

Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Année académique 2014-2015

Prétraitement et fonctionnalisation de la surface des granulats recyclés pour la fabrication de bétons

Travail de fin d'études réalisé par
FIANDACA Thomas
en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil des Constructions

COURARD Luc (Promoteur)
HEINRICHS Benoît
FRANSSEN Jean-Marc
ZHAO Zengfeng
NEYRINCK Stéphane (Membre extérieur)



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon Promoteur, Monsieur Luc Courard, qui a toujours été disponible pour moi malgré un emploi du temps chargé, et qui n'a pas hésité à me donner de précieux conseils. Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Zengfeng Zhao, Docteur dans le domaine du recyclage des bétons, qui m'a aidé à de nombreuses reprises, que ce soit lors du travail pratique ou lors de la rédaction. Je remercie également Messieurs Benoît Heinrichs, Jean-Marc Franssen et Stéphane Neyrinck pour leurs remarques avisées. Et enfin, je remercie mes proches qui m'ont soutenu, coaché et aidé lors de cette dernière étape de mon parcours académique à l'Université de Liège.

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil des
Constructions par FIANDACA Thomas

Prétraitement et fonctionnalisation de la surface des granulats recyclés pour la fabrication de bétons

Les granulats recyclés (GR) de bétons constituent un matériau de plus en plus sollicité dans le domaine de la construction pour la fabrication de bétons prêts à l'emploi ou de blocs préformés de type hourdis. En effet, à l'inverse des ressources naturelles, la quantité disponible de ce matériau ne fait que croître au fil des années. Cependant, la porosité de ce matériau est nettement supérieure à celle des granulats naturels (GN). De plus, la qualité et la pureté de ce matériau sont fonction du processus de traitement des déchets. Ces deux raisons font qu'il n'est pas envisageable d'employer les GR en l'état actuel, hormis pour des applications non liées en technique routière.

L'objet de ce travail de fin d'études est d'étudier les possibilités de traiter la surface des GR en vue de diminuer l'impact de la porosité sur l'ouvrabilité et la prise du béton. Le travail se divise en deux phases distinctes.

Premièrement, l'objectif est de réduire le coefficient d'absorption d'eau des GR via différents enrobages tels que : ciment CEM I 52.5, 50% ciment CEM I 52.5 / 50% cendres volantes, chaux, agents hydrofuges à base de Silane (20%, 40% et 90% de matières actives) et amidon. Les essais menés sur les GR, tels que la détermination du coefficient d'absorption d'eau, l'évolution de la teneur en eau au cours du temps d'immersion dans l'eau, la détermination de la masse volumique absolue et l'estimation de l'épaisseur de l'enrobage permettent de comparer l'efficacité des traitements.

Deuxièmement, l'objectif est d'étudier l'influence des traitements de la première phase sur les propriétés du béton (ouvrabilité et résistance mécanique). Les études menées sur le béton, à savoir la détermination de l'affaissement, de la teneur en air, de la masse volumique et des résistances à la compression et à la traction (après 28 jours) permettent une comparaison des propriétés des bétons.

Un complément d'étude comprend une comparaison économique des coûts de production de bétons aux propriétés identiques mais de compositions différentes (GN ou GR traités) et une analyse de l'impact environnemental qu'aurait le traitement des GR sur les futurs déchets de béton.

Les membres du jury,

Luc Courard (Promoteur)



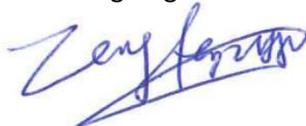
Benoît Heinrichs



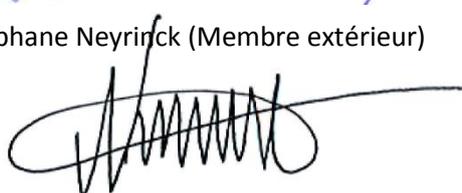
Jean-Marc Franssen



Zengfeng Zhao



Stéphane Neyrinck (Membre extérieur)



RÉSUMÉ

Prétraitement et fonctionnalisation de la surface des granulats recyclés pour la fabrication de bétons

FIANDACA Thomas

Deuxième année du grade de Master en Ingénieur Civil des Constructions

Année académique 2014-2015

Les granulats recyclés (GR) de bétons constituent un matériau de plus en plus sollicité dans le domaine de la construction pour la fabrication de bétons prêts à l'emploi. Cependant, la porosité de ce matériau est nettement supérieure à celle des granulats naturels (GN). De plus, la qualité et la pureté de ce matériau sont fonction du processus de traitement des déchets. Ces deux raisons font qu'il n'est pas envisageable d'employer les GR en l'état actuel, hormis pour des applications non liées en technique routière telles que les fondations et sous-fondations.

L'objet de ce travail de fin d'études est d'étudier les possibilités de traiter la surface des GR en vue de diminuer l'impact de la porosité sur l'ouvrabilité et la prise du béton.

Afin de réduire la cinétique d'absorption d'eau des GR, différents enrobages sont envisagés. Seuls les agents hydrofuges (à base aqueuse) composés de matière active (Silane) à concurrence de 20 % (Hydrofuge A) et de 40 % (Hydrofuge B) permettent de réduire significativement le coefficient d'absorption d'eau; cette réduction est respectivement de l'ordre de 50% et de 30%.

L'influence du traitement des GR à l'hydrofuge A sur les propriétés du béton (ouvrabilité et résistance mécanique) a été étudiée. Pour un rapport Eau/Ciment (E/C) constant, cette influence est négligeable sur les propriétés du béton frais, tant au niveau de l'affaissement qu'à celui de la teneur en air et de la masse volumique. En ce qui concerne les propriétés du béton durci, il s'avère que seule la résistance en compression est influencée négativement par ce traitement ; le béton de GR traités présente une résistance inférieure de 20% au béton de GR non traités et inférieure de 56% au béton de GN.

Un approfondissement de l'étude est donc nécessaire. Il devrait principalement consister en une étude des causes de l'affaiblissement de la résistance en compression du béton (suite au traitement des GR à l'hydrofuge A) ainsi qu'en une recherche axée sur l'amélioration de cette résistance.

ABSTRACT

Pretreatment and functionalization of the surface of recycled aggregates for the manufacture of concretes

FIANDACA Thomas

Second year of the Master's degree in Civil Engineering

Academic year 2014-2015

Recycled concrete aggregates (RCA) are a material which impose itself in the field of construction for the ready-mixed concrete production. However, the porosity of this material is considerably higher than the one of natural aggregates (NA). Moreover, the quality and purity of this material are depending on the waste treatment process. Consequently, it is not possible to use RCA in the current state, except for road building applications like base and sub-base.

The purpose of this paper is to study the possibilities to treat the RCA surface in order to reduce the impact of porosity on workability and strength of concrete.

Different coatings are considered reducing water absorption kinetics of RCA. Water-repellent agents only, made of active ingredient (Silane) up to 20% (A) and 40% (B) can significantly reduce the water absorption coefficient; this reduction is respectively equal to about 50% and 30%.

The influence of the *water repellent A treatment* of the RCA on concrete properties (workability and strength) was studied. For a constant Water/Cement (W/C) ratio, this treatment has no impact on the properties of fresh concrete, and this in terms of slump, air content and density. As far as the properties of hardened concrete are concerned, it turns out that the compressive strength is affected in a negative way by the treatment; concrete containing treated RCA has a lower strength than concrete containing non treated RCA (20 % less) and concrete containing NA (56% less).

An enhanced study is required. It would have to consist in a study about the causes of the weakening of the compressive strength of concrete (from the *water repellent A treatment* of the RCA) as well as about a research focused on the improvement of this strength.

Table des matières

RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
TABLE DES FIGURES	XI
TABLE DES TABLEAUX	XIV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 - ETAT DES LIEUX	3
1.1. DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	3
1.2. GÉNÉRALITÉS SUR LA GESTION DES RESSOURCES.....	3
1.2.1. <i>Gestion des déchets</i>	4
1.2.1.1. Prévention	4
1.2.1.2. Réutilisation	4
1.2.1.3. Recyclage	5
1.2.1.4. Compostage.....	5
1.2.1.5. Incinération.....	5
1.2.1.6. Mise en décharge	5
1.2.2. <i>Classification des déchets</i>	5
1.2.2.1. Déchets industriels	5
1.2.2.2. Déchets de construction et démolition	6
1.2.3. <i>Origines des déchets de construction et démolition</i>	7
1.2.3.1. Construction et déconstruction	7
1.2.3.2. Démolition (volontaire ou non)	7
1.2.4. <i>Déchets de C&D dans le monde</i>	8
1.2.5. <i>Economie circulaire et adaptation de l'échelle de Lansink</i>	10
1.2.5.1. Prévention	10
1.2.5.2. Réutilisation	10
1.2.5.3. Recyclage	11
1.2.5.4. Stockage.....	11
1.2.6. <i>Conclusion</i>	12
1.3. GÉNÉRALITÉS SUR LE BÉTON ET SON RECYCLAGE	12
1.3.1. <i>Le béton</i>	12
1.3.2. <i>Les granulats recyclés</i>	13
1.3.2.1. Recyclés de béton (35%).....	14
1.3.2.2. Recyclés mixtes (36%).....	14
1.3.2.3. Recyclés d'enrobés hydrocarbonés (7%)	15
1.3.3. <i>Production de granulats recyclés en Europe</i>	15
1.3.4. <i>Conclusion</i>	16
1.4. PROBLÉMATIQUES LIÉES À L'UTILISATION DE GRANULATS RECYCLÉS DANS LA FABRICATION DE BÉTON	16
1.4.1. <i>Problématiques liées aux propriétés du matériau</i>	16
1.4.1.1. Granulats recyclés.....	16
1.4.1.2. Bétons de granulats recyclés frais	20
1.4.1.3. Bétons de granulats recyclés durs	21
1.4.2. <i>Problématiques normatives</i>	23
1.4.3. <i>Problématiques sociales</i>	23
1.4.4. <i>Problématiques gouvernementales</i>	23
1.4.5. <i>Problématiques économiques</i>	24
1.4.6. <i>Conclusion</i>	24
1.5. HISTORIQUE DES ÉTUDES VISANT À CONTRÔLER L'ABSORPTION D'EAU DES GR	24

1.5.1.	<i>Modification de la surface des granulats recyclés</i>	24
1.5.2.	<i>Amélioration du mode de production des granulats recyclés</i>	26
1.5.3.	<i>Techniques de mélange</i>	26
1.6.	CONCLUSION	27
CHAPITRE 2 - PARTIE EXPÉRIMENTALE.....		28
2.0.	CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS RECYCLÉS.....	28
2.0.1.	<i>Préparation des échantillons : échantillonnage par granulométrie</i>	28
2.0.1.1.	Séchage.....	29
2.0.1.2.	Tamisage.....	29
2.0.2.	<i>Propriétés des granulats recyclés</i>	31
2.1.	PREMIÈRE PHASE : MODIFICATION DE LA POROSITÉ DE SURFACE	33
2.1.1.	<i>Modification de la surface des granulats par enrobage</i>	33
2.1.1.1.	Ciment CEM I 52.5	33
2.1.1.2.	50 % ciment CEM I 52.5 / 50 % cendres volantes	37
2.1.1.3.	Chaux	38
2.1.1.4.	Agents hydrofuges à base de Silane	39
2.1.1.5.	Amidon	42
2.1.2.	<i>Détermination de la teneur en eau – Norme NF EN 1097-5</i>	44
2.1.3.	<i>Détermination du coefficient d'absorption d'eau – Norme NF EN 1097-6</i>	45
2.1.3.1.	Fractions de granulométrie [5 ; 10], [10 ; 20] et [> 20] mm.....	45
2.1.3.2.	Fraction de granulométrie [< 5] mm.....	46
2.1.4.	<i>Détermination de la masse volumique absolue - Norme NF EF 1097-6</i>	46
2.1.4.1.	Fractions de granulométrie [5 ; 10] et [10 ; 20] et [> 20] mm	47
2.1.4.2.	Fraction de granulométrie [< 5] mm.....	48
2.1.5.	<i>Cinétique d'absorption d'eau</i>	48
2.1.6.	<i>Détermination de l'épaisseur de l'enrobage</i>	49
2.2.	RÉSULTATS DE LA PREMIÈRE PHASE	51
2.2.1.	<i>Coefficients d'absorption d'eau</i>	51
2.2.1.1.	Ciment CEM I 52.5	51
2.2.1.2.	50 % ciment CEM I 52.5 / 50 % cendres volantes	53
2.2.1.3.	Agents hydrofuges à base de Silane	54
2.2.1.4.	Chaux	55
2.2.1.5.	Amidon	55
2.2.1.6.	Comparaison des résultats	56
2.2.2.	<i>Cinétique d'absorption d'eau</i>	58
2.2.3.	<i>Épaisseur des enrobages</i>	63
2.2.3.1.	Ciment CEM I 52.5	63
2.2.3.2.	50 % ciment CEM I 52.5 / 50 % cendres volantes	64
2.2.3.3.	Chaux	65
2.2.3.4.	Amidon	65
2.2.3.5.	Comparaison des résultats	65
2.2.4.	<i>Conclusion</i>	67
2.3.	DEUXIÈME PHASE : INFLUENCE DES TRAITEMENTS SUR LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON.....	68
2.3.1.	<i>Préparation des échantillons</i>	68
2.3.1.1.	Béton de granulats naturels.....	68
2.3.1.2.	Béton de granulats recyclés non traités	71
2.3.1.3.	Béton de granulats recyclés traités.....	74
2.3.2.	<i>Détermination de l'affaissement – Norme NF EN 12350-2</i>	77
2.3.3.	<i>Détermination de la teneur en air – Norme NF EN 12350-7</i>	78
2.3.4.	<i>Détermination de la masse volumique du béton frais – Norme NF EN 12350-6</i>	79
2.3.5.	<i>Détermination de la résistance en compression – Norme NF EN 12390-3</i>	80
2.3.6.	<i>Détermination de la résistance à la traction simple – Norme NBN B 15-211</i>	81
2.4.	RÉSULTATS DE LA DEUXIÈME PHASE	81
2.4.1.	<i>Affaissement</i>	82

2.4.2.	<i>Teneur en air et masse volumique du béton frais</i>	82
2.4.3.	<i>Résistance à la compression et à la traction simple</i>	83
2.4.4.	<i>Conclusion</i>	88
CHAPITRE 3 – ANALYSE ÉCONOMIQUE		89
CHAPITRE 4 – IMPACT ENVIRONNEMENTAL		91
CONCLUSION		92
BIBLIOGRAPHIE		94
ANNEXES		97
A.1.	RÉSULTATS FRACTION GRANULOMÉTRIQUE [5 ; 10] MM	97
A.2.	TRAITEMENT DES GR SUPPLÉMENTAIRE : LA CARBONATATION	102
A.3.	CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GRANULATS RECYCLÉS	104
A.4.	PROPRIÉTÉS DES COMPOSANTS DES BÉTONS	111
A.5.	PROPRIÉTÉS DES BÉTONS	113
A.6.	FICHE DES DONNÉES DE SÉCURITÉ DE L'HYDROFUGE A	116

Table des figures

FIGURE 1 - DÉVELOPPEMENT DURABLE	3
FIGURE 2 - ÉCHELLE DE LANSINK	4
FIGURE 3 - RÉPARTITION DES CLASSES DE DÉCHETS POUR LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION EN WALLONIE	6
FIGURE 4 - RÉPARTITION DES MATÉRIAUX AU SEIN DES DÉCHETS DE C&D	6
FIGURE 5 - PROPORTIONS DES DÉCHETS DE C&D À TRAVERS LE MONDE	8
FIGURE 6 - RÉPARTITION DES MATÉRIAUX AU SEIN DES DÉCHETS DE C&D	8
FIGURE 7 - RÉPARTITION DES DÉCHETS EN EUROPE	9
FIGURE 8 - RÉPARTITION DES DÉCHETS EN BELGIQUE ENTRE 2004 ET 2012	9
FIGURE 9 - ECONOMIE CIRCULAIRE DES DÉCHETS INERTES RELATIFS AU DOMAINE DE LA CONSTRUCTION	10
FIGURE 10 - COMPOSITION DU BÉTON EN VOLUME	12
FIGURE 11 - INSTALLATION DE RECYCLAGE DES DÉCHETS INERTES	13
FIGURE 12 - GRANULATS RECYCLÉS DE BÉTON	14
FIGURE 13 - GRANULATS RECYCLÉS MIXTES	14
FIGURE 14 - GRANULATS RECYCLÉS DE BITUME	15
FIGURE 15 - PRODUCTION EN MILLIONS DE TONNES DES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE GRANULATS EN EUROPE EN 2012	16
FIGURE 16 - COMPOSITION D'UN GRANULAT RECYCLÉ DE BÉTON	17
FIGURE 17 - RELATION ENTRE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET LA QUANTITÉ DE MORTIER ATTACHÉ	19
FIGURE 18 - RELATION ENTRE LE COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU ET LA QUANTITÉ DE MORTIER ATTACHÉ	19
FIGURE 19 - RELATION ENTRE L'ABRASION LOS ANGELES ET LA QUANTITÉ DE MORTIER ATTACHÉ	20
FIGURE 20 - POURCENTAGE DE RÉDUCTION DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION LIÉE À L'UTILISATION DE GR	22
FIGURE 21 - DÉCHETS DE CONSTRUCTION	28
FIGURE 22 - TAMIS 5, 10 ET 20 MM	29
FIGURE 23 - TRI PAR INTERVALLES DE GRANULOMÉTRIE	30
FIGURE 24 - COURBE GRANULOMÉTRIQUE DES DÉCHETS DE CONSTRUCTION	31
FIGURE 25 - DIVISEUR À CLOISONS	31
FIGURE 26 - MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE ET COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU (GR NON TRAITÉS)	32
FIGURE 27 - PRINCIPE D'ENROBAGE	33
FIGURE 28 - CARACTÉRISTIQUES DU CIMENT CEM I 52.5	34
FIGURE 29 - CIMENT CEM I 52.5	34
FIGURE 30 - MÉLANGEUR-BATTEUR	35
FIGURE 31 - RÉCIPENTS EN PLASTIQUE	36
FIGURE 32 - GRILLE MÉTALLIQUE	36
FIGURE 33 - SOUCOUPES MÉTALLIQUES	36
FIGURE 34 - MODIFICATION DE LA SURFACE APRÈS ENROBAGE DE CIMENT	37
FIGURE 35 - CENDRES VOLANTES	37
FIGURE 36 - MODIFICATION DE LA SURFACE APRÈS ENROBAGE DE CIMENT ET DE CENDRES VOLANTES	38
FIGURE 37 - CHAUX	38
FIGURE 38 - MODIFICATION DE LA SURFACE APRÈS ENROBAGE DE CHAUX	39
FIGURE 39 - ANGLE DE CONTACT	40
FIGURE 40 - CONSOMMATION EN AGENTS HYDROFUGES - FRACTION [5 ; 10] MM	41
FIGURE 41 - CONSOMMATION EN AGENTS HYDROFUGES - FRACTION [10 ; 20] MM	42
FIGURE 42 - ASPECT LUISANT DES GR TRAITÉS À L'HYDROFUGE C	42
FIGURE 43 - AMIDON	43
FIGURE 44 - MÉLANGE E/A = 1 TROP ÉPAIS	43
FIGURE 45 - PROBLÈME DE DÉCOLLEMENT DE L'ENROBAGE D'AMIDON	44
FIGURE 46 - DIFFÉRENTES CONDITIONS D'HUMIDITÉ	46
FIGURE 47 - BAS EN NYLON	48
FIGURE 48 - BASSIN D'EAU	49
FIGURE 49 - INFLUENCE DU RAPPORT E/C DE LA PÂTE DE CIMENT SUR LA FRACTION [5 ; 10] MM	52

