617-627, 2011.
- [34] Tam V. W. Y., Gao X. F. et Tam C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, volume 35, numéro 6, p. 1195-1203.
- [35] Otsuki N., Miyazato S. et Yodsudjai W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 15, numéro 5, p. 443-451.
- [36] Tam V. W. Y., Gao X. F., Tam C. M. et Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 3, p. 364-9.
- [37] Djerbi Tegguer A., Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials* 27(1):112–116, 2012.
- [38] Norme NF EN 1097-6, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d’absorption d’eau, Janvier 2014.
- [39] Hansen T.C, “Recycling of Demolished concrete and Masonry” - Report of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Reuse of concrete), Ed. Hansen T. C., Rilem Report 6, 336 p., 1992.
- [40] Torben C. H., and Narud H., Strength of Recycled Concrete Made From Crushed Concrete Coarse Aggregate, *Concr. Int.*, vol. 5, no. 1, pp. 79–83, 1983.

- [41] Gomez-Soberon J. M. V., Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate – an experimental study, *Cement and Concrete Research.*, vol. 32, pp. 1301–1311, 2002.
- [42] Topçu et Sengel, 2004, I. B. et Sengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 8, p. 1307-1312.
- [43] Ravindrarajah R.S., Loo Y.H. and Tam C.T., “Recycled concrete as fine and coarse aggregate in concrete”, *Magazine of Concrete Research*, vol.39, 1987.
- [44] Kashino, N., and Takahashi, Y. □1988. “Experimental studies on placement of recycled aggregate concrete.” *Reuse of demolition waste*, Y. Kasai, ed., Vol. 2, RILEM, Cachon Cedex, France, 557–564.
- [45] Ivanyi G, Lardi, R. and A. Esser, *recycling-beton*, Uni-GHK-Essen, *Forschungsberichte aus dem FB Bauwesen*, NO. 33, Universitat-Gesamthochschule, Essen, sept 1985
- [46] Ravindrarajah R. Sri, Tam C.T., Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate, *Mag. Concr. Res.* 37 (1985) 29–38.
- [47] Mukai T. and al. ‘Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete’. Paper presented at a Seminar on Energy and Resources Conservation in Concrete Technology, Japan-US Cooperative Science Programme, San Francisco, 1979.
- [48] Katz A., Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 703–711.
- [49] Casuccio M, Torrijos MC, Giaccio G, et al. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2008; 22: 1500–1506.
- [50] Cordinaldesi V, Moriconi G, Influence of Mineral Additions on the Performance of 100% Recycled Aggregate Concrete. *Constructions and Building Materials*, v. 23, n. 5, p. 2869-2876, mai 2009.
- [51] Corinaldesi V., Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1616–1620.

- [52] Domingo-Cabo A., Lázaro C., López-Gayarre F., M.A. Serrano-López, P. Serna, J. O. Castaño-Tabares, Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2545–2553.
- [53] González-Fonteboa Belén , Martínez-Abella Fernando, Carro López Diego, Seara-Paz Sindy , Stress–strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), 2335–2342.
- [54] Khatib J.M., (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35(4): p. 763-769.
- [55] Evangelista L., Brito J. , (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 397–401.
- [56] Li Xuping, Recycling and reuse of waste concrete in China Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 53 (2008), 36–44.
- [57] Kou S.C. et Poon C.S. (2009) Properties of self compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete composites*, 31, 622-627.
- [58] Xing Zhenxian, Zhou Yuenong , Study on the Main Performance of Regenerated Concrete; *Journal Of North China Institute Of Water Conservancy And Hydroelectric Power*; 1998-02 (Dept.of Civil Engineering,North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Zhengzhou 450045).
- [59] Belen Gonzalez-Fonteboa, Fernando Martinez-Abella, Javier Eiras-Lopez, Sindy Seara-Paz, Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete, *Mater. Struct.* 44 (2011) 1759–1771.
- [60] Angulo S. C., Carrijo P. M., Figueiredo A. D., Chaves A. P. et John V. M., On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete, *Materials and Structures* (2010) 43: 519–528
- [61] Xiao J.-Z., Li J.-B., and Zhang C., On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview, in *Materials and Structures*, 2006, Springer Netherlands, pp. 655-664