FIGURE 50 - INFLUENCE DU RAPPORT E/C DE LA PÂTE DE CIMENT SUR LA FRACTION [10 ; 20] MM	52
FIGURE 51 - RETRAIT DE LA PÂTE DE CIMENT SÉCHÉE PENDANT 30 MIN	53
FIGURE 52 - RETRAIT DE L'ENROBAGE D'AMIDON PAR L'EAU	56
FIGURE 53 - COMPARAISON DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS - FRACTION [5 ; 10] MM.....	57
FIGURE 54 - COMPARAISON DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS - FRACTION [10 ; 20] MM.....	58
FIGURE 55 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] MM - CEM I 52.5	61
FIGURE 56 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] MM - HYDROFUGE A (2E TREMPAGE)	61
FIGURE 57 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] MM - HYDROFUGE B (2E TREMPAGE).....	61
FIGURE 58 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] MM - HYDROFUGE C (2E TREMPAGE).....	62
FIGURE 59 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] MM – CHAUX.....	62
FIGURE 60 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] MM – AMIDON.....	62
FIGURE 61 - ÉPAISSEUR DES ENROBAGES EN FONCTION DU RAPPORT E/C DES MÉLANGES - FRACTION [5 ; 10] MM.....	63
FIGURE 62 - ÉPAISSEUR DES ENROBAGES EN FONCTION DU RAPPORT E/C DES MÉLANGES - FRACTION [10; 20] MM	64
FIGURE 63 - COMPARAISON DES AUGMENTATIONS MOYENNES DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS DE TYPE PÂTE - FRACTION [5 ; 10] MM	66
FIGURE 64 - COMPARAISON DES AUGMENTATIONS MOYENNES DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS DE TYPE PÂTE - FRACTION [10 ; 20] MM	67
FIGURE 65 - COMPOSANTS DU BÉTON DE GN.....	70
FIGURE 66 - MALAXEUR.....	70
FIGURE 67 - BÉTON DE GN.....	70
FIGURE 68 - ESSAI DE CLASSIFICATION DES GR.....	71
FIGURE 69 - CLASSIFICATION DES GR - FRACTION [2 ; 7.1] MM.....	72
FIGURE 70 - CLASSIFICATION DES GR - FRACTION [6.3 ; 14] MM.....	73
FIGURE 71 - COMPOSANTS DU BÉTON DE GR NON TRAITÉS.....	74
FIGURE 72 - PARTS DE 6 KG - FRACTIONS [2 ; 7.1] ET [6.3 ; 14] MM	74
FIGURE 73 - TREMPAGE DES GR DANS L'HYDROFUGE A.....	75
FIGURE 74 - TAMIS DE 2 MM	75
FIGURE 75 - SÉCHAGE À L'AIR AMBIANT.....	75
FIGURE 76 - CÔNE D'ABRAMS	77
FIGURE 77 - CLASSES DE CONSISTANCE DU BÉTON FRAIS	78
FIGURE 78 - DISPOSITIF DE MESURE À MANOMÈTRE.....	79
FIGURE 79 - TABLE VIBRANTE	79
FIGURE 80 – AFFAISSEMENTS APRÈS 0 MINUTES DU BÉTON DE GN, DU BÉTON DE GR NON TRAITÉS ET DU BÉTON DE GR TRAITÉS	82
FIGURE 81 - 18 ÉPROUVETTES PRÉPARÉES.....	83
FIGURE 82 - HUILAGE DES MOULES.....	83
FIGURE 83 - ÉPROUVETTES DANS LA CHAMBRE HUMIDE.....	84
FIGURE 84 - ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES	84
FIGURE 85 - MACHINE DE TRACTION.....	85
FIGURE 86 - RÉSISTANCES À LA TRACTION	86
FIGURE 87 - SURFACES DE RUPTURE À LA TRACTION DU BÉTON DE GR TRAITÉS, DU BÉTON DE GR NON TRAITÉS ET DU BÉTON DE GN.....	86
FIGURE 88 - MACHINE DE COMPRESSION.....	87
FIGURE 89 - RÉSISTANCES EN COMPRESSION	88
FIGURE 90 - RUPTURE À LA COMPRESSION DU BÉTON DE GN, DU BÉTON DE GR NON TRAITÉS ET DU BÉTON DE GR TRAITÉS....	88
FIGURE 91 - DEGRÉ DE CARBONATATION EN FONCTION DE L'HUMIDITÉ RELATIVE	102
FIGURE 92 - COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] ET [10 ; 20] MM APRÈS CARBONATATION.....	103
FIGURE 93 – CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM - CEM I 52.5.....	108
FIGURE 94 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM - 50 % CEM I 52.5 / 50 % CV	108
FIGURE 95 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM - HYDROFUGE A (2E TREMPAGE).....	108
FIGURE 96 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM - HYDROFUGE B (2E TREMPAGE).....	109
FIGURE 97 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM - HYDROFUGE C (2E TREMPAGE).....	109
FIGURE 98 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM – CHAUX.....	109

FIGURE 99 - CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM – AMIDON..... 110

Table des tableaux

TABLEAU 1 - TENEUR EN EAU DES DÉCHETS DE CONSTRUCTION	29
TABLEAU 2 - MASSES DES INTERVALLES DE GRANULOMÉTRIE	30
TABLEAU 3 - POURCENTAGES DE PASSANT ET DE REFUS.....	30
TABLEAU 4 - MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE (GR NON TRAITÉS)	32
TABLEAU 5 - COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU (GR NON TRAITÉS)	32
TABLEAU 6 - CONSOMMATION EN AGENTS HYDROFUGES - FRACTION [5 ; 10] MM	41
TABLEAU 7 - CONSOMMATION EN AGENTS HYDROFUGES - FRACTION [10 ; 20] MM	41
TABLEAU 8 - INFLUENCE DU RAPPORT E/C DE LA PÂTE DE CIMENT.....	51
TABLEAU 9 - INFLUENCE DU TEMPS DE SÉCHAGE DE LA PÂTE DE CIMENT SUR LA FRACTION [5 ; 10] MM	53
TABLEAU 10 - INFLUENCE DU TEMPS DE SÉCHAGE DE LA PÂTE DE CIMENT SUR LA FRACTION [10 ; 20] MM.....	53
TABLEAU 11 - INFLUENCE DU TEMPS DE SÉCHAGE DE LA PÂTE DE CIMENT ET DE CENDRES VOLANTES SUR LA FRACTION [10 ; 20] MM	54
TABLEAU 12 - INFLUENCE DU POURCENTAGE DE MATIÈRE ACTIVE SUR LES FRACTIONS [5 ; 10] ET [10 ; 20] MM.....	54
TABLEAU 13 - INFLUENCE DU 2E TREMPAGE SUR LE COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU SUR LES FRACTIONS [5 ; 10] ET [10 ; 20] MM	55
TABLEAU 14 - COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] ET [10 ; 20] MM TRAITÉS À LA CHAUX	55
TABLEAU 15 - INFLUENCE DU RAPPORT E/A SUR LES FRACTIONS [5 ; 10] ET [10 ; 20] MM.....	55
TABLEAU 16 – RÉSULTATS MOYENS OPTIMAUX – FRACTION [5 ; 10] MM	57
TABLEAU 17 - RÉSULTATS MOYENS OPTIMAUX – FRACTION [10 ; 20] MM	58
TABLEAU 18 - MOYENNE DE LA CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [5 ; 10] MM	60
TABLEAU 19 - MOYENNE DE LA CINÉTIQUE D'ABSORPTION D'EAU DES GR [10 ; 20] MM	60
TABLEAU 20 - ÉPAISSEUR DES ENROBAGES EN FONCTION DU RAPPORT E/C DES MÉLANGES	63
TABLEAU 21 - ÉPAISSEUR DE L'ENROBAGE DE CIMENT EN FONCTION DU TEMPS DE SÉCHAGE – FRACTION [5 ; 10] MM	64
TABLEAU 22 - ÉPAISSEUR DE L'ENROBAGE DE CIMENT EN FONCTION DU TEMPS DE SÉCHAGE – FRACTION [10 ; 20] MM	64
TABLEAU 23 - ÉPAISSEUR DE L'ENROBAGE DE CIMENT ET DE C.V. EN FONCTION DU TEMPS DE SÉCHAGE – FRACTION [10 ; 20] MM	65
TABLEAU 24 - ÉPAISSEUR DE L'ENROBAGE DE CHAUX E/C = 2 - FRACTIONS [5 ; 10] ET [10 ; 20] MM.....	65
TABLEAU 25 - ÉPAISSEUR DES ENROBAGES D'AMIDON - FRACTIONS [5 ; 10] ET [10 ; 20] MM	65
TABLEAU 26 - AUGMENTATIONS MOYENNES DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS - FRACTION [5 ; 10] MM	66
TABLEAU 27 - AUGMENTATIONS MOYENNES DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS DE TYPE PÂTE - FRACTION [10 ; 20] MM.....	66
TABLEAU 28 - PROPRIÉTÉS DES GN	68
TABLEAU 29 - FORMULATION DU BÉTON AVEC GN CORRIGÉE	69
TABLEAU 30 - CLASSIFICATION MOYENNE DES GR - FRACTION [2 ; 7.1] MM	72
TABLEAU 31 - CLASSIFICATION MOYENNE DES GR - FRACTION [6.3 ; 14] MM	72
TABLEAU 32 - PROPRIÉTÉS DES GR NON TRAITÉS ET DU SABLE NATUREL.....	73
TABLEAU 33 - FORMULATION DU BÉTON AVEC GR NON TRAITÉS CORRIGÉE	73
TABLEAU 34 - INFLUENCE DU NOMBRE DE TREMPAGE - FRACTION [2 ; 7.1] MM	76
TABLEAU 35 - INFLUENCE DU NOMBRE DE TREMPAGE - FRACTION [6.3 ; 14] MM	76
TABLEAU 36 - CONSOMMATION MASSIQUE EN HYDROFUGE A - FRACTIONS [2 ; 7.1] ET [6.3 ; 14] MM.....	76
TABLEAU 37 - PROPRIÉTÉS DES GR TRAITÉS ET DU SABLE NATUREL.....	77
TABLEAU 38 - FORMULATION DU BÉTON AVEC GR TRAITÉS CORRIGÉE	77
TABLEAU 39 - TENEUR EN AIR ET MASSE VOLUMIQUE MOYENNE DES TROIS TYPES DE BÉTON	82
TABLEAU 40 - MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES DIFFÉRENTS TYPES DE GRANULAT	83
TABLEAU 41 - RÉSIDENCES À LA TRACTION	85
TABLEAU 42 - MASSES VOLUMIQUES DES BÉTONS DURCIS.....	86
TABLEAU 43 - RÉSIDENCES EN COMPRESSION	87
TABLEAU 44 - PRIX À LA TONNE DES MATIÈRES PREMIÈRES	89
TABLEAU 45 - PRIX DES GR TRAITÉS À L'HYDROFUGE A.....	90
TABLEAU 46 - COÛTS DE PRODUCTION DES BÉTONS	90

TABLEAU 47 - FORMULATION BÉTON	90
TABLEAU 48 – CINÉTIQUE D’ABSORPTION D’EAU DES GR [5 ; 10] MM	105
TABLEAU 49 – CINÉTIQUE D’ABSORPTION D’EAU DES GR [10 ; 20] MM	107

Introduction

Dans un contexte de développement durable et de gestion optimale des déchets relatifs au domaine de la construction, il est primordial d'étudier les possibilités d'amélioration des procédés actuels de recyclage du béton. En effet, les déchets de construction ne cessent de croître au fil des années, à l'inverse des ressources naturelles telles que les roches sédimentaires. Recycler et valoriser ces déchets en granulats recyclés (GR) afin de créer une économie circulaire incluant la fabrication de bétons prêts à l'emploi ou de blocs préformés de type hourdis devient donc une nécessité. Cette nécessité est non seulement accentuée par le fait que le béton représente le matériau de construction le plus utilisé actuellement à travers le monde mais également par le fait que les granulats représentent une part importante dans la constitution de ce béton, avec un pourcentage volumique s'élevant à 75% du volume total du béton.

Cependant, la porosité des GR est nettement supérieure à celle des granulats naturels (GN), fabriqués à partir des ressources naturelles. De plus, la qualité et la pureté de ce matériau recyclé sont fonction du processus de traitement des déchets. Ces deux raisons font qu'il n'est pas envisageable d'employer les GR en l'état actuel, hormis pour des applications non liées en technique routière telles que les fondations et sous-fondations. De ces problématiques liées aux propriétés intrinsèques du matériau découlent plusieurs autres problématiques telles que des problématiques normatives, sociales, gouvernementales et économiques.

Plusieurs méthodes visant à influencer la porosité de surface des GR ont déjà vu le jour ; celles-ci peuvent être réparties en trois groupes distincts. Le premier comprend les études visant à effectuer un enrobage des GR, le deuxième comprend les études visant à retirer le mortier résiduel attaché aux granulats et le troisième comprend les différentes techniques de mélange lors de la fabrication du béton et conditions d'humidité des GR. Chaque méthode comporte ses atouts et ses inconvénients. Cependant, les méthodes appartenant au premier groupe, c'est-à-dire les méthodes liées à la modification de la surface des GR par enrobage, semblent être les plus performantes.

Ce travail de fin d'études se focalise donc sur la recherche d'un tel traitement dans le but d'étudier les possibilités de traiter la surface des GR en vue de diminuer l'impact de la porosité sur l'ouvrabilité et la prise du béton.

Différents produits d'enrobage sont envisagés lors de la première partie de la partie expérimentale : du ciment CEM I 52.5, un mélange constitué de 50% ciment CEM I 52.5 et de 50% cendres volantes, de la chaux, des agents hydrofuges à base de Silane (20%, 40% et 90% de matières actives) et enfin de l'amidon. Les essais à mener sur les GR, tels que la détermination du coefficient d'absorption d'eau, l'évolution de la teneur en eau au cours du temps d'immersion dans l'eau, la détermination de la masse volumique absolue et l'estimation de l'épaisseur de l'enrobage permettront de comparer l'efficacité des traitements. Au terme de cette première partie, il sera possible de répondre à la question :

Quel traitement permet de réduire la cinétique d'absorption d'eau des GR?

Si un produit d'enrobage fournit des résultats probants, il faudra étudier son influence sur les propriétés du béton frais mais aussi durci. Les études à mener sur le béton, à savoir la détermination de l'affaissement, de la teneur en air, de la masse volumique et des résistances à la compression et à la traction (après 28 jours) permettront une comparaison des propriétés des bétons. Au terme de cette deuxième partie, il sera possible de répondre à la question :

Quelle est l'influence de ce traitement sur les propriétés du béton, aussi bien frais que durci ?

Si les propriétés des bétons sont influencées positivement par le traitement des GR, il sera intéressant de réaliser un complément d'étude qui comprendra une comparaison économique des coûts de production de bétons aux propriétés identiques mais de compositions différentes (GN ou GR traités) et également une analyse de l'impact environnemental qu'aurait le traitement des GR sur les futurs déchets de béton. Ce complément d'étude permettra de répondre aux questions :

Quelle serait l'influence économique de ce traitement à l'échelle industrielle ?

Quel serait l'impact environnemental de ce traitement sur les futurs déchets de béton ?

Ainsi, ce travail de fin d'études va tenter de répondre à ces différentes questions avec le plus de précision possible.

Chapitre 1 - Etat des lieux

1.1. Développement durable

Dans une optique de respect de l'Homme et de son environnement, le développement durable permet de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [Rapport Brundtland, 1987]. Il est donc primordial de ne pas entraver les possibilités de croissance des générations futures par les activités et la croissance actuelles. L'homme doit vivre en utilisant au mieux les ressources naturelles, en évitant la pollution et le gaspillage de ces dernières.

Les trois composantes du développement durable sont l'économie, la société et l'environnement [Figure 1¹]. Economiquement parlant, l'homme doit continuer à produire et à fabriquer en suffisance. La composante sociale, quant à elle, met en avant l'égalité entre chaque individu. Et enfin, le pilier environnemental s'oriente vers la gestion optimale des ressources [section 1.2].

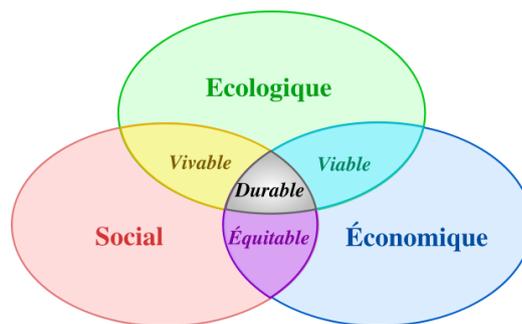


Figure 1 - Développement durable

Ainsi, une politique de développement durable réunit l'équité, la vivabilité et la viabilité. Le terme d'équité est donné ici dans le sens où nul ne doit être désavantagé vis-à-vis des autres individus. La notion de vivabilité traduit le fait que toute personne doit pouvoir bénéficier d'un cadre de vie agréable. Et finalement, un développement viable permet à l'homme d'assurer ses besoins en produisant le nécessaire tout en respectant l'environnement [ERNST D., 2012-2013].

Ce travail va s'axer sur la dimension environnementale, tant au niveau de la préservation de l'environnement, de la diminution des mises en décharges, de l'économie des ressources naturelles, de la valorisation et du recyclage.

1.2. Généralités sur la gestion des ressources

Toute activité humaine nécessite l'utilisation des ressources ou encore des matières premières offertes par la planète Terre ; alimentation, construction, transport, loisir,... Derrière le terme

¹ <http://declik.be/IMG/png/sahara.png>

utilisation se cache plusieurs concepts allant de l'extraction des matières premières à l'usage du produit fini, en passant par le transport et la transformation de celles-ci. Une étape importante succède à l'usage du produit fini : la gestion des déchets [section 1.2.1].

A chaque étape de l'utilisation des ressources, c'est à dire au cours du cycle de vie du produit, une quantité d'énergie est déployée. L'ensemble de ces énergies déployées est connu sous l'appellation d'Énergie grise. L'Énergie grise permet de quantifier l'impact d'un produit ou d'un matériau sur l'environnement, en plus de l'aspect matériel plus concret correspondant à la consommation en tant que telle. Ainsi, une gestion optimale des ressources prend en compte la consommation matérielle et l'Énergie grise associée au produit fini [COURARD L., 2011-2012].

1.2.1. Gestion des déchets

Afin de limiter l'impact environnemental lors de l'utilisation des ressources, il est nécessaire de gérer au mieux la production de déchets. C'est pourquoi il existe une échelle, appelée échelle de Lansink [Figure 2²], qui propose des solutions relatives à la gestion des déchets ; plus la solution se situe en haut de l'échelle, meilleure elle est pour l'environnement [COURARD L., 2014-2015].



Figure 2 - Echelle de Lansink

1.2.1.1. Prévention

La meilleure solution réside dans l'évitement et la limitation de la production de déchets. En effet, il convient de conceptualiser au mieux les chaînes de production afin d'éviter toute génération de déchets. De plus, les ingénieurs de conception ont le devoir d'intégrer des composants dont l'impact est limité voire nul sur l'environnement après l'utilisation du produit.

1.2.1.2. Réutilisation

La réutilisation du produit tel quel, suite à son utilisation, permet de limiter son impact sur l'environnement.

² <http://www.trotec.be/fr/durabilite/lechelle-de-lansink/>

1.2.1.3. Recyclage

Il est également possible de transformer les produits usagés afin d'en récupérer des composants clefs qui peuvent être réutilisés au même titre que les matières premières : cette méthode est appelée le recyclage. La différence entre la réutilisation et le recyclage réside dans la nécessité d'apporter de l'énergie lors du recyclage afin de transformer le produit usagé, ce qui augmente l'énergie grise du produit.

Lorsqu'il n'est pas possible de valoriser les déchets autrement qu'en énergie calorifique, il est alors possible de les utiliser comme combustibles.

1.2.1.4. Compostage

Cette échelon est relatif aux matières organiques et permet de valoriser les déchets par conversion biologique.

1.2.1.5. Incinération

Lorsqu'il n'est plus possible de valoriser les déchets, il convient de les éliminer par incinération.

1.2.1.6. Mise en décharge

Finalement, la dernière solution consiste à stocker les déchets dans une décharge. Les déchets sont cependant classés par classe : les déchets dangereux sont de classe 1, les déchets non dangereux sont de classe 2 et enfin les déchets inertes sont de classe 3. Les déchets inertes sont les déchets qui, de par leurs caractéristiques physico-chimiques, ne peuvent à aucun moment altérer les fonctions du sol, de l'air ou des eaux ni porter atteinte à l'environnement ou à la santé de l'homme [Législation relative aux sols et aux déchets, 1996].

1.2.2. Classification des déchets

Il existe trois grands groupes de déchets : les déchets ménagers, les déchets industriels et les déchets de construction et de démolition. Seulement deux groupes de déchets peuvent être valorisés dans le milieu de la construction [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013] : les déchets industriels et les déchets de construction et démolition.

1.2.2.1. Déchets industriels

Parmi ces déchets se trouvent les matériaux suivants : déchets plastiques, cendres de charbon, pneus en caoutchouc, scories, les déchets de nourriture et d'industries agricoles, déchets de pâtes et papiers, déchets de cuir, boues industrielles et déchets d'industrie minière. Certains de ces déchets peuvent être utilisés dans le milieu de la construction mais cela sort du cadre de cette étude.

1.2.2.2. Déchets de construction et démolition

C'est sur ce type de déchets que l'étude va porter. Une grande majorité des déchets de construction et de démolition sont des déchets inertes de classe 3 [Figure 3³] en Wallonie.

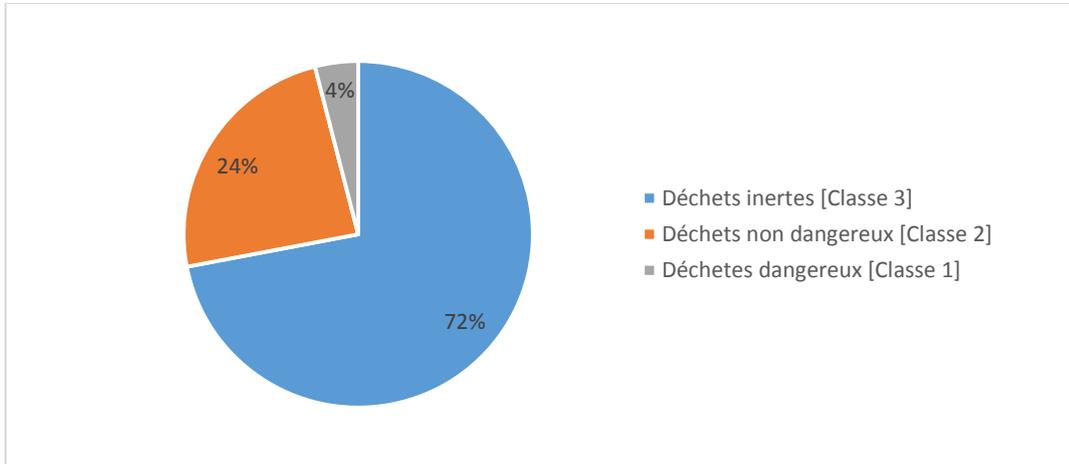


Figure 3 - Répartition des classes de déchets pour le secteur de la construction en Wallonie

Plus précisément, les classes de déchets de construction et démolition (C&D) contiennent les matériaux suivants :

- Classe 1 : Peintures, colles, ...
- Classe 2 : Céramiques (brique et tuile), métaux, bois, plastiques, matériaux bitumineux, verres, matériaux flottants.
- Classe 3 : Bétons, mortiers pierres naturelles.

D'ordre général, leur répartition est sensiblement la même selon plusieurs auteurs [Figure 4⁴] ; le pourcentage de béton et de céramique est toujours supérieur à 50% et peut même atteindre 85%.

Materials	Pereira (2002)	Costa and Ursella (2003)	Reixach et al. (2000)
	Amount in %		
Concrete and ceramics	58.3	84.3	85.0
Metals	8.3	0.08	1.8
Wood	8.3		11.2
Plastics	0.83		0.20
Bituminous concrete	10.0	6.9	
Other waste	14.2	8.8	1.8
Total	100	100	100

Figure 4 - Répartition des matériaux au sein des déchets de C&D

³ COURARD & al, Guide pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie.

⁴ DE BRITO, SAIKIA, *Recycled aggregate in concrete, Use of industrial, construction and demolition waste*, Springer, page 84.

Les déchets de béton comprennent aussi bien les débris de béton provenant de la démolition de structure que les rejets de béton frais et durs provenant de producteur de béton prêt à l'emploi, de centrale à béton ou de tout autre fabricant de produits en béton [Torben C. Hansen, 1985]. Leur origine va être détaillée dans la section suivante.

1.2.3. Origines des déchets de construction et démolition

Il existe plusieurs origines à la génération de déchets relatifs au domaine de la construction réparties en deux groupes distincts [RONDEUX M., 2014] :

1.2.3.1. Construction et déconstruction

Au sein de ce groupe, les matériaux sont volontairement triés en vue d'une réutilisation ou d'un recyclage [section 1.2.5]. Lors d'un chantier de construction, les matériaux résiduels peuvent être triés si le conducteur de chantier travaille proprement. Les causes sont le surplus de commande, l'endommagement des matériaux lors de leur transport, les pertes durant leur installation, les défauts d'exécution ou encore la réaffectation, le changement de conception,... [Vivian W.Y. Tam, 2008]

Lorsqu'une construction du génie civil doit être supprimée ou réaménagée, il est préférable de la déconstruire tant d'un point de vue environnemental que d'un point de vue économique. L'avantage principal est l'opération de tri préalable au transport vers une décharge ou une station de recyclage. Ce n'est toutefois pas toujours réalisable, que ce soit financièrement parlant ou par manque de temps.

1.2.3.2. Démolition (volontaire ou non)

Auparavant, lorsque le recyclage et la conservation de l'environnement n'était pas à l'ordre du jour, les entrepreneurs démolissaient les constructions du génie civil et transportaient les déchets vers la décharge, sans se soucier d'une éventuelle réutilisation ou d'un éventuel recyclage. La cause principale de la démolition est la nécessité de supprimer les structures et bâtiments anciens lorsqu'ils atteignent leur limite d'utilisation et qu'une opération de réparation est impossible [Nik Oikonomou, 2005]. Une autre cause est le terrorisme.

En ce qui concerne la démolition involontaire, celle-ci peut provenir de catastrophes naturelles comme par exemple le tremblement de terre Chi-Chi, qui a eu lieu à Taiwan en 1999, et qui a généré environ 15 à 20 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition [Yeong-Nain Sheen & al., 2013].

Le résultat obtenu, que la démolition soit volontaire ou involontaire, est le même : les déchets résiduels obtenus sont constitués de matériaux mélangés, non triés.

Qu'en est-il des quantités de déchets de C&D ?

1.2.4. Déchets de C&D dans le monde

D’après [Vivian W.Y. Tam & al., 2007], les déchets de C&D occupent un pourcentage qui oscille entre 15% et 70% du total des déchets dans le monde [Figure 5⁵].

Country	Proportion of construction waste to total waste (%)
Australia	44
Brazil	15
Denmark	25–50
Finland	14
France	25
Germany	19
Hong Kong	38
Japan	36
Italy	30
Netherlands	26
Norway	30
Spain	70
United Kingdom	Over 50
United States of America	29

Figure 5 - Proportions des déchets de C&D à travers le monde

D’après [N. Oikonomou, 2005], les déchets de béton représentent 40% des déchets de C&D [Figure 6].

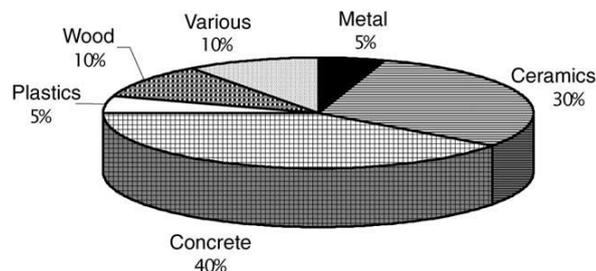


Figure 6 - Répartition des matériaux au sein des déchets de C&D

D’après [Jiusu Li & al., 2008], les Etats-Unis produisent environ 30 million de tonne de déchets de béton chaque année. La ville de Shanghai en produit quant à elle 20 millions de tonne par an. Selon [Ya-Guang Zhu & al., 2012], la région de Hong Kong en Chine a produit 12 million de tonnes de déchets de C&D en 2009. Parmi cette masse de déchets, il y aurait environ 90% de matériaux inertes comme de la roche, du béton ou encore de la terre.

⁵ **TAM**, Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis.

⁶ **OIKONOMOU**, Recycled concrete aggregates.

En ce qui concerne l'Europe, il se trouve qu'environ 33% de la production totale de déchets est constituée de déchets de C&D [Figure 7]. Ces chiffres sont relatifs à l'année 2011.

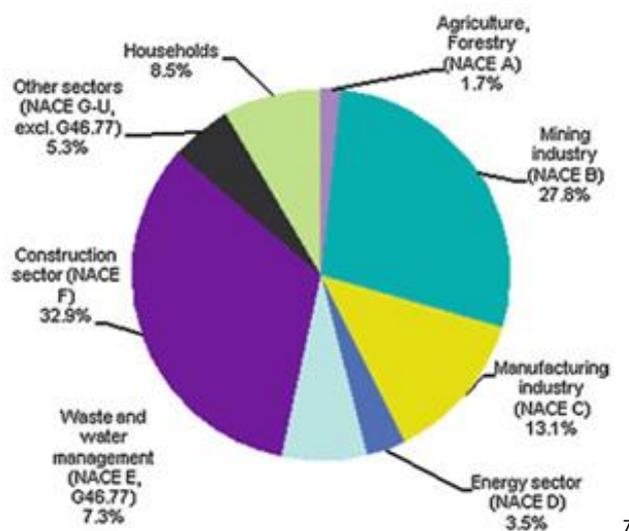


Figure 7 - Répartition des déchets en Europe

D'après [Jiusu Li & al., 2008], la communauté économique européenne a triplé sa production de déchet de béton au cours des 30 dernières années, passant de 55 millions de tonnes par an en 1980 à 162 million de tonne par an en 2005. D'après [Fisher & Werge 2009], pas moins de 850 millions de tonnes de déchets de C&D sont générés dans l'Union Européenne par an, soit 31% de la production globale de déchets.

En Belgique, d'après le site [Statbel], les déchets de construction n'ont cessé d'augmenter entre 2004 et 2012 [Figure 8⁸]. Ils ne représentent toutefois pas la part la plus importante, même s'ils représentent tout de même 37 % du total des déchets en 2012.

Production des déchets par secteur en Belgique (2006-2012, en tonnes)	2004	2006	2008	2010	2012
Total	53.585.527	60.425.250	48.621.916	62.537.279	66.932.694
Construction	11.037.964	13.174.365	15.441.861	18.164.909	24.570.406
Services	5.702.578	10.649.689	4.402.159	5.130.876	4.711.700
Ménages	5.325.279	4.746.437	4.459.161	4.678.684	5.003.527
Industrie	30.323.220	31.488.720	24.031.079	34.331.778	32.434.694
Agriculture	1.196.486	366.040	287.656	231.033	212.367

Figure 8 - Répartition des déchets en Belgique entre 2004 et 2012

Les déchets de C&D représentent donc une quantité non négligeable de déchets à travers le monde. Il est donc important de les gérer au mieux afin de limiter leur impact environnemental. Il est donc préférable que les solutions apportées se situent le plus haut possible sur l'échelle de

⁷ DE BRITO, SAIKIA, *Recycled aggregate in concrete, Use of industrial, construction and demolition waste*, Springer, page 16.

⁸ <http://statbel.fgov.be/fr/statistiques/chiffres/environnement/dechets/production/>

Lansink [section 1.2.1]. L'adaptation de cette échelle au domaine de la construction peut amener certaines réponses.

1.2.5. Economie circulaire et adaptation de l'échelle de Lansink

Afin de minimiser et gérer la quantité de déchets, certaines solutions ont déjà été proposées. Ces solutions peuvent être réparties sur l'échelle de Lansink et font parties intégrantes de l'économie circulaire [Figure 9] propre au domaine de la construction.

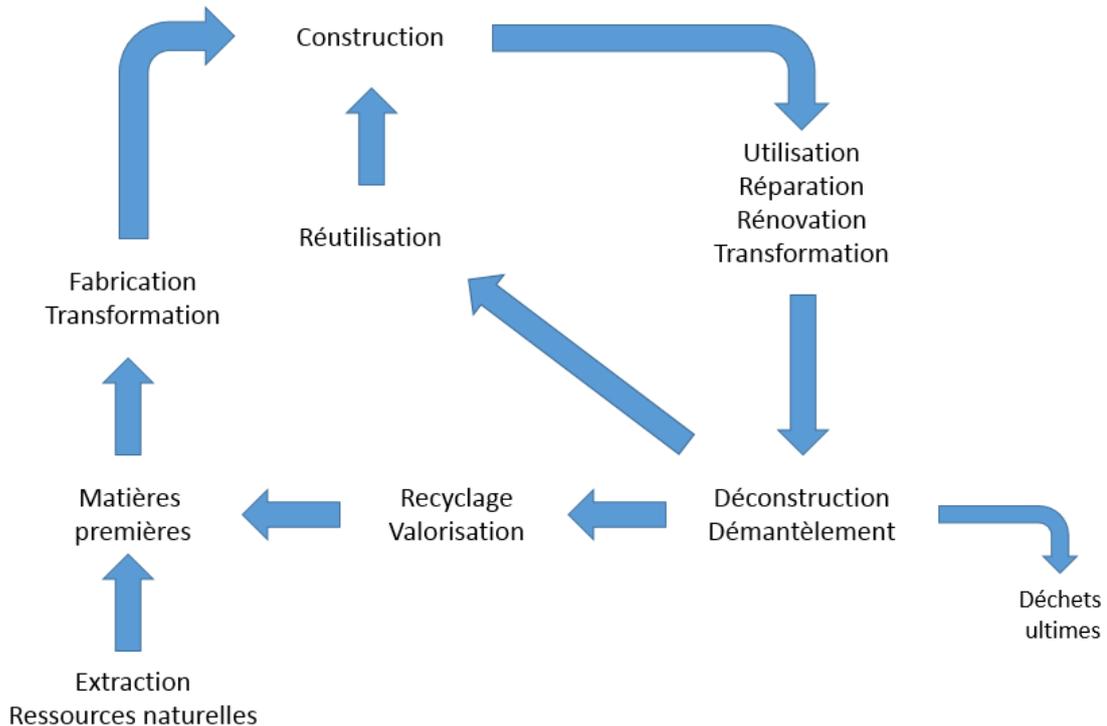


Figure 9 - Economie circulaire des déchets inertes relatifs au domaine de la construction

1.2.5.1. Prévention

Il est important de limiter au maximum l'utilisation des matières premières et de ne pas déjeter.