- [62] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F., Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties, Building and Environment*, 43 (2008), 429–437
- [63] Achtemichuk S., Hubbard J., Sluce R., Shehata M. H., The utilization of recycled concrete aggregate to produce controlled low-strength materials without using Portland cement, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), pp. 564–569
- [64] Sagoe-Crentsil K.K., Brown T., Taylor A.H., performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 707–712.
- [65] Kou S.-C. and Poon C.-S., Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 2010. 32(8): pp. 649-654
- [66] Yang J., Du Q., and Bao Y., Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks, *Construction and Building Materials*, 2011. 25(4), pp. 1935-1945
- [67] Kawamura M, Tori K (1988) Reuse of recycled concrete aggregate for pavement. *Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Tokyo, Japan, 7–11 November, 726–735
- [68] Hasaba S T T. K., Kawamura M, Torli K, “Drying shrinkage and durability of concrete made from recycled concrete aggregate,” *Trans Jpn Concr Inst*, vol. 3, pp. 55–60, 1982.
- [69] Hansen T.C., Boegh E. “Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concretes, *ACI Journal*, pp. 648-652, 1985
- [70] Domingo A., Lazaro C., Gayarre F.L., Serrano M.A. et Lopez-Colina C. (2010) Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Materials and structures*, Vol 43, pp 1147-1160
- [71] Rahal K., “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 1, pp. 407–415, Jan. 2007.
- [72] Kou S., Poon C., and Agrela F., “Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 8, pp. 788–795, Sep. 2011

[73] Hosein Rajaieh , Yaser Mandi Sanam , M. Hadi Rafiee , Seyed Mojtaba Bagha , Construction and Implementation of Non-Load Bearing Walls by Using Polymer-precast Panels with Plaster Matrix and Comparing Them with Existence Systems, International Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 2 No. 1, 2013, pp. 1-7.

[74] Bhanja S., Sengupta B., Cement and Concrete Research Vol. 33 (2003), pp.447-450.

[75] Shi Cong Kou; Chi Sun Poon; and Dixon Chan Influence of Fly Ash as Cement Replacement on the Properties of Recycled Aggregate Concrete Journal of Materials in Civil Engineering / Volume 19 Issue 9 - September 2007

[76] Ke, Y., Beaucour, A. L., Ortola, S., Dumontet, H., & Cabrillac, R. (2009). Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. Construction Building Materials, 10, 02–038.

[77] Zivica, V. (2004) High Effective Silica Fume Alkali Activator. Bulletin of Materials Science, 27, 179-182. <https://doi.org/10.1007/BF02708502>

[78] Arnould, M. (1986). Matières premières pour la fabrication de granulats légers (Granulats et bétons légers). Collectif sous la direction de M. Arnould et M. Virlogeux [Raw materials for the manufacture of lightweight aggregates (aggregates and lightweight concrete). Collective under the direction of M. Arnould and M. Virlogeux].

[79] Lo, T. Y., & Cui, H. Z. (2004). Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete. Materials Letters, 58, 916–919. [10.1016/j.matlet.2003.07.036](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.07.036)

[80] Wasserman R., & Bentur A. (1996). Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength. Cement and Concrete Composites, 18, 67–76. [10.1016/0958-9465\(96\)00002-9](https://doi.org/10.1016/0958-9465(96)00002-9)

[81] EuroLightCon. 2000. Recycling lightweight aggregate concrete. Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete Document BE96- 3942/R26, Brite EuRam III, 23 p

[82] Zhang J., Shi C., Li Y., Pan X., Poon C.S., Xie Z., “Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar”, Construction and Building Materials, 2018, vol. 98, pp. 1-7

- [83] Lo, T. Y., Tang, W.C., Cui, H.Z., & Leung, W. M. (2007). The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment*, 42, 3025–3029.10.1016/j.buildenv.2005.06.031
- [84] Lo, T. Y., Cui, H. Z., & Tang, W. C. (2008). The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 623–628.10.1016/j.conbuildmat.2006.10.011
- [85] Jozwiak-Niedzwiedzka D., “Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 6, pp. 709–715, 2005.
- [86] Bentur A, Igarashi S, Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cem Concr Res* 2001; 31: 1587–91.
- [87] Zhutovsky S, Kovler K. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete. *Cem Concr Res* 2012;42:20–6.
- [88] Kohno K., Okamoto T., Isikawa Y., Sibata T., Mori H., Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, *Cem. Concr. Res.* 29 (4) (1999) 611–614.
- [89] Evangelista L., Brito J., Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites* Volume 32, Issue 1, January 2010, Pages 9-14
- [90] Brito J.D. and Alves F., Concrete with recycled aggregates: The Portuguese experimental research, *Mater. Structures* 43 (2010), pp. 35–51. doi:10.1617/s11527-010-9595-7
- [91] Gonilho Pereira C., Castro-Gomes J., Pereira de Oliveira L., Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 602–608.
- [92] Rasheeduzafar, Khan: Recycled Concrete-A Source of New Aggregates. *Cem. Concr. Aggre.* 1984; 69(1): 17-27.