1.2.5.2. Réutilisation

La réutilisation provient de l'idéologie de déconstruction, plutôt que de la démolition. Par exemple, les constructions mixtes permettent une bonne réutilisation des matériaux. Les poutres, les colonnes et dalles sont assemblées avec des assemblages pouvant être récupérés, de telle sorte que la structure peut être démontée sans recourir à la démolition [DEMONCEAU, 2013-2014].

1.2.5.3. Recyclage

Le recyclage est un bon compromis vis-à-vis du développement durable et va être développé dans cette étude. En Europe, le taux de recyclage des déchets inertes valait 80 % en 2014. Ce taux a atteint 85 % en Wallonie depuis 2014 suite à la directive européenne 2008/98/CE [COURARD & al., 2015]. Le recyclage offre trois bénéfices d'une importance capitale :

Réduire la demande en ressources

Cet aspect peut être utile pour les endroits où les ressources en matière première se font de plus en plus rares. D'après [N. Oikonomou, 2005], la construction prend 50% des matières premières de la nature. Ce bénéfice permet donc de faire face à l'épuisement des ressources naturelles, ce qui est indispensable d'un point de vue environnemental.

Réduire les coûts liés au transport et à la production

Pour les endroits éloignés des sites de production de matériaux naturels (comme la région flamande dans le cas de la Belgique [Rondeux M., 2014]), il est parfois très onéreux d'importer des ressources naturelles, puisque celles-ci ne sont pas disponibles à proximité des chantiers de construction. De plus, les centres d'enfouissement peuvent parfois être éloignés des sites de démolition, puisque pour des raisons environnementales, le nombre de sites de décharges sont de moins en moins accessibles autour des grandes villes à travers le monde. [Torben C. Hansen, 1985]. C'est pourquoi recycler peut être économiquement plus intéressant si :

- D'une part, les coûts de production et de transport des matériaux recyclés vers le chantier de construction sont inférieurs au coût d'achat et de transport des ressources premières éloignées de ce chantier
- D'autre part, les coûts de transport et de production des matériaux recyclés sont inférieurs au coût de transport vers les centres d'enfouissement et les coûts de stockage des déchets dans ceux-ci.

L'enjeu pour les stations de recyclage est donc de produire les matériaux recyclés à moindre coût, afin d'attirer les entrepreneurs.

Diminuer la quantité de déchets envoyés dans les décharges

Les centres d'enfouissement se font de plus en plus petits. En effet, avec l'accroissement de la population et une urbanisation de plus en plus étendue, la quantité de déchets relatifs à la construction est de plus en plus importante au fil du temps. De plus, les arrêtés gouvernementaux sont de plus en plus stricts vis-à-vis du stockage des déchets inertes

1.2.5.4. Stockage

Depuis le 18 mars 2004, il est interdit de stocker les déchets inertes et valorisables dans les décharges en Wallonie. Ce travail de fin d'étude s'intéresse précisément à la valorisation de ce type de déchets permettant leur recyclage.

1.2.6. Conclusion

Ces informations relatives à la gestion des ressources montrent que pour s’inscrire dans une politique de développement durable, l’homme doit apprendre à gérer ses déchets. Les quantités de déchets de C&D générées à travers le monde nécessitent un traitement approprié. De plus, au vu de la répartition des matériaux au sein de ces déchets de C&D, le béton s’avère être un élément fondamental. Le recyclage est prometteur mais nécessite des améliorations. Qu’en est-il du recyclage du béton ?

1.3. Généralités sur le béton et son recyclage

1.3.1. Le béton

Le béton, créé par l’homme, est le matériau de construction le plus utilisé à travers le monde depuis son invention. Ceci est dû à ses propriétés mécaniques, à sa durabilité, son rapport coût-efficacité et à sa disponibilité [C. Medina & al., 2013]. À l’échelle mondiale, ce sont environ trois tonnes de béton qui sont utilisées chaque année par personne. Le béton comprend trois composés principaux, à savoir : des granulats (qui représentent à eux seuls 75% du volume total du matériau), un liant (qui n’est autre que le ciment) et de l’eau [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013] [Figure 10⁹].

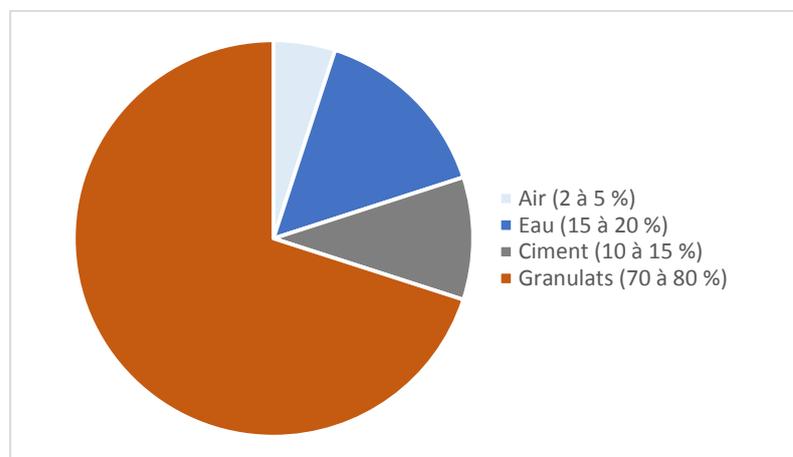


Figure 10 - Composition du béton en volume

Au vu de l’importance qu’occupent les granulats dans la composition d’un béton, et de la quantité astronomique de béton consommée chaque année, il semble tout à fait opportun de proposer plusieurs sources et divers moyens de produire ces granulats. Une source ne cesse d’accroître sa quantité disponible, contrairement aux ressources naturelles non-renouvelables : les déchets de construction.

⁹ GHEYSENS, VANDEWALLE & al., Technologie du béton.

1.3.2. Les granulats recyclés

Au vu des proportions importantes de déchets de béton, il semble opportun de tenter de les valoriser afin de pouvoir les réutiliser. Cette valorisation aboutit à la formation des granulats dits recyclés. Leur préparation s'effectue dans des stations de recyclage, mobiles ou fixes, où les déchets d'éléments en béton subissent une série d'opérations [Figure 11¹⁰] : après une première inspection, ils sont grossièrement mécaniquement broyés en des morceaux de petite taille via des broyeurs ; ils passent au travers d'un premier tamis à sec. Ils passent ensuite dans un séparateur magnétique permettant de retirer les armatures métalliques, puis sont placés sur un tapis afin de subir une séparation manuelle des impuretés (cette étape peut être couplée à un passage en piscine permettant de séparer les corps flottants ou encore en soufflerie). Ces morceaux sont finalement amenés dans un second broyeur mécanique et répartis en fonction de leur taille maximum (c'est à dire par granulométrie) par criblage hydraulique mécanique [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013].

Ces opérations peuvent varier en fonction de la composition initiale des déchets et des exigences du produit final [C. Medina & al., 2013].

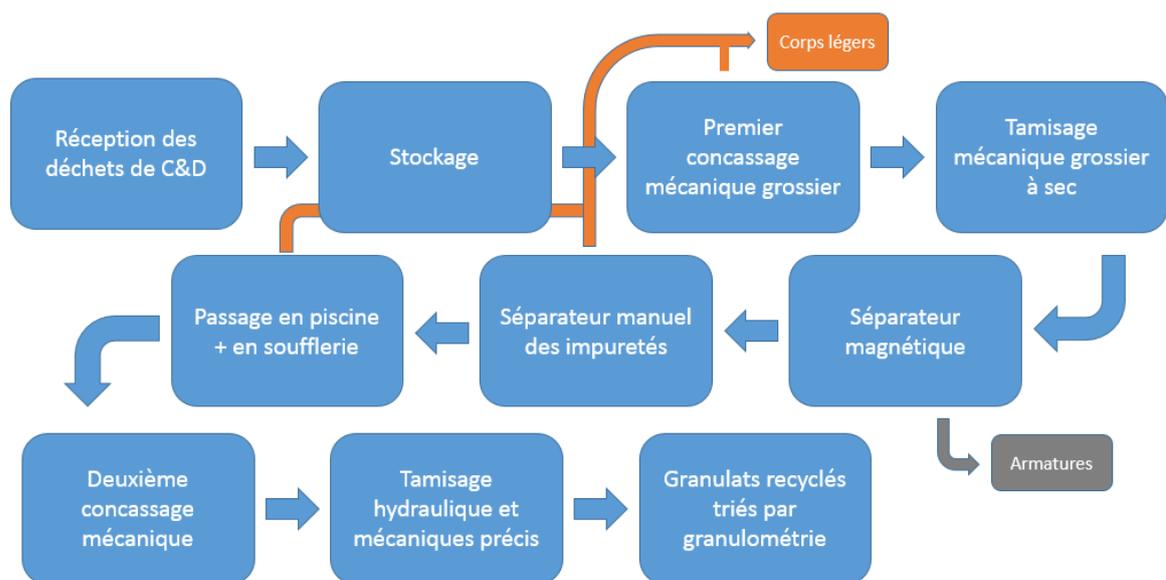


Figure 11 - Installation de recyclage des déchets inertes

Les granulats recyclés (GR) sont donc finalement répartis en fonction de leur taille maximum. Ceux-ci peuvent être répartis en deux catégories distinctes [Z. Zhao, 2015] :

- Granulats fins < 5 mm
- 5 mm < Granulats grossiers

Le processus de production est une étape importante car il affecte directement la qualité et la composition des GR [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013]. Il existe une certaine classification

¹⁰ TAM, « Economic comparison of concrete recycling: A case study approach.

permettant de quantifier cette qualité, qui est fonction de la composition. En Belgique, il existe trois catégories :

1.3.2.1. Recyclés de béton (35%)

Cette catégorie doit être constituée d'au minimum 90% de déchet de béton [Yeong-Nain Sheen & al., 2013] [Figure 12¹¹].

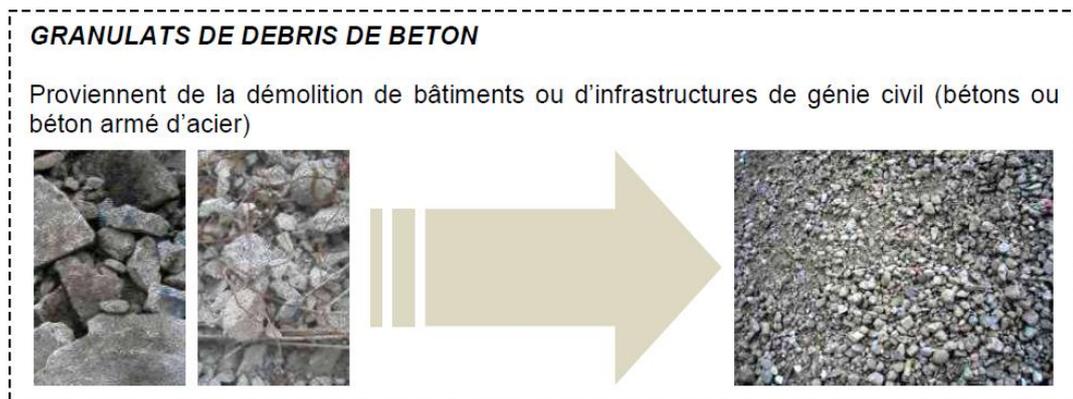


Figure 12 - Granulats recyclés de béton

1.3.2.2. Recyclés mixtes (36%)

Cette catégorie doit être constituée d'au maximum 30% de déchet de céramique [SHEEN & al., 2013] [Figure 13¹²].

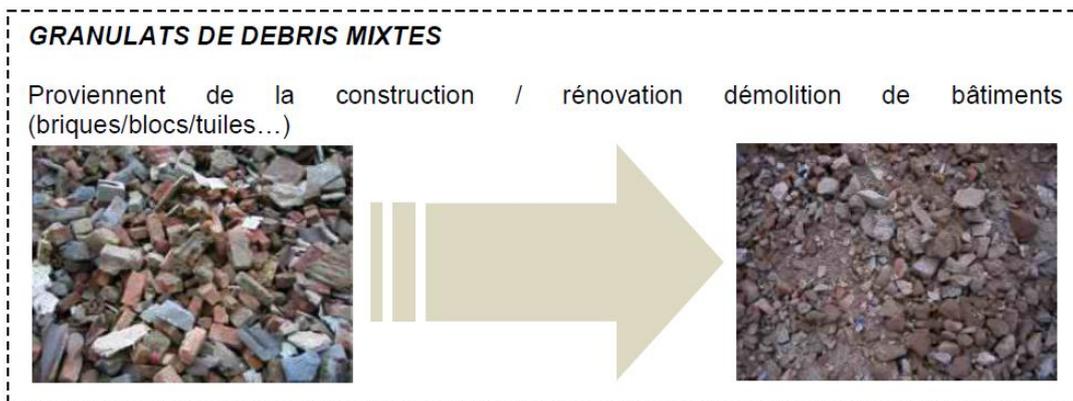


Figure 13 - Granulats recyclés mixtes

¹¹ www.bruxellesenvironnement.be, Fiche 4.1 L'utilisation de granulats issus du recyclage

¹² www.bruxellesenvironnement.be, Fiche 4.1 L'utilisation de granulats issus du recyclage

1.3.2.3. Recyclés d'enrobés hydrocarbonés (7%)

Cette catégorie provient du recyclage des chaussées, composées de bitume [Figure 14₁₂].

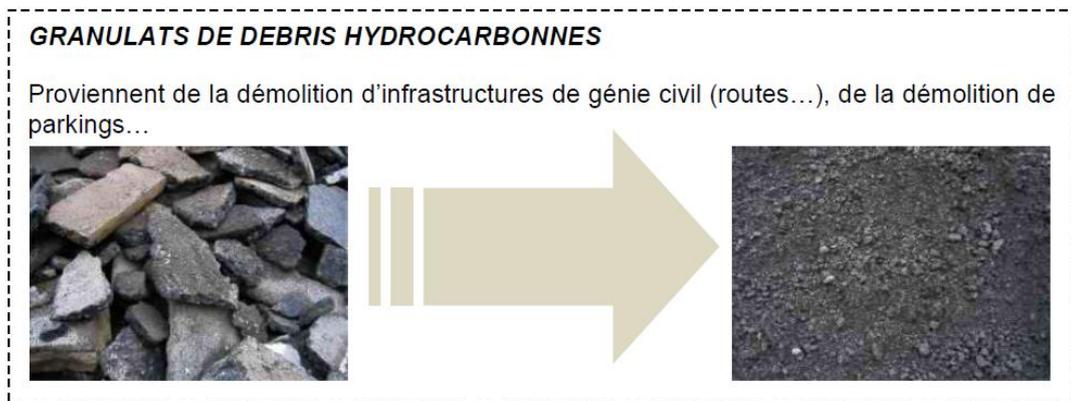


Figure 14 - Granulats recyclés de bitume

Le reste du pourcentage est détenu par le sable de pré criblage (à hauteur de 19%) et recyclés de maçonnerie (3%). [Rondeux M., 2014]

A l'heure actuelle, ces GR sont principalement employés dans la construction des fondations de route, car leurs propriétés ne permettent pas de les employer comme substitut total aux granulats naturels (GN) dans les structures portantes [ZHAO, 2015].

1.3.3. Production de granulats recyclés en Europe

En Europe, plusieurs catégories de granulats sont produites : les granulats réemployés sur site, les GR par des installations fixes et mobiles, les granulats marins, les GN concassés et les sables et graviers. La production des différentes catégories de granulats en Europe [Figure 15], datant de 2012, montre que la production de GR par rapport à la production de GN est quasiment négligeable. La Belgique a produit environ 15 millions de tonnes de GR cette année-là, ce qui représente un peu moins de 20% de la production totale.

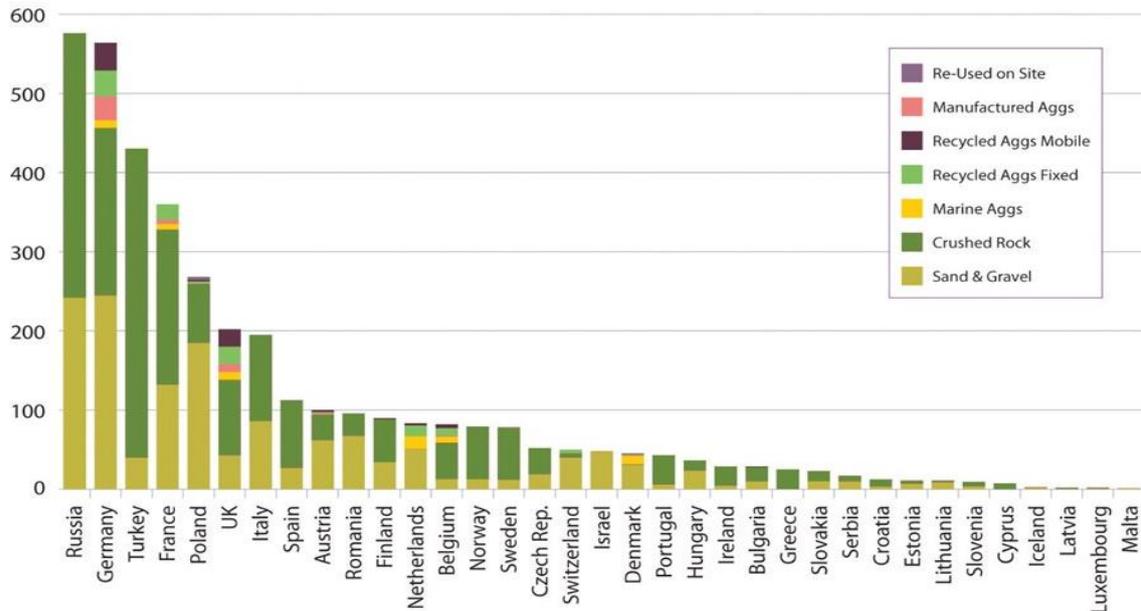


Figure 15 - Production en millions de tonnes des différentes catégories de granulats en Europe en 2012

1.3.4. Conclusion

Les procédés de recyclage sont donc intimement liés à la qualité et à la composition des GR. Les GR ne sont pas vraiment valorisés. De plus en Europe, leur quantité de production est presque négligeable par rapport à la quantité de production des GN. Quelles en sont les raisons ? Pourquoi les pays ne fabriquent-ils pas plus de GR ? Pourquoi Les GR ne sont-ils pas valorisés autrement que pour les fondations de route ?

1.4. Problématiques liées à l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication de béton

Il se trouve qu'il existe plusieurs problématiques liées à l'utilisation de GR dans la fabrication de béton [M. Rondeux, 2014]. Ces problématiques sont non seulement dues aux propriétés intrinsèques du matériau, mais elles sont également normatives, sociales, gouvernementales et économiques. Celles-ci sont bien entendu liées mais leur distinction permet une meilleure compréhension de leur contenu.

1.4.1. Problématiques liées aux propriétés du matériau

Afin de comprendre les problématiques liées au matériau, il est nécessaire de commencer par lister les propriétés liées aux GR eux même. Ensuite, les propriétés des bétons de GR frais seront établies. Et finalement, les propriétés des bétons de GR durcis seront abordées, permettant ainsi de connaître l'ensemble du cycle de vie du matériau.

1.4.1.1. Granulats recyclés

Les caractéristiques intrinsèques du granulat de béton recyclé sont moindres que celles du granulat naturel/d'origine qu'il remplacerait dans les bétons. Ce fait est principalement dû à sa

composition, qui elle-même dépend de deux choses : la qualité des déchets et la qualité du processus de traitement. En effet, la composition des déchets est différente selon leur provenance mais également selon le mode de déconstruction permettant de les obtenir [Section 1.3.2]. De plus, le processus de traitement joue un rôle primordial dans la composition finale du GR. Quelle est la différence au niveau de la composition entre les GR et les GN ?

Lorsque les granulats sortent de la station de recyclage, ceux-ci sont composés de GN qui sont souvent recouverts de pâte de mortier [Figure 16].

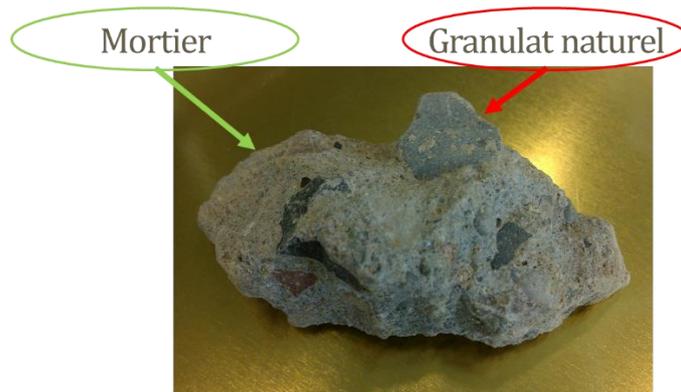


Figure 16 - Composition d'un granulat recyclé de béton

Il arrive que des quantités mineures d'autres substances telles que le gypse, le bois, la céramique, le plastique, le caoutchouc, le métal, le verre et des matériaux flottants se retrouvent également attachés aux GN [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013]. En plus de substances physiques inadéquates, il peut y avoir présence de contaminants chimiques, comme des ions de chlorures, du gaz carbonique, des sulfates ou encore des silicates. Ces substances peuvent provenir respectivement d'attaques aux ions chlorures, de carbonatation, d'attaques aux acides sulfuriques et de réactions alcali-silice [L. Courard, 2014]. Ces impuretés (qu'elles soient physiques ou chimiques) ont plusieurs effets néfastes, ce qui rend les GR impropres à la production de béton.

Impuretés

D'après [Torben C. Hansen, 1985 et Z. Zhao, 2015], les impuretés ont les effets suivants sur le béton :

- Les particules bitumineuses induisent une diminution de la résistance mécanique du béton durci.
- Le gypse peut générer des fissures dans le béton durci. En effet, si l'eau s'infiltré à travers la porosité ouverte et entre en contact avec le gypse, ce dernier va rentrer en expansion à cause des sulfates qui le composent.
- Les substances organiques, comme le bois, le tissu, le papier et le plastique peuvent également induire des fissures dans le béton durci à cause de leur variation de volume en présence d'eau. De plus, ces matériaux peuvent entraîner de l'air dans le béton s'ils sont soumis au cycle gel/dégel.

- Les chlorures peuvent mener à la corrosion d'armatures, phénomène qui peut induire des fissures dans le béton durci à cause du nouveau volume occupé par la rouille.
- Les particules de métal peuvent induire des phénomènes de ségrégation lors de la prise du béton frais. De plus, elles peuvent diminuer la cohésion et augmenter l'acidité des bétons durcis.
- Le verre, principalement constitué d'oxyde de silicium (SiO₂), peut être à la base d'une réaction alcali-silice avec les alcalins présents dans la pâte de ciment.
- Le caoutchouc peut influencer le module de rigidité du béton durci, en le diminuant fortement.
- Le gaz carbonique va influencer le PH du béton (le faire passer de 13 à 8). Vu que le béton deviendra plus acide, il engendrera un risque de dé-passivation des armatures.

Par conséquent, les impuretés présentes dans les déchets de C&D doivent être séparées pendant le procédé. Afin de limiter leur présence, la méthode de déconstruction sera préférable vis-à-vis de la méthode de démolition [Section 1.2.3]. L'impureté la plus couramment présente et la plus tenace, qui n'a pas encore été détaillée, est celle qui pose le plus de problème lors de la préparation des matériaux recyclés de béton. Cette dernière n'est autre que le mortier.

La qualité et la quantité de mortier attaché au granulats naturels influence fortement les propriétés physiques des GR de béton. Rappelons que le mortier est un mélange durci de ciment, d'eau et de granulats fins traditionnels de moins de 4 mm à 5 mm [Torben C. Hansen, 1985]. C'est un matériau poreux dont la porosité dépend du rapport eau/ciment (w/c) adopté. En général, la quantité de mortier attaché augmente avec la diminution de la taille des GR. D'après [Hansen, Narud, 1983], le pourcentage en volume du mortier attaché au GN est de :

- 25% à 30% pour les GR grossiers de granulométrie 16-32 mm
- 40% pour les GR grossiers de granulométrie 8-16 mm
- 60% pour les GR grossiers de granulométrie 4-8 mm

Ainsi, plus la granulométrie est fine et plus le pourcentage en volume du mortier attaché au GN est important [Zhao & al., 2013]. Il est à noter que la procédure de concassage peut influencer la quantité de mortier attaché. C'est à cause de ce mortier attaché que les GR de béton ont une densité inférieure et une absorption d'eau plus élevée que les GN [S. Manzi & al., 2012].

Densité

La densité des GR de béton est généralement inférieure à la densité des GN. Ceci est dû au mortier attaché au granulats naturels de base qui est moins dense que ce dernier. La variation de la densité provient donc de cet ensemble. Une étude menée par [Limbachiya & al., 2000] a montré que la densité apparente des GR (à l'état saturé mais superficiellement sec) est d'environ 7 à 9% plus faible que celle des GN. [Sagoe Crentsil & al, 2001] ont déterminé des masses volumiques absolues de 2394 kg/m³ et de 2890 kg/m³ respectivement pour les GR et les GN, soit une différence d'environ 17% [Katrina McNeil & al., 2012]. Ainsi, plus le GR de béton contient du mortier résiduel et plus sa masse volumique apparente est faible [Figure 17¹³].

¹³ DE BRITO, SAIKIA, *Recycled aggregate in concrete, Use of industrial, construction and demolition waste*, Springer.

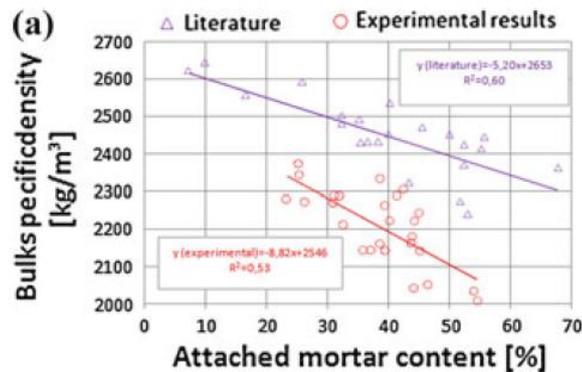


Figure 17 - Relation entre la masse volumique apparente et la quantité de mortier attaché

Absorption d'eau et porosité

C'est la problématique qui fait l'objet de cette étude. L'absorption d'eau et la porosité sont deux caractéristiques des GR de béton liées. Elles sont également dues à la présence de résidus de mortier. Les GN ont généralement une absorption d'eau faible en raison de leur porosité faible, mais le mortier attaché aux GR a une plus grande porosité qui lui permet de retenir plus d'eau dans ses pores que les GN [Katrina McNeil & al., 2012]. Il existe ainsi une relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier résiduel [Figure 18¹⁴].

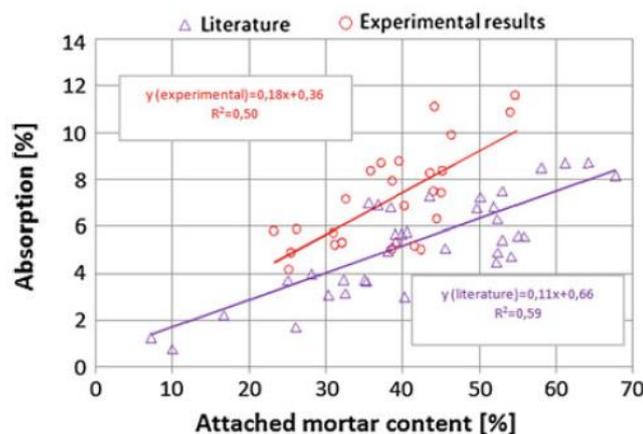


Figure 18 - Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché

Shayan et Xu (2003) ont trouvé des valeurs d'absorption d'eau de 0,5 à 1% pour les GN et de 4 à 4,7% pour les GR de béton à l'état saturé mais de surface sèche. La différence peut atteindre près de 4,2%. D'autres études ont montré des différences où le coefficient d'absorption d'eau des GR de béton était de 5,6 % et de 5.2% par rapport à un coefficient d'absorption d'eau des GN de 1,0

¹⁴ DE BRITO, SAIKIA, *Recycled aggregate in concrete, Use of industrial, construction and demolition waste*, Springer.

% et 2,5% (Sagoe-Crentsil et al., 2001; Limbachiya et al., 2000). Ces auteurs n'ont cependant pas précisé la quantité d'impuretés présentes ainsi que les intervalles de granulométrie considérés.

Granulométrie

La distribution granulométrique des GR de béton grossiers et fins est généralement différente des fractions correspondantes aux GN. Cependant, dans les stations de recyclage et dans plusieurs études, le GR de béton est produit en adoptant des procédés de broyage et de criblage. Par conséquent, les GR de béton se situent tout de même entre les limites granulométriques nécessaires à la préparation du type de béton requis [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013].

L'abrasion Los Angeles

La valeur d'abrasion des granulats correspond au pourcentage de perte de poids résultant de l'abrasion. Ainsi, une valeur élevée de l'abrasion indique une faible résistance à l'abrasion. L'essai le plus utilisé à travers le monde pour déterminer la valeur d'abrasion est l'essai d'abrasion Los Angeles. Selon la norme ASTM C-33, « spécification standardisée pour les granulats de béton », la valeur d'abrasion Los Angeles doit être inférieure à 50% pour les granulats utilisés pour la fabrication de béton, et doit être inférieure à 40% pour les granulats destinés aux revêtements routiers [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013]. La quantité de mortier attaché aux GN est liée à l'augmentation de l'abrasion Los Angeles [Figure 19¹⁵]. Ce qui s'explique par le fait que le mortier attaché se détache facilement à cause de l'ITZ existant entre le GN et ce dernier.

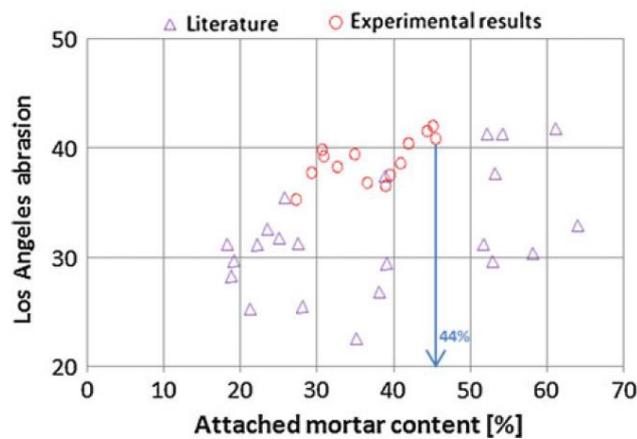


Figure 19 - Relation entre l'abrasion Los Angeles et la quantité de mortier attaché

1.4.1.2. Bétons de granulats recyclés frais

Ouvrabilité

La conséquence la plus importante de l'utilisation de GR sur les bétons frais est l'influence de leur ouvrabilité. En effet, pour un rapport eau/ciment identique, l'ouvrabilité d'un béton réalisé à base

¹⁵ DE BRITO, SAIKIA, *Recycled aggregate in concrete, Use of industrial, construction and demolition waste*, Springer.

de GR sera inférieure à l'ouvrabilité d'un béton réalisé exclusivement à base de GN. [Mukai, 1978] a montré que pour atteindre le même affaissement qu'un béton de référence réalisé à base de granulats grossiers et sable naturels, un béton réalisé à base de granulats grossiers recyclés et de sable naturel requiert 5% d'eau supplémentaire lors du mélange. Dans le cas où le béton contient aussi bien des granulats grossiers recyclés que des granulats fins recyclés, il requiert 15% d'eau supplémentaire pour atteindre le même affaissement que le béton de référence. Des résultats similaires ont été obtenus par d'autres auteurs, comme [Buck, 1977], [Frondistou-Yannas, 1977], [Malhotra, 1978], [Hansen et Narud, 1983] et [Ravindrarajah et Tam, 1985].

Cette conséquence est due au taux d'absorption d'eau des GR plus important. Un taux élevé d'absorption d'eau par les granulats va induire un taux élevé de perte d'affaissement du béton frais au cours du temps. Autrement dit, la prise initiale du béton va être accélérée [J. S. Ryou, Y. S. Lee, 2013]. Cela va engendrer des problèmes liés au transport de béton frais. Rappelons que le transport de béton frais par camion est réalisé lorsqu'il n'est pas possible d'implanter une centrale à béton à proximité du chantier.

Teneur en air

La présence d'une certaine quantité de bulles d'air emprisonnée dans le mélange de béton a plusieurs effets positifs sur le béton frais et durci. Dans le béton frais, une teneur en air d'environ 3% peut réduire la demande en eau du béton et rendre ainsi le mélange plus adhérent, ce qui aide à réduire les phénomènes de ségrégation et de saignement. Cependant, pour une teneur en air supérieur à 3%, la viscosité du mélange devient telle que la finition du béton se voit complexifiée. Les bétons réalisés à base de GR présentent une teneur en air supérieure à 3% [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013].

1.4.1.3. Bétons de granulats recyclés durs

En général, en comparaison au béton contenant 100% de GN, l'utilisation de GR augmente le retrait de séchage, le fluage, le taux de carbonatation et la sorptivité. Par ailleurs, elle diminue la résistance à la compression, le module d'élasticité et la résistance au cycle gel/dégel [Shi-cong Kou, Chi-sun Poon, 2014].

Résistance à l'usure

La résistance à l'usure est donc un facteur fortement diminué par l'utilisation des GR. De nombreuses études l'ont démontré :

Le retrait augmente de 60% par rapport à un béton constitué de GN selon [Hansen, Boegh, 1985], et de 70% après 180 jours pour un béton composé de 100% de GR d'après [Domingo-Cabo, 2009].

Lors du séchage du béton contenant des GR, l'absorption d'eau est supérieure à celle observée par un béton composé de GN. Après 3, 7, 28 et 56 jours, l'absorption d'eau augmente respectivement de 47,3%, 43,6%, 38,5% et de 28,8% selon [Olorunsogo, Padayachee, 2002].

La profondeur de carbonatation d'un béton contenant des GR vaut le triple de la profondeur observée sur un béton constitué de GN et réalisé dans les mêmes conditions d'après [Cui, 2006]. Après 6 mois de séchage, la profondeur de carbonatation du béton de GR est 1,3 à 2,5 fois supérieure à celle observée pour un béton de référence. Une autre étude montre que la résistance

face à l'attaque aux ions chlorés et à la carbonatation est légèrement inférieure à la résistance observée pour un béton constitué de GN, réalisé avec le même rapport eau/ciment selon [Otsuki, 2003]. Une autre étude, menée par [Olorunsogo, Padayachee, 2002], a montré qu'un béton contenant 100% de GR voit sa conductivité relative aux chlorures augmenter de 73,2% après 28 jours de prise.

Performances mécaniques

La résistance mécanique des bétons constitués de GR est, de manière générale, moindre que celle des bétons constitués de GN, toutes choses égales par ailleurs. Cependant, les différences de résistance observées à la traction et à la flexion sont moins significatives que celles observées à la compression [Jorge de Brito, Nabajyoti Saikia, 2013]. De nombreux chercheurs ont déterminé le pourcentage de réduction de la résistance à la compression [Figure 20¹⁶], et celle-ci oscille entre 10 et 40 %.