- [93] Kou, S.C., Poon, C.S., Etxeberria, M., 2011. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cem. Concr. Comp.* 33, pp 286–291.
- [94] Abbas A., Fathifazl G., Fournier B., Isgor O.B., Zavadil R., Razaqpur A.G., Foo S., Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis, *Mater. Charact.* 60 (2009) 716–728
- [95] Nishibayashi S., and Yamura K., “Mechanical properties and durability of concrete from recycled coarse aggregate prepared by chousing concrete”. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Vol. 2, Reuse of demolition waste. Pp. 652–659, November. Edited by Kasai, Y. (1988)
- [96] Buck A. D.—Recycled concrete as a source of aggregate. *Proc. of Symposium, Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry*, Canmet, Ottawa, 1976.
- [97] Malhotra V.M., Wilson H.S., Painter K.E., (1989) Performance of Gravel stone Concrete Incorporating Silica Fume at Elevated Temperatures. *American Concrete Institute*, vol.114, pp. 1051-1076.
- [98] Coquillat, G. *Recyclage de matériaux de demolition dans la confection de Beton*. CEB-Service d’Etude des Matériaux Unite, *Technology des Béton*, 1982 (in French).
- [99] Zaharieva R., Buyle-Bodin F., Skoczylas F., and Wirquin E., “Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 2, pp. 223–232, 2003.
- [100] Richardson A., Coventry K., Bacon J., Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete, *J. Clean. Prod.* 19 (2011) 272–277
- [101] Nasr-Eddine Kedjour, office des publications universitaires, le laboratoire du béton, 2003
- [102] Brahma A., université de Blida institut de génie civil, *Le béton*, office des publications universitaires : 03-1996

- [103] Jianguang Shi, Yuezhou Xu, Estimation and forecasting of concrete debris amount in China, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 49, Issue 2, December 2006, Pages 147-158
- [104] Zhao et al., Zengfeng, Sébastien Remond, Denis Damidot, and Weiya Xu. 2016. “Influence des granulats recyclé sur les propriétés des mortiers”. *Construction and Building Material* 81 (Avril) : 179–186.
- [105] Farid Debieb, Luc Courard, Said Kenaic, Robert Degeimbre, Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates, *Cement and Concrete Composites* Volume 32, Issue 6, July 2010, Pages 421-426
- [106] Roy D. M., and Silsbee M. R., “Novel Cements and Concrete Products for Application in the 21st Century,” *Concrete Technology, Past, Present, and Future*, SP-144, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1994, pp. 349-382.
- [107] Johannesson B., Utgenannt P., 2001. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and Concrete Research* 31, 925–931.
- [108] Zhao Z., Wang S., Lu L., and Gong C., “Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 191–196, Jun. 2013.
- [109] Arandigoyen M, Bicer-Simsir B, Alvarez JI, Lange DA: *Applied surface science*. Vol. 252 (2006), pp.7562-71.
- [110] Masatao T., Takafumi N., Masaki T., Manabu K., Ippei M., Hironori N., Study of the application of low - quality recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment. in: 2nd Asian Concr. Fed. Conf., Bali, Indonesia. (2006)
- [111] BARRA M. et al, *Propriétés du béton avec des agrégats recyclés : influence des propriétés des agrégats et leur interprétation, utilisation d'agrégats de béton recyclé*, Sustainable Construction. ISBN 0-7277-2726-5. pp :19R30, (1998)
- [112] Shima Hirokazu, Tateyashiki Hisashi, Matsushashi Ryuji, Yoshida Yoshikuni., An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. *J Adv Concr Technol* 2005 ;3(1) :53–67.