References	Type of aggregate	Reduction in strength, (substitution level %)	Comment
Oliveira and Vasquez (1996)	Coarse/RCA	10	Varied depending on moisture content in RCA aggregate
Topçu and Sengel (2004)	Coarse/RCA	23.5 33	C16 type concrete C20 type concrete
Sani et al. (2005)	Coarse/fine/RA	40	At constant water to cement ratio
Gomez-Soberon (2002)	Coarse/RA/10 min pre-soaked in water	~ 2, (15) ~ 5, (30) ~ 11.5, (100)	Substitution level (v/v): 15, 30 and 100 %
Kou and Poon (2008)	Coarse/RCA/SSD ^a	4–6, (20) 13–17, (50) 16–22, (100)	Substitution level (v/v): 20, 50 and 100 %; strength decreasing with increasing mortar content;
Khatib (2005)	Fine/RCA	~ 24.5–25, (25–75) ~ 36, (100)	Substitution level (w/w): 25, 50, 70 and 100 %; prepared at free water to cement ratio of 0.5
Yang et al. (2011)	Coarse/RCA	5.7, (100)	Prepared at w/c of 0.47 with a slump of 24 mm

^a SSD Saturated surface dry

Figure 20 - Pourcentage de réduction de la résistance en compression liée à l'utilisation de GR

La résistance mécanique du béton dépend directement de la zone de transition à l'interface entre le granulat et la pâte de ciment (ITZ), point faible du béton. L'ITZ comporte une plus forte porosité et donc une résistance mécanique plus faible que le reste de la pâte de ciment [L. Courard, 2010]. La particularité des bétons constitués de GR réside dans l'existence de types d'ITZ : l'ancienne ITZ entre l'ancienne pâte de mortier et le granulat naturel et la nouvelle ITZ entre la nouvelle pâte de mortier et les granulats, recyclés ou non [Jianzhuang Xiao & al., 2013]. La résistance du béton constitué de GR dépend donc à la fois de la qualité de la nouvelle ITZ mais également de l'ancienne

¹⁶ DE BRITO, SAIKIA, *Recycled aggregate in concrete, Use of industrial, construction and demolition waste*, Springer.

ITZ. Cette résistance dépend de la nouvelle ITZ lorsque la qualité de l'ancienne ITZ lui est supérieure. Autrement dit, la qualité de l'ancienne ITZ influence pleinement la résistance du béton [Xiao JZ & al., 2012]. D'où l'importance de la qualité des déchets et la qualité du processus de traitement de ceux-ci.

1.4.2. Problématiques normatives

Chaque pays à travers le monde a ses propres normes concernant l'utilisation des matériaux recyclés, et plus précisément des GR. Les normes actuelles consistent à limiter leur utilisation dans la fabrication de constructions structurelles, que ce soit au niveau de leur taux d'incorporation ou de leur classe. Cette limitation d'utilisation est néanmoins différente selon les pays. Par exemple en Belgique, d'après [MATRIciel, 2010], le taux d'incorporation des GR de béton est limité à 20% pour les bétons intérieurs et en milieu non agressif (restriction suivant norme BENOR)¹⁷.

1.4.3. Problématiques sociales

De nos jours, le recyclage souffre d'un gros problème, qui n'est autre que le manque de sensibilisation envers les possibilités de recyclage. De plus, il y a un manque de sensibilisation concernant les conséquences environnementales qu'induit la production de GN provenant de mines ou de carrières. Cette obscurité qui règne sur ces deux principes est la raison pour laquelle les déchets de constructions sont majoritairement entassés dans des décharges et non valorisés. La sensibilisation et la diffusion d'informations relatives à ces sujets et aux propriétés des bétons fabriqués à base de GR sont primordiales afin de mobiliser l'opinion publique et susciter la confiance envers les options offertes par le recyclage. Il est nécessaire d'impliquer les industries de construction et de les encourager à utiliser des matériaux recyclés dans leurs projets futurs [Akash Rao & al., 2006].

Un autre problème est quant à lui lié à l'esthétisme des bétons fabriqués à partir de GR. En effet, il est possible qu'il y ait présence d'impuretés physiques dans les GR [section 1.4.1.1]. En plus des effets néfastes qu'elles peuvent induire, ces impuretés peuvent mener à des problèmes d'esthétisme. Prenons l'exemple des particules de métal. Si les GR contenant les particules de métal se retrouvent à la surface d'un béton coulé en milieu humide, alors il y aura apparition de rouille. Prenons ensuite l'exemple de GR contenant des corps flottants (bois ou plastique). Si ceux-ci sont utilisés afin de fabriquer une dalle, ils viendront se loger à la surface de la dalle (vu qu'ils sont légers). Lorsque la dalle aura durci, elle pourra être soumise à des cycles de contraction/dilatation sous changement de température. Cela aura pour effet de les faire "sauter" hors de la dalle et donnera lieu à des trous. [M. Rondeux, 2014].

1.4.4. Problématiques gouvernementales

Les problématiques sociales sont renforcées par le non soutien des gouvernements. En effet, l'industrie du recyclage fait face à un manque cruel de soutien et d'engagement. Si les gouvernements développaient une politique soutenue par un cadre réglementaire approprié, cela fournirait l'élan nécessaire à l'épanouissement du domaine du recyclage. De plus, cela permettrait

¹⁷ http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/IF_BATEX_Fiche4.1._Granulats_FR.pdf

d'avoir une meilleure compilation des données, de bonne documentation ainsi qu'un contrôle de l'élimination des déchets [Akash Rao & al., 2006].

1.4.5. Problématiques économiques

Cette problématique a déjà été abordée dans la section [Section 1.2.5.3], où celle-ci avait été décrite du point de vue de l'entrepreneur (de construction ou de démolition) cherchant à minimiser ses coûts. Le point de vue du fabricant de GR est maintenant envisagé, ce qui permet de décrire plus en détail l'enjeu qui existe au sein des stations de recyclage. L'objectif pour une station de recyclage est de trouver un compromis entre les coûts de production et la qualité des GR, qualité liée à la présence d'impuretés dans les déchets. La qualité du produit fini sera donc intimement liée aux moyens mis en œuvre pour supprimer ces impuretés. La qualité a été quantifiée, ce qui a permis une classification des GR [1.3.2]. Ainsi, afin qu'une station de recyclage attire de nouveaux entrepreneurs, elle devra miser sur un système d'accréditation de ses produits finis.

1.4.6. Conclusion

Il existe donc plusieurs problématiques qui s'opposent à l'utilisation de GR dans les bétons structurels. Ces problématiques sont non seulement dues aux propriétés intrinsèques du matériau, mais elles sont également normatives, sociales, gouvernementales et économiques. La source du problème provient de la présence d'impuretés et plus particulièrement de mortier attaché qui augmente fortement le coefficient d'absorption d'eau des granulats par rapport aux GN. Cette problématique liée aux propriétés du matériau et la problématique économique font l'objet de cette étude.

1.5. Historique des études visant à contrôler l'absorption d'eau des GR

Les problématiques liées aux propriétés du matériau ont déjà fait l'objet d'études visant à les résoudre, du moins en partie. Cette section est consacrée à l'historique des études qui ont déjà été menées afin de tenter d'améliorer les propriétés des GR. Ces études ont été réparties en trois groupes distincts : le premier comprend les études visant à effectuer un enrobage des GR, le deuxième comprend les études visant à retirer le mortier et le troisième comprend les différentes techniques de mélange et conditions d'humidité. Rappelons que l'enrobage, ou coating, est un procédé industriel qui consiste à appliquer une couche mince de liquide (ou de poudre) sur la surface d'un matériau afin de lui conférer des propriétés particulières [M. Rondeux, 2014].

1.5.1. Modification de la surface des granulats recyclés

Plusieurs études se sont concentrées sur la modification de la surface des GR via coating, coating visant à modifier les propriétés liées au coefficient d'absorption d'eau excessif des GR. Les méthodes consistent à boucher les pores des GR afin de diminuer le coefficient d'absorption d'eau.

Une étude menée par [Jiusu Li & al., 2008], visait à analyser l'influence d'une nouvelle technique de « mélange-coating » des GR sur l'ouvrabilité, la résistance et la microstructure du béton. Les

matériaux servant à effectuer le coating sont : les cendres volantes, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau ou encore une combinaison de ceux-ci. Les résultats obtenus démontrent que cette méthode permet d'avoir une meilleure ouvrabilité, une meilleure résistance à la compression mais également à la flexion. De plus, le SEM de l'ITZ prouve que la structure de l'ITZ obtenue avec cette nouvelle méthode est plus dense.

Une autre étude, menée par [Cheng Hai-Li, Wang Cai-Yan, 2004], avait pour but de renforcer le mortier attaché aux GN en les pré-trempeant dans du verre soluble ($Na_2O.nSiO_2$). Le problème rencontré est que les composants du verre soluble augmentaient le risque de réaction avec les alcalins de la pâte de ciment, ce qui risquait donc de diminuer la durabilité des bétons.

Les auteurs [J. S. Ryou, Y. S. Lee, 2014] quant à eux ont effectué un coating des GR avec un dispersant soluble dans l'eau, composé de polycarboxylate. En effet, le polycarboxylate permet de réduire l'absorption d'eau excessive des GR lors du mélange, par dispersion des particules de ciment, diminuant ainsi la quantité en eau nécessaire [Yamada, 2001]. De plus, lors de la prise, le polycarboxylate peut contrôler et ralentir la perte d'affaissement au cours du temps. Les résultats montrent que plus le pourcentage de remplacement des GR non traités par des GR traités augmente, plus l'affaissement tend vers l'affaissement du béton de contrôle (constitué de 100% de GN) et plus la réduction de la quantité d'eau nécessaire est importante. De plus, pour tout béton comprenant au moins 25% de GR traités et le reste de GR non traités, les résistances en traction et en compression sont égales voire supérieures aux valeurs obtenues pour le béton de contrôle. Cependant, lorsque le taux de remplacement des GR traités est supérieur ou égal à 75%, le béton présente de légers saignements lors de la prise. Rappelons que le saignement est une forme de ségrégation où une petite quantité d'eau ressort par la surface du béton, lors de la prise de celui-ci.

Pour finir, une étude menée par [Zhao Zhihui & al., 2013], s'est concentrée sur le comportement physique des GR enrobés par dix pâtes différentes. Ces dix pâtes ont été appliquées sur des GR grossiers et des GR fins. Les pâtes sont constituées de :

- Ciment portland dont le rapport eau/ciment vaut 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0
- Ciment sulfoaluminate dont le rapport eau/ciment vaut 1.0, 1.2 auquel vient s'ajouter 5% de fumée de silice et enfin 1.2 auquel vient s'ajouter 30% de cendres volantes.
- Silicium organique pur
- Silicate de sodium pur

L'influence du coating des GR grossiers sur les performances mécaniques du béton durci et les effets du coating des GR fins sur les propriétés mécaniques et la durabilité du mortier ont été étudiés. Les résultats ont démontré que :

- L'enrobage d'un GR grossier avec une pâte de ciment portland permet d'augmenter sa résistance à l'écrasement uniquement si le rapport eau/ciment est égal à 0.8 (dont l'épaisseur de recouvrement est de 0.035 mm). Cette propriété est donc sensible à l'épaisseur de recouvrement du coating.
- La résistance à la compression du béton augmente corrélativement à l'augmentation du rapport eau/ciment de la pâte d'enrobage.
- Lorsque les GR fins sont enrobés de ciment sulfoaluminate enrichi de cendres volantes et de silicate de sodium pur, la résistance en compression du mortier après 28 jours est

respectivement augmentée de 34.8% et de 32.4% par rapport à un mortier composé de GR fins non traités.

- La résistance du mortier face à l'attaque des sulfates est améliorée lorsque celui-ci contient des GR fins enrobés de ciment sulfoaluminate enrichi de cendres volantes.

Il en ressort, d'après ces études, que les enrobages de ciment avec additions des GR permettent d'améliorer les propriétés des bétons les contenant.

1.5.2. Amélioration du mode de production des granulats recyclés

Certains chercheurs se sont intéressés à l'amélioration du mode production des GR, ce qui comprend le retrait des impuretés, et plus particulièrement le retrait du mortier.

Une étude, menée par [Heesup Choi & al., 2014], avait pour but de récupérer les performances des GN en tentant de retirer le maximum de mortier attaché lors du recyclage du béton. Leur approche consistait à agir très en amont dans le processus de recyclage, en effectuant le coating de Fe_2O_3 , qui est un matériau diélectrique, sur des GN et ainsi fabriquer un béton les contenant. Ensuite, après démolition de ce béton et lors de la fabrication des GR, ils ont chauffé sélectivement ces GR par micro-ondes [Tsuji, 2007]. Grâce au coating, qui chauffait plus fort que son entourage, une différence de température de 100°C a été observée entre la surface de ces GN modifiés et la pâte de ciment. Le résultat observé après concassage est qu'il ne restait plus que 2 à 3% de mortier attaché.

Une autre étude, menée par [Tam Vivian WY & al., 2006], visait à améliorer la qualité des GR en pré-trempant ceux-ci dans une solution de HCl, H_2SO_4 et H_3PO_4 . Cette procédure permettait de retirer le mortier (attaché au granulat naturel) par dissolution dans cette solution acide. Le problème de cette méthode est que ces acides représentent une nouvelle forme de pollution, ce qui ne fait que remplacer un problème par un autre.

Ces techniques ont le gros désavantage de produire une grande quantité de particules fines non valorisables.

1.5.3. Techniques de mélange

D'autres études ont mis l'accent sur la manière de fabriquer le béton, afin d'améliorer l'adhésion entre les GR et le mortier de ciment. La principale préoccupation consiste donc à adapter le rapport eau sur ciment afin de palier l'effet de l'absorption d'eau excessive des GR sur les propriétés du béton.

Une étude, menée par [Tam Vivian WY & al., 2005], avait pour but de modifier la méthode de mélange des matériaux lors de la fabrication de béton, et ce, afin de contourner la problématique liée à l'importante absorption d'eau des GR. Contrairement à la méthode de mélange normal (MMN), la méthode de mélange en deux étapes (MMDE) divise le processus de mélange en deux étapes et répartit proportionnellement la quantité d'eau reprise au travers de ces deux étapes. Le GR subit donc un coating d'une mince couche de mortier de ciment lors de la première étape, puis est ensuite mélangé au reste d'eau. Cette méthode permet d'augmenter la résistance à la compression du béton ainsi fabriqué.

Une autre étude, menée par [Alexander S. Brand & al., 2014], avait pour but de déterminer la signification statistique du remplacement des GN par des GR de haute qualité, en termes d'ouvrabilité de béton frais, de résistance et de retrait de bétons durcis. Pour ce faire, trois conditions initiales d'humidité ont été considérées pour ces GR : séchés au four, partiellement saturés et pleinement saturés. De plus, deux méthodes de mélange ont été considérées : méthode de mélange normal (MMN) et méthode de mélange en deux étapes (MMDE). Lors du mélange du béton, la quantité d'eau a été ajustée pour tenir compte de la quantité nécessaire pour amener les granulats à l'état saturé mais de surface sèche, afin de garder un rapport eau/ciment identique pour chaque échantillon. Cependant, vu qu'il faut plus que 24h pour saturer complètement les GR, ces derniers ne l'étaient pas durant les mélanges. Ce qui, d'après les auteurs, est préférable étant donné qu'une autre étude [Etxeberria, 2007] a démontré qu'un granulat complètement saturé peut induire un affaiblissement de l'ITZ entre la nouvelle pâte de ciment et le GR. Une ancienne étude [Barra de Oliveira M, Vasquez E, 1996] avait démontré que les granulats partiellement saturés permettaient d'obtenir une plus grande résistance à la compression que les granulats séchés au four ou complètement saturés. Les résultats de cette étude ont montré que les plus grandes résistances de béton durci ont été observées pour la MMDE utilisant des granulats au moins partiellement saturés. Lors de la prise du béton, les GR permettent de diminuer le retrait mais après 90 jours, ils l'augmentent. Concernant l'ouvrabilité, la MMDE permet de l'augmenter par rapport à la MMN.

Ces techniques de mélanges semblent produire de bons résultats et ce à moindre coût. La seule différence induite ici consiste à modifier le rapport eau-ciment.

1.6. Conclusion

Au terme de la lecture de ce chapitre consacré à l'état des lieux de la gestion des ressources et plus particulièrement de la gestion et du recyclage des déchets de béton, il en ressort que :

- Les granulats fabriqués à partir des déchets de bétons sont plus poreux que les GN. Quant à leur pureté, celle-ci est trop fortement liée au processus de fabrication. Ces granulats ne peuvent donc pas être utilisés dans un autre domaine que de l'application non structurelle en l'état actuel.
- Des techniques variées ont déjà été mises en place afin de parer aux problèmes que présentent ces GR. Ces techniques peuvent être réparties en trois groupements distincts : les techniques de modification de la surface des GR, les techniques d'amélioration du mode de production des GR et enfin les techniques permettant d'adapter les procédures de mélange lors de la fabrication de béton.
- Seul le premier groupement semble prometteur. En effet, l'amélioration du mode de production sous-entend la génération d'énormes quantités de granulats fins non valorisables. De plus, les techniques d'adaptation lors du mélange sont performantes pour les bétons frais mais réduisent les propriétés des bétons durs.

Ce travail s'oriente donc sur la recherche d'un procédé permettant de modifier la surface des GR et pouvant être transposé au secteur industriel car aucune technique de préparation simple à la réalisation et pouvant être réalisée à grande échelle n'a encore été trouvée.

Chapitre 2 - Partie expérimentale

L'objet de ce travail est d'étudier les possibilités de traiter la surface des GR en vue de diminuer l'impact de la porosité sur l'ouvrabilité et la prise du béton. L'étude se divise en deux phases distinctes :

- **1^e phase** : L'objectif est de réduire le coefficient d'absorption d'eau des GR. Le traitement de la surface des GR est étudié. Plusieurs techniques ont été mises en œuvre. Une de ces techniques consiste en un enrobage (coating) des GR à l'aide de différents produits, allant de la pâte de ciment à un agent hydrofuge chimique, afin de boucher leur porosité ouverte et ainsi diminuer leur coefficient d'absorption d'eau.
- **2^e phase** : L'objectif est de quantifier l'incidence qu'ont les traitements concluants de la 1^e phase sur l'ouvrabilité et la prise du béton.

L'ensemble des manipulations ont été menées au laboratoire des matériaux de constructions (LMC) de l'Université de Liège entre le 15/09/14 et le 29/05/15.

2.0. Caractéristiques des granulats recyclés

2.0.1. Préparation des échantillons : échantillonnage par granulométrie

Les GR proviennent de déchets de construction obtenus par la société TRADECOWALL, société coopérative pour le traitement des déchets de construction en Wallonie. Ils sont stockés dans un local non climatisé, donc la température ambiante est de (18 ± 2) °C et l'état d'humidité variable.