- [113] De Juan, M. S. et Gutierrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 872-7.
- [114] Yonezawa T, Kamiyama Y, Yanagibashi K, et al. A study on a technology for producing high quality recycled coarse aggregate. *Zairyo/J Soc Mater Sci Jpn* 2001;50(8):835–42.
- [115] Yoda K, Harada M, Sakuramoto F. Field application and advantage of concrete recycled in-situ recycling systems. London, E14 4JD, United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd; 2003.
- [116] Shima H, Tateyashiki H, Nakato T, Okamoto M, Asano T, et al. New technology for recovering high quality aggregate from demolished concrete. In: *Proceedings of fifth international symposium on East Asia recycling technology*; 1999.
- [117] Japan Concrete Institute (JCI) Standards. Recycled aggregate for concrete-class H (JIS A 5021:2005)
- [118] Abbas, A., Fathifazl, G., BurkanIsgor, O., Razaqpur, A. G., Fournier, B. et Foo, S. (2008). Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM International*, volume 5, numéro 1.
- [119] Spaeth, V., Lecomte, J.P., Delplancke, M.P., 2010. Development of cement materials by incorporation WR additives, *Restoration building materials RBM*, vol. 16, Aedificatio Publishers, pp. 315–324.
- [120] Dr. George Rowland Otoko, Review Of The Use Of Construction And Demolition Waste In Concrete. *International Journal of Engineering and Technology Research*. 2. 1-8.
- [121] Zhao T., Wittmann F.H., Jiang R., Li W., 2011. Application of silane-based compounds for the production of integral water repellent concrete, HVI. In: *6th International Conference on WR Treatment of Building Materials*, pp. 137–144.
- [122] Variation du coefficient d'absorption d'eau avec la fraction granulaire (*International Journal of Engineering and Technology Research* Vol. 2, No. 4, April 2014, pp. 1 - 6, ISSN : 2327 - 0349

- [123] Jishen Qiu, David Qin Sheng Tng, En-Hua Yang, Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation *Construction and Building Materials*. Volume 57, 30 April 2014, Pages 144-150.
- [124] Raut S.H., Sarode D.D., Lele S.S., Biocalcification using *B. pasteurii* for strengthening brick masonry civil engineering structures, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 30 (2014) 191–200.
- [125] Ali Akbarnezhad, Ong K. C. G., Min-Hong Zhang, Chat-Tim Tam, THERMAL STRESSES IN THE MICROWAVE HEATING OF CONCRETE, K. C. G. Ong, National University of Singapore, Singapore, 31st Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 16 - 17 August 2006, Singapore.
- [126] Babu VS, Mullick AK, Jain KK, et al. Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate-influence of processing. *J.Sustain. Cement Based Materials*. 2018;4:54–71. doi:10.1080/21650373.2014.976777.
- [127] Franck Cassagnabere, Produits Prefabriques En Beton File: Vers L'amelioration Des Performances Du Materiau Pour Mieux Gerer Le Procede De Production, Université De Toulouse Iii, thèse Soutenue Le 25 Septembre 2007
- [128] Xing Zhen-Xian, Liu Yun-Xia, Cai Ning-Feng, Research And Application Benefit For Recycled Concrete, School Of Civil Engineering And Communication, North China Univ. Of Water Resources And Electric Power, Zhengzhou 450011, China
- [129] Jose Fernando Martirena Hernandez, Taimí Castaño, Adrian Alujas, Rubén Orozco-Morales, Lesday Martinez & Stefan Linsel.
- [130] Linsel S, Stöckner M. Einsatz alternative Baustoffe bei der Beton herstellung – Darstellungeinesneuen Verfahrens zur Veredelung von Baumaterialien und Anwendungspotenzial im Straßenbau [Use of alternative materials for the production of concrete. Presentation of a new method for improving construction materials. Potential for use in road construction]. *Umwelttechnik und Bauwesen. Environ. Technol. Constr.* 2009; ISSN 1613-4958. 2009.24.