Figure 21 - Déchets de construction

Ces déchets sont de toutes formes, tailles et textures différentes [Figure 21] ; un examen visuel rapide met en évidence la présence de GN (non liés et liés à des résidus de mortier), de pâte de mortier, de matériaux bitumineux, d'éléments en céramique et de bois. Cet ensemble hétérogène est non utilisable en tant que tel pour mener à bien les essais. Une procédure a été appliquée afin de minimiser les incertitudes quant aux propriétés de cet ensemble.

2.0.1.1. Séchage

Les GR ont tout d'abord été séchés dans une étuve à 105°C pendant minimum 24h, afin que chaque élément soit à l'état d'humidité nul. En effet, après avoir effectué l'essai de teneur en eau [2.1.2], il s'est avéré que cette propriété n'était pas constante [Tableau 1]. Trois échantillons représentatifs différents ont été soumis à l'essai dans le but de pouvoir bénéficier de l'obtention de propriétés statistiques telles qu'une moyenne arithmétique [Équation 1] et un écart-type [Équation 2]. Ces propriétés permettent d'approcher au mieux les propriétés de la population, autrement dit de l'ensemble étudié.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, n = 3 \quad \text{Équation 1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, n = 3 \quad \text{Équation 2}$$

	Echantillon A	Echantillon B	Echantillon C	Moyenne	Ecart-type
Teneur en eau [%]	8.19	6.13	5.89	6.73	1.03

Tableau 1 - Teneur en eau des déchets de construction

2.0.1.2. Tamisage

Ensuite, ils ont été triés et répartis selon quatre intervalles de granulométrie (ou fractions granulométriques) [Figure 23] à l'aide des tamis 5, 10 et 20 mm [Figure 22]. Les masses retenues par chaque tamis [Tableau 2] ont permis d'obtenir les pourcentages de passant et de refus au travers de chaque tamis [Tableau 3]. Une courbe granulométrique a donc été déterminée sur base de ces GR triés [Figure 24].



Figure 22 - Tamis 5, 10 et 20 mm

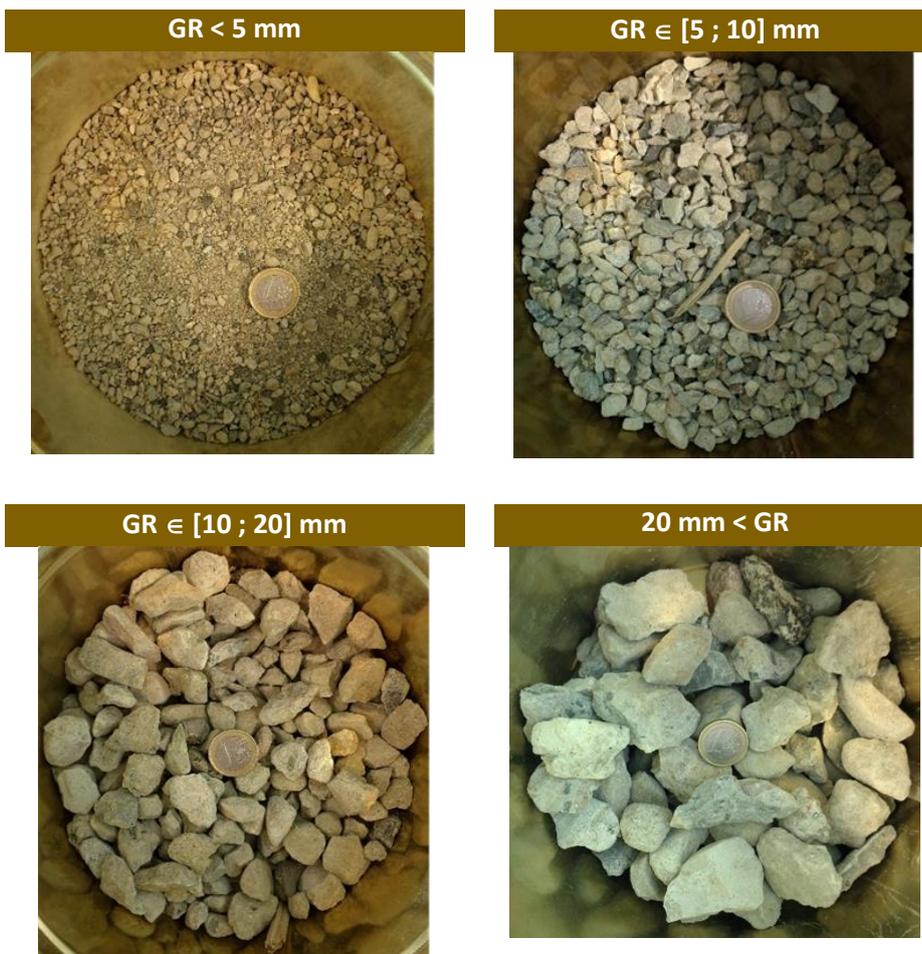


Figure 23 - Tri par intervalles de granulométrie

	Masse [g]
Total	12687.7
> 20 mm	1440
[10;20] mm	2815
[5;10] mm	1935.7
< 5 mm	6497

Tableau 2 - Masses des intervalles de granulométrie

Tamis [mm]	Refus [%]	Passant [%]
50	0.00	100.00
20	11.35	88.65
10	22.19	66.46
5	15.26	51.21
0.1	51.21	0.00

Tableau 3 - Pourcentages de passant et de refus

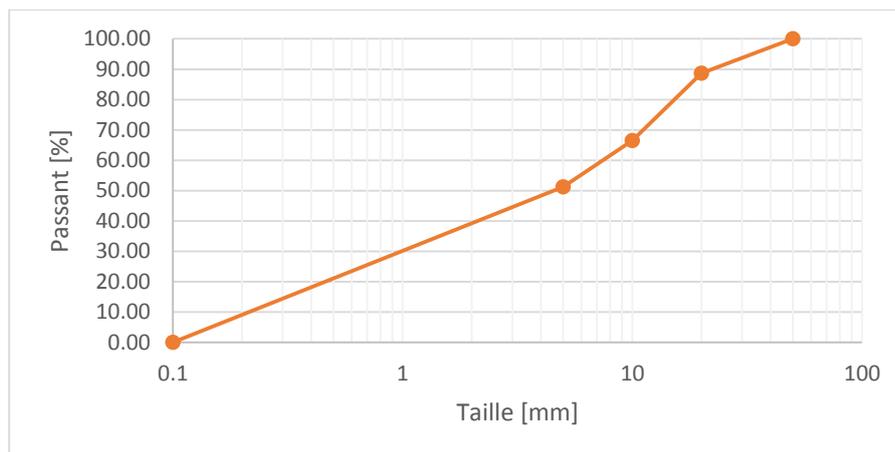


Figure 24 - Courbe granulométrique des déchets de construction

Afin d'obtenir plusieurs échantillons représentatifs pour chaque intervalle de granulométrie, les GR ont été répartis grâce à un diviseur à cloisons [Figure 25]. Cette manœuvre a pour but de permettre la comparaison des résultats obtenus pour chaque échantillon. Une meilleure répartition est ainsi obtenue sur chaque intervalle, ce qui permet de considérer tout sous-ensemble comme étant identique aux autres.



Figure 25 - Diviseur à cloisons

2.0.2. Propriétés des granulats recyclés

Une fois les échantillons représentatifs préparés pour chaque fraction granulométrique, deux propriétés essentielles des GR ont pu être déterminées : la masse volumique absolue [Tableau 4] et le coefficient d'absorption d'eau [Tableau 5] (selon les méthodes proposées par la Norme européenne NF EN 1097-6 [2.1.3 et 2.1.4]). Seules les fractions de granulométrie [5 ; 10] mm et [10 ; 20] mm ont été détaillées dans ce travail. Ces propriétés varient légèrement en fonction de la granulométrie [Figure 26].

La masse volumique absolue est sensiblement identique pour les deux fractions étudiées. Le coefficient d'absorption d'eau est quant à lui plus faible pour la fraction [10 ; 20] mm. Cette

variation est liée à la quantité de mortier résiduel attaché ; plus la fraction est fine et plus la quantité de mortier résiduel attaché est importante [voir section 1.4.1.1].

Masse volumique absolue [g/cm ³]	Moyenne	Ecart-type
Fraction [5 ; 10] mm	2.61	0.01
Fraction [10 ; 20] mm	2.56	0.03

Tableau 4 - Masse volumique absolue (GR non traités)

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type
Fraction [5 ; 10] mm	8.04	0.48
Fraction [10 ; 20] mm	5.56	0.53

Tableau 5 - Coefficient d'absorption d'eau (GR non traités)

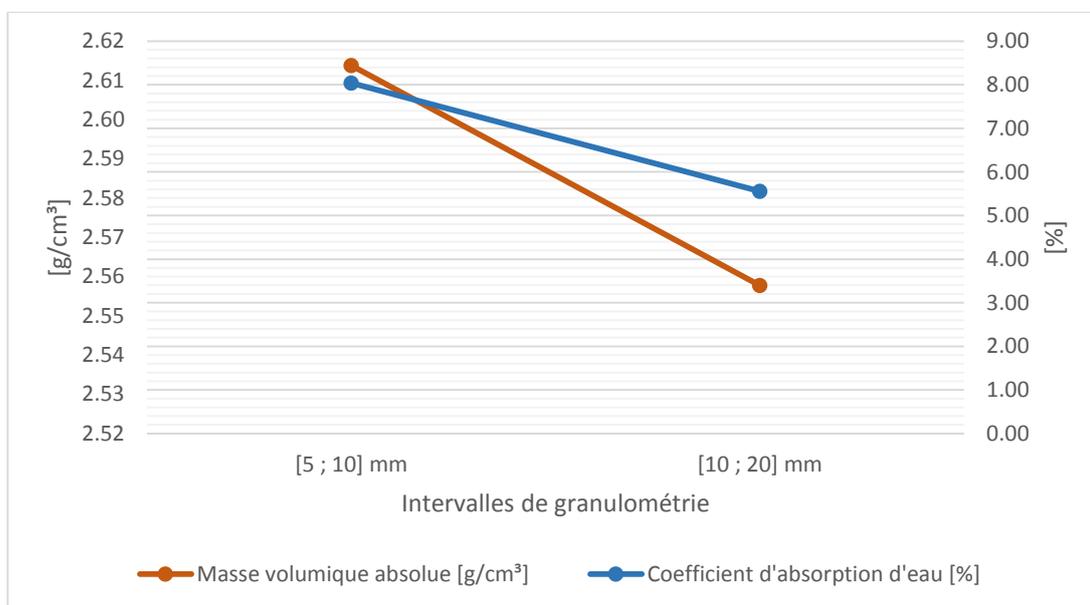


Figure 26 - Masse volumique absolue et coefficient d'absorption d'eau (GR non traités)

2.1. Première phase : modification de la porosité de surface

Ce travail se concentre sur la modification de la porosité de surface des granulats recyclés via enrobage de ceux-ci par certains produits. Cependant, une méthode alternative a été menée en parallèle et est présente à l'annexe A.2. Cette méthode repose sur le phénomène de carbonatation et ne propose pas de résultats concluants.

2.1.1. Modification de la surface des granulats par enrobage

Plusieurs produits d'enrobage ont été utilisés pour modifier la surface des GR. Tous les types d'enrobage ont été choisis afin d'uniformiser cette surface et ainsi influencer le coefficient d'absorption d'eau des GR. Le coefficient d'absorption d'eau des GR, qui est fonction de la qualité du mortier résiduel attaché aux granulats ainsi que de la qualité des GR au sens large (résultant de la proportion d'impuretés), tendra donc vers un coefficient d'absorption d'eau fonction de l'enrobage. Le principe de l'enrobage est simple et consiste à créer une enveloppe autour de chaque granulat [Figure 27¹⁸].

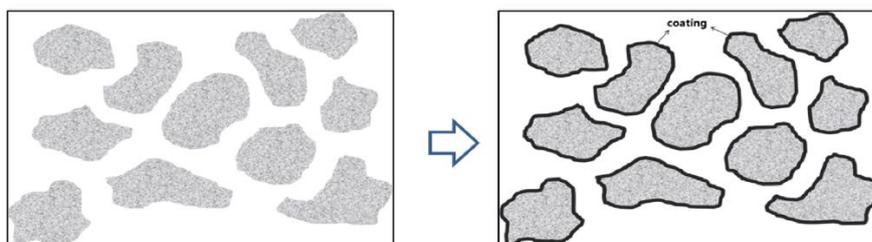


Figure 27 - Principe d'enrobage

2.1.1.1. Ciment CEM I 52.5

Ce ciment est un pur ciment Portland [Figure 29], constitué d'au moins 95 % de clinker Portland finement broyé, provenant de la cimenterie CBR. Ces caractéristiques sont données à la Figure 28¹⁹.

¹⁸ RYU, LEE, Characterization of Recycled Coarse Aggregate (RCA) via a Surface Coating Method.

¹⁹ Fiche technique ciment CEM I 52.5 – Cimenteries CBR, 2014.

	Méthode d'essai	Unités	Valeurs moyennes	Exigences	
				min.	max.
Eau de consistance normale	EN 196-3	%	26,8	–	–
Début de prise	EN 196-3	minutes	120	60	–
Fin de prise	EN 196-3	heures	2:40	–	12:00
Stabilité	EN 196-3	mm	1,0	–	10
Surface spécifique (Blaine)	EN 196-6	cm ² /g	4400	–	–
Refus au tamis de 200 µm	EN 196-6	%	0	–	3,0
Chaleur d'hydratation à 7 jours	–	J/g	–	–	–
Masse volumique					
Absolue	–	kg/m ³	3100	–	–

Figure 28 - Caractéristiques du ciment CEM I 52.5



Figure 29 - Ciment CEM I 52.5

Etude de l'influence du rapport E/C

Premièrement, l'influence du rapport E/C sur le coefficient d'absorption d'eau des GR de granulométrie appartenant aux fractions [5 ; 10] mm et [10 ; 20] mm a été étudié. Pour ce faire, six mélanges différents ont été réalisés. Les rapports considérés sont : $\frac{E}{C} = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ et 1.0 . Le temps de séchage des GR enrobés a quant à lui été fixé à un minimum de 72 h afin d'atteindre un degré d'hydratation du ciment le plus élevé possible, c'est-à-dire proche de 1. Ce qui permet d'augmenter la résistance de la pâte de ciment et donc de diminuer la porosité.

Etude de l'influence du temps de séchage

Par la suite, l'étude de l'influence du temps de séchage de l'enrobage sur le coefficient d'absorption pour un rapport eau sur ciment déterminé de $\frac{E}{C} = 0.8$ a été menée. Ce choix a été motivé par les résultats obtenus lors de l'étude de l'influence du rapport E/C. Les temps de séchage à l'air ont été choisis par rapport au temps de prise du ciment : 30 min, 3h, 24h et plus de 72 h.

Préparation des mélanges

La préparation des mélanges a été réalisée à l'aide d'un mélangeur-batteur de 5L de la marque HOBART [Figure 30], possédant trois vitesses de rotation différentes.



Figure 30 - Mélangeur-batteur

La procédure appliquée se base sur la Norme EN 196-1 :

- Verser le ciment dans le récipient, puis y ajouter délicatement la quantité d'eau requise.
- Mélanger pendant 60 secondes les produits via la pâle rotative programmée sur la première vitesse de rotation.
- Arrêter le malaxeur pendant 60 secondes et détacher manuellement les grumeaux de ciment qui se sont éventuellement formés au fond du récipient.
- Mélanger à nouveau à l'aide du malaxeur durant 60 secondes selon les mêmes conditions.

Méthodologie d'enrobage

Pour les fractions de granulométrie [5 ; 10] mm et [10 ; 20] mm, la méthodologie d'enrobage suivie est la même. Dans un premier temps, elle consiste simplement en un trempage durant un intervalle de temps de [5 ; 6] min d'échantillons de 50 ± 1 g. Le trempage est réalisé dans des récipients en plastique [Figure 31].



Figure 31 - Récipients en plastique

Une fois le trempage effectué, le contenu des récipients est versé à travers une grille métallique [Figure 32] de maillage suffisamment étroit pour permettre la conservation des granulats enrobés et l'évacuation du mélange.



Figure 32 - Grille métallique

Les GR enrobés ainsi obtenus sont placés sur des soucoupes métalliques [Figure 33] permettant leur séchage à l'air du laboratoire climatisé à 21° C et d'humidité relative égale à 60%.



Figure 33 - Soucoupes métalliques

Une attention particulière a été portée sur l'écartement des granulats afin de leur permettre un séchage le plus homogène. Le temps de séchage varie selon les échantillons, allant de 3h à plus de 72h.

Observations

Après enrobage, la surface des GR a pris la couleur de la pâte de ciment et l'ensemble est uniforme [Figure 34] et ce, quel que soit l'intervalle de granulométrie.



Figure 34 - Modification de la surface après enrobage de ciment

2.1.1.2. 50 % ciment CEM I 52.5 / 50 % cendres volantes

Le ciment utilisé est le même que celui décrit ci-dessus. Un ciment contenant autant de clinker que de cendres volantes [Figure 35] est appelé CEM IV.



Figure 35 - Cendres volantes

Seule l'étude de l'influence du temps de séchage des GR [10 ;20] mm enrobés sur le coefficient d'absorption d'eau a été menée, pour un rapport eau sur ciment + cendres volantes de 0,8.

La procédure de *préparation du mélange* ainsi que la *méthodologie d'enrobage* sont identiques à celles décrites pour le mélange de ciment CEM I 52.5.

Observations

Après enrobage, la surface des GR a pris la couleur de la pâte de ciment et de cendres volantes (légèrement plus foncée que la pâte de ciment uniquement) et l'ensemble est uniforme [Figure 36].



Figure 36 - Modification de la surface après enrobage de ciment et de cendres volantes

2.1.1.3. Chaux

La chaux [Figure 37] utilisée provient d'un magasin de bricolage et outillage de grande surface. C'est une chaux éteinte de la marque Knauff.