- [131] Müller HS, Linsel S, Garrecht H, et al. Hochfester Konstruktiver Leichtbeton, Teil 1: Material technologische Entwicklungen und Betoneigenschaften [High strength lightweight construction concrete, Part 1: technology development and concrete properties], in: Beton- und Stahlbetonbau. *J. Concr. Reinforced Concr.*2000;7:52–62.
- [132] Sobolev K, Amirjanov A. The development of a simulation model of the dense packing of large particulate assemblies. *Powder Technol.* 2004; 141:155–160.
- [133] Hu J, Stroeven P. Application of image analysis to assessing critical pore size for permeability prediction of cement paste. *Image Anal. Stereol.*2003;22:97–103. doi:10.5566/ias.v22.p97-103.
- [134] Igarashi S, Kawamura M, Watanabe A. Analysis of cement pastes and mortars by a combination of backscatter-based SEM image analysis and calculations based on the Powers model.*Cem.Concr.Compos.*2004;26:977–985.doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.031.
- [135] Wong HS, Head MK, BuenfeldNR. Pore segmentation of cement-based materials from backscattered electron images. *Cem. Concr. Res.* 2006;36:1083–1090.
- [136] Wong HS, Zimmerman RW, Buenfeld NR. Estimating the permeability of cement-based materials using image analysis and effective medium theory. *Cem. Concr. Res.* 2012; 42:476–483.
- [137] Li J, Xiao H, Zhou Y. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*2009;23:1287–1291.
- [138] Gokce A, Nagataki S, Saeki T, et al. Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011;25:2426–2431.
- [139] Martín M, Zamorano M, Ruiz A, et al. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Constr. Build. Mater.*2011;25:742–748.
- [140] Kong D, Lei T, Zheng J, et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete.*Constr.Build. Mater.* 2010;24:701–708.

- [141]** Liam Butler J, Jeffrey West S, Susan Tigh L. Towards the classification of recycled concrete aggregates: influence of fundamental aggregate properties on recycled concrete performance. *J.Sustain. Cem.-Based Mater.* 2014; 3:140–163.
- [142]** Florea MVA, Brouwers HJH. Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use. *Cem.Concr.Res.* 2013;52:11–21.doi:10.1016/j.cemconres.2013.05.005.
- [143]** Pliya P., Beaucour A.L., Noumowwe A. Une manière d’améliorer le comportement du béton soumis à une température élevée ; ajout du cocktail de fibres de polypropylène et métallique. *AFGC La Technique du Béton/ The French Technology Concrete.*
- [144]** Drissi M., Mezghiche B., Khouadjia M. L. K., Influence des paramètres de composition du béton sur sa résistance de compression. *Courrier du savoir – n°20*, décembre2015, pp.73-78
- [145]** Boukli Hacene S.M.A., Ghomari F., Schoefs F., Khelidj A., Etude expérimentale et statistique de l’influence de l’affaissement et de l’air occlus sur la résistance à la compression des bétons. HAL Id: hal-00450356

Annexes



MEDA-IMPREGNATION

Classification selon la norme AFNOR NFT36 005 : Famille 1 ; Classe 6b (résines époxydiques).

Imprégnant époxy

DESCRIPTION

Le MEDA-IMPREGNATION est une résine époxy solvantée destinée à imprégner des supports en béton ou mortier. Il est livré sous forme de kit pré dosé en 2 composants :

Élément A : Résine

Élément B : Durcisseur

DOMAINES D'APPLICATION

- Primaire d'adhérence pour toute résine ou mortier époxy sur béton.
- Imperméabilisation des sols en béton.
- Régénération des supports poreux et friables
- Traitement de surface anti-poussière et anti-usure pour sols en béton.
- Traitement du bois, plâtre...

PROPRIÉTÉS

- Très bonne adhérence sur des supports tels que : béton, mortier, briques, aciers métaux, bois...
- Très bonne étanchéité
- Augmente les résistances mécaniques du béton.

CARACTÉRISTIQUES

- Rapport pondéral (A / B) 2 / 1
- Densité du mélange(ISO758): 1,05 ± 0,05
- Viscosité(NFT30 014) (à 20°C)..... 50" à CF4
- DPU : (NF P18-810):..... 1h à 20°C
- Rc (NA 427) > 70 Mpa
- Rt (NA 234)..... > 30 Mpa
- Adhérence sur béton (NFP 18 858)..... >3 Mpa

MODE D'EMPLOI

Conditions d'utilisation :

Les sols en béton ou mortier doivent avoir au moins 28 jours d'âge.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10° C ou supérieure à 35° C et l'humidité relative au dessus de 80%.

Préparation du support (NF P74-203/ DTU 68-3):

Le support doit être sec, propre et débarrassé des parties non adhérentes. Toutes traces d'huiles, graisses, peintures, laitance ou autres souillures doivent être éliminées.

Mélange :

- Procéder au mélange des deux composants une fois que la préparation des supports soit terminée.
- Préparer la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Il est très important de bien remuer les deux éléments constituant le MEDA-IMPREGNATION jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- Malaxer pendant 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation.

Application :

Appliquer le mélange en couche mince à la brosse ou au rouleau.

Éviter la saturation du support (phénomène de vitrification).

Le revêtement final doit être appliqué après 8 heures de séchage minimum et dans tous les cas avant 24 heures à une température de 20 ° C.

CONSOMMATION :

La consommation de la résine d'imprégnation varie entre 0,3 à 0,5 kg / m² selon la porosité du support.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



MEDA-IMPREGNATION

TEMPS DE SÉCHAGE ET DE MISE EN SERVICE

	10° C	20° C	30° C
Hors toucher	48 h	10 h	6 h
Traffic piéton	4 jours	2 jours	1 jours
Traffic lourd	8 jours	5 jours	3 jours
Durcissement complet	20 jours	15 jours	10 jours

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Livré en kit de 10,5:

Élément A : 7 kg

Élément B : 3,5 kg

Le produit se conserve 01 année dans son emballage d'origine fermé hermétiquement, dans un endroit sec et à une température comprise entre 5°C et 35°C

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Les résines époxydiques peuvent irriter la peau et les muqueuses. En conséquence, il est conseillé de mettre des gants en caoutchouc lors de l'utilisation.

En cas de contact avec les yeux, laver à grande eau et consulter un médecin.

Nettoyer les outils après l'application à l'aide d'un diluant époxy MEDILUPOX.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tel: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com





SOLUFLOW® 3090

Superplastifiant/ Haut réducteur d'eau

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab 1, 3.1 et 3.2.



Description

Le SOLUFLOW® 3090 est un superplastifiant de nouvelle génération, à base de polycarboxylate modifié particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi, les chantiers de génie civil et travaux public.

Le SOLUFLOW® 3090 est adapté à la fabrication de bétons plastiques à autoplaquants homogènes sur une large gamme de résistance mécanique et transportés sur de longues distances et pompés.

Le SOLUFLOW® 3090 est destiné à créer une forte réduction d'eau et/ou une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Il permet de réaliser des bétons avec un long maintien d'ouvrabilité.

- Des bétons de haute qualité.
- Des bétons avec de long maintien de rhéologie, même par temps chaud.

Domaines d'applications

Le SOLUFLOW® 3090 est utilisé pour :

- Béton prêt-à-l'emploi.
- Ouvrages d'art.
- BHP et BTHP
- Bétons plastiques à très fluides
- Bétons auto-plaquants

Propriétés

Le SOLUFLOW® 3090 améliore les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci.

- Il augmente l'ouvrabilité.
- Il augmente les performances mécaniques des bétons.
- longue rhéologie (>1h 30).

Il procure au béton :

- Une augmentation des résistances mécaniques à court et long terme.
- Une augmentation de la fluidité.
- Une augmentation de la durabilité.
- Une bonne qualité de parement.

Le SOLUFLOW® 3090 est compatible avec tous les ciments.

Caractéristiques

- Aspect : liquide
- Couleur : brun clair

Données techniques

- Densité : 1,050 g/cm³ ± 0,02
- pH (MA 003) : 5,5 ± 1,5
- Extrait sec : 25 ± 1,5%
- Teneur en ion Cl⁻ : < 0,1 %
- Teneur en Na₂O éq. : < 1%

Conditionnement

- Bidon de 5 kg
- Bidon de 10 kg
- Fût de 230 kg
- Cubitainers de 1050 kg

Stockage

Le SOLUFLOW® 3090 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.



Conservation

Dans son emballage d'origine, le produit se conserve 12 mois.

Consommation

Le dosage du SOLUFLOW® 3080 est en fonction des effets recherchés.

Plage d'utilisation recommandée

0,3 à 3 % du poids du ciment.

Mise en œuvre

Le SOLUFLOW® 3080 est ajouté dans l'eau de gâchage ou dans le malaxeur au moment de la confection du béton.

Dans le cas d'un ajout différé sur le béton frais et dans un camion malaxeur, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse 1 minute par m³ de béton (avec un minimum total de 5 minutes).

Remarques

En cas de gel, le produit conserve ses propriétés. Après dégel, une agitation efficace est nécessaire jusqu'à l'obtention d'un produit totalement homogène.

Précautions d'emploi

Manipulation non dangereuse.
En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit. Consulter la fiche de données de sécurité.