Figure 37 – Chaux

La procédure de *préparation du mélange* ainsi que la *méthodologie d'enrobage* sont identiques à celles décrites pour le mélange de ciment CEM I 52.5. Le rapport E/C choisi est de 2, rapport choisi afin de pouvoir facilement récupérer les granulats après trempage dans la pâte. Une tentative d'enrobage de mélange de rapport E/C = 1.2 a eu lieu mais n'a pas abouti, étant donné la difficulté rencontrée lors de la réalisation de l'enrobage.

Observations

Après enrobage, la surface des GR a pris la couleur de la pâte de chaux mais l'ensemble n'est pas uniforme [Figure 38] et ce, quel que soit l'intervalle de granulométrie.

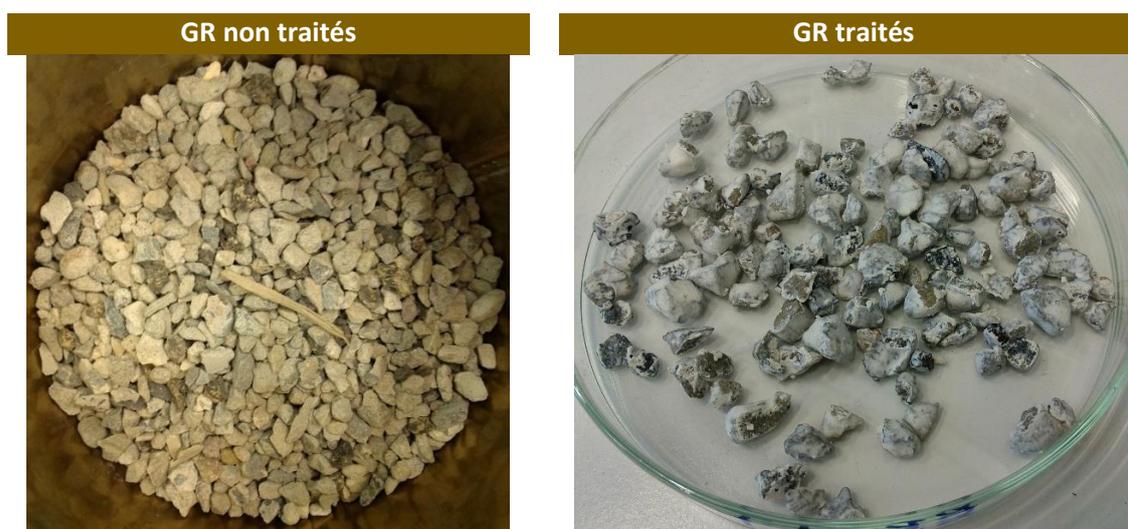


Figure 38 - Modification de la surface après enrobage de chaux

2.1.1.4. Agents hydrofuges à base de Silane

Un agent hydrofuge, lorsqu'il est appliqué sur une surface, la rend hydrophobe. Ainsi, la surface est recouverte d'un film hydrophobe qui a la propriété d'être apolaire. Cette propriété empêche le film de créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau et est directement liée à la mouillabilité ; l'angle de contact est fortement augmenté [Figure 39²⁰], ce qui implique une répulsion des gouttes d'eau et permet de garder la surface traitée au sec. Ce mécanisme consiste donc en une imperméabilisation.

²⁰ <http://e.maxicours.com/img/4/2/3/6/423614.jpg>

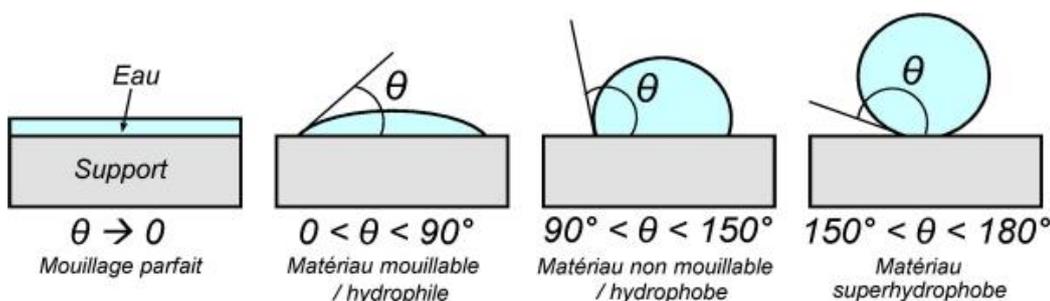


Figure 39 - Angle de contact

Trois agents hydrofuges à base de Silane sont envisagés. Ceux-ci sont habituellement utilisés en tant qu'hydrofuge de surface (traitement hydrophobe) pour supports absorbants tels que les bétons des structures de génie civil ou du bâtiment sujets à des contraintes importantes dues aux cycles gel-dégel, aux sels de déverglaçage et aux attaques de chlorures en environnement marin. Ces trois produits se distinguent par leur pourcentage de matière active :

- **Hydrofuge A** : ce produit est une imprégnation hydrophobe à base de Silane en phase aqueuse de consistance liquide, à base de concentré de Silane en émulsion. Il contient environ 20 % de matière active dont la base chimique est de l'Alkoxysilane. Sa couleur est blanche, d'aspect laiteux.
- **Hydrofuge B** : ce produit est identique à l'hydrofuge A, mis à part le fait qu'il contient environ 40 % de matière active dont la base chimique est de l'Alkoxysilane. Sa couleur est également blanche, d'aspect laiteux.
- **Hydrofuge C** : ce produit est une imprégnation hydrophobe de consistance liquide à base de Silane, sans solvant avec un taux de matière active de 99 %. Ce liquide est incolore.

Ainsi, l'influence du pourcentage de matière active des agents hydrofuges sur la propriété d'absorption d'eau des GR est étudiée. De plus, le nombre de trempage est un paramètre pouvant affecter les propriétés des GR. L'étude se limite à deux trempages. La méthodologie d'enrobage est identique à celle décrite pour le mélange de ciment CEM I 52.5. Un séchage de 48h a été préconisé afin de permettre aux agents de polymériser et ainsi d'activer leurs propriétés hydrophobes.

Consommation

La consommation en agent hydrofuge des GR par trempage de 5 minutes peut être utile afin d'évaluer la quantité de produit nécessaire à la réalisation de l'enrobage. La consommation massique [Équation 3], rapportée à la masse initiale de l'échantillon traité, a été considérée.

$$Consommation_{Hydrofuge} = 100 * \left(\frac{Masse_{enrobage}}{Masse_{échantillon}} \right) [\%] \quad \text{Équation 3}$$

Chaque agent hydrofuge a été testé sur trois échantillons représentatifs différents par fraction granulométrique dans le but de pouvoir bénéficier de l'obtention de propriétés statistiques telles qu'une moyenne arithmétique [Équation 1] et un écart-type [Équation 2].

Les consommations massiques moyennes par trempage [Tableau 6 et Tableau 7] oscillent entre 2 et 5 % pour les deux fractions granulométriques considérées. Lors du deuxième trempage, les consommations d'hydrofuges A et B sont presque réduites de moitié [Figure 40 et Figure 41]. Cela peut s'expliquer par le fait que lors du deuxième trempage, l'agent hydrofuge déjà présent agit et réduit l'absorption d'eau. En effet, ces deux agents hydrofuges sont en phase aqueuse. Cette hypothèse se verra confirmée à la section 2.2.1.3. La consommation en hydrofuge C, quant à elle, est identique lors des deux trempages. De plus, elle est plus élevée que les consommations d'hydrofuges A et B, à durée de trempage équivalente. Cet agent hydrofuge ne contient pas de solvant, ce qui peut être la cause des résultats.

	Consommation massique [%]	Moyenne	Ecart-type
Hydrofuge A	1e trempage	2.99	0.20
	2e trempage	1.67	0.27
Hydrofuge B	1e trempage	3.76	0.25
	2e trempage	2.21	0.14
Hydrofuge C	1e trempage	5.30	0.59
	2e trempage	4.85	0.99

Tableau 6 - Consommation en agents hydrofuges - Fraction [5 ; 10] mm

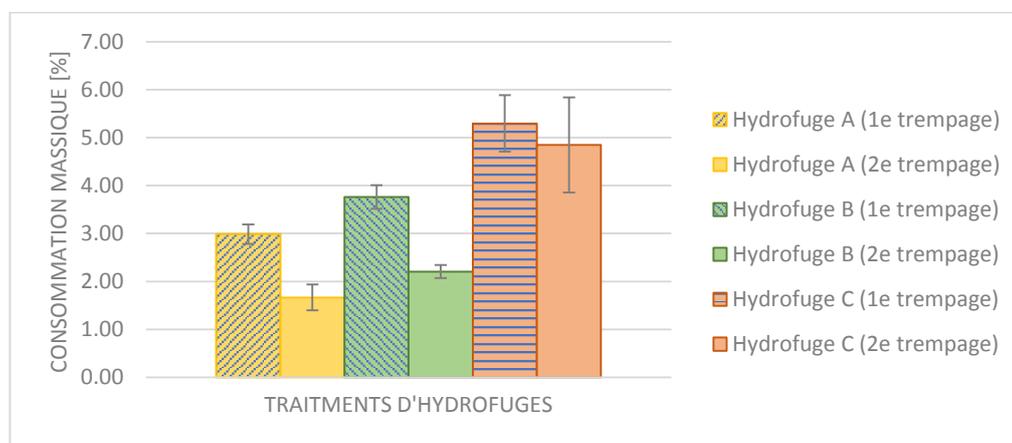


Figure 40 - Consommation en agents hydrofuges - Fraction [5 ; 10] mm

	Consommation massique [%]	Moyenne	Ecart-type
Hydrofuge A	1e trempage	2.38	1.04
	2e trempage	1.17	0.48
Hydrofuge B	1e trempage	2.62	0.38
	2e trempage	1.58	0.18
Hydrofuge C	1e trempage	4.28	0.62
	2e trempage	4.41	0.50

Tableau 7 - Consommation en agents hydrofuges - Fraction [10 ; 20] mm

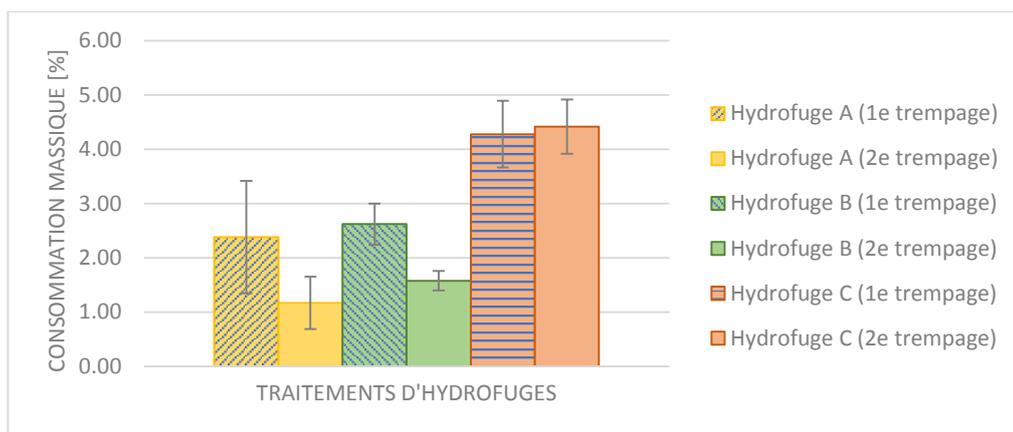


Figure 41 - Consommation en agents hydrofuges - Fraction [10 ; 20] mm

Observations

Après séchage des enrobages d'hydrofuge A et B, la surface des GR n'a pas changé et ce, quel que soit l'intervalle de granulométrie. L'hydrofuge C forme quant à lui un film transparent très fin d'aspect luisant [Figure 42]. Cet hydrofuge, contrairement aux hydrofuges A et B, ne contient aucun solvant ; un film hydrophobe recouvre donc la surface des GR et ne s'évapore pas.



Figure 42 - Aspect luisant des GR traités à l'hydrofuge C

2.1.1.5. Amidon

L'amidon [Figure 43] utilisé provient d'une grande surface. Ce sont des cristaux d'amidon de riz de la marque REMY servant habituellement à assouplir le linge.



Figure 43 – Amidon

La procédure de *préparation du mélange* ainsi que la *méthodologie d'enrobage* sont identiques à celles décrites pour le mélange de ciment CEM I 52.5. L'étude de l'*influence du rapport E/A* a été menée. Deux mélanges de rapport $E/A = 1$ et $E/A = 2$ ont été préparés. Le premier mélange était de consistance trop épaisse [Figure 44], ce qui a rendu l'opération d'enrobage difficile.



Figure 44 - Mélange $E/A = 1$ trop épais

Observations

Les deux mélanges ont présenté le même problème : après séchage de l'enrobage, ce dernier se détachait partiellement du GR par simple effleurement [Figure 45] et ce, quel que soit l'intervalle de granulométrie.



Figure 45 - Problème de décollement de l'enrobage d'amidon

2.1.2. Détermination de la teneur en eau – Norme NF EN 1097-5

La teneur en eau des granulats est une propriété qui permet de déterminer la quantité d'eau présente au sein d'un ensemble de granulats. Cette propriété est fonction des conditions d'humidité ambiantes. La Norme NF EN 1097-5 a été suivie afin de déterminer la teneur en eau de granulats, recyclés ou non.

Trois échantillons de masses variables sont soumis à l'essai, afin de bénéficier de l'obtention de propriétés statistiques telles qu'une moyenne arithmétique [Équation 1] et un écart-type [Équation 2] comme énoncé précédemment.

Mode opératoire

Placer la prise d'essai sur un plateau et la peser ($M_{Initiale}$). Placer le plateau contenant les granulats dans une étuve à 105°C et les laisser sécher jusqu'à atteindre une masse constante, ce qui équivaut à les laisser sécher 24 ± 1 h. Retirer le plateau de l'étuve, le laisser refroidir à l'air ambiant pendant environ 15 minutes puis peser les granulats ($M_{105^{\circ}C}$).

Calcul et expression du résultat

La teneur en eau (en pourcentage de la masse sèche) s'obtient en utilisant l'Équation 4.

$$W = \frac{100 * (M_{humide} - M_{sèche})}{M_{sèche}} \quad \text{Équation 4}$$

où,

- M_{humide} [g] représente la masse des granulats à l'état initial humide
- $M_{sèche}$ [g] représente la masse des granulats séchés à l'étuve à 105°C

2.1.3. Détermination du coefficient d'absorption d'eau – Norme NF EN 1097-6

Le coefficient d'absorption d'eau est une mesure des pores accessibles à l'eau et traduit le rapport entre l'augmentation de masse d'un échantillon de granulats après imbibition par l'eau et sa masse sèche (obtenue après passage à l'étuve). La Norme européenne NF EN 1097-6 a été suivie afin de déterminer ce coefficient pour des GR traités et non traités. Bien que cette norme soit spécifique aux GN, elle convient parfaitement pour l'étude des GR. Les procédures diffèrent légèrement en fonction des fractions de granulométrie considérées.

Trois échantillons de 50 ± 1 g sont soumis à l'essai, afin de bénéficier de l'obtention des propriétés statistiques définies à la section 2.1.1.4.

2.1.3.1. Fractions de granulométrie [5 ; 10], [10 ; 20] et [> 20] mm

Les essais à mener sur ces trois fractions de granulométrie sont identiques, car ces derniers sont tous les trois inclus dans l'ensemble [4 ; 31.5] mm.

Mode opératoire

Premièrement, il est nécessaire d'immerger la prise d'essai dans un récipient d'eau à (22 ± 3) °C et d'éliminer l'air présent entre les granulats en secouant légèrement et en faisant doucement tourner le récipient. Cette immersion à température constante doit durer $(24 \pm 0,5)$ h, afin que les granulats atteignent l'état saturé. Cet état saturé correspond à un remplissage de la quasi-totalité des pores accessibles par l'eau.

Ensuite, retirer la prise d'essai de l'eau et laisser les granulats égoutter à travers une passoire métallique. Les transférer sur un tissu sec et les essuyer délicatement afin de retirer l'excédent d'eau visible en surface. Eviter de frotter trop énergiquement, cela risquerait de retirer le mortier attaché aux GN. Transférer les granulats sur un deuxième tissu sec lorsque le premier n'absorbe plus d'eau. Etaler la prise d'essai sur ce deuxième chiffon en une couche simple et laisser attendre jusqu'à ce que les films d'eau visibles aient disparu.

Une fois l'état saturé mais de surface sèche (ou saturated surface dry « SSD ») atteint, transférer les granulats sur un plateau et les peser (M_{SSD}). Placer le plateau contenant les granulats dans une étuve à 105°C et les laisser sécher jusqu'à atteindre une masse constante, ce qui équivaut à les laisser sécher (24 ± 1) h. Retirer le plateau de l'étuve, le laisser refroidir à l'air ambiant pendant environ 15 minutes puis peser les granulats ($M_{105^\circ C}$).

Un schéma explicite [Figure 46²¹] permet de comprendre la différence en les différents états d'humidité des granulats. L'état (a) correspond à l'état parfaitement sec. Les états intermédiaires légèrement humides (b) et (c) correspondent respectivement aux états de séchage et d'absorption d'eau. L'état (d) représente l'état saturé mais de surface sèche et l'état (e) est l'état sursaturé.

²¹ **TEGQUER**, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach.

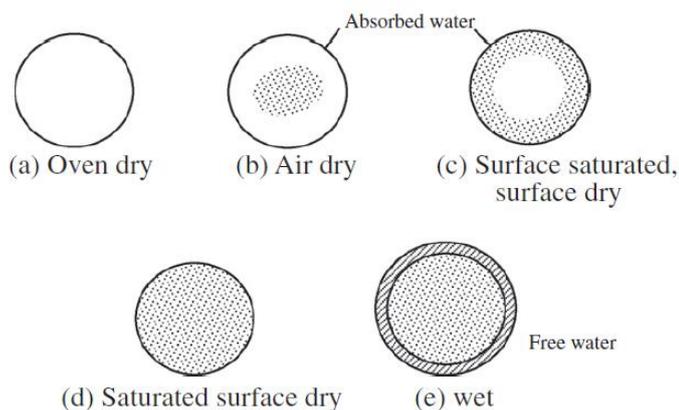


Figure 46 - Différentes conditions d'humidité

Calcul et expression du résultat

Le coefficient d'absorption d'eau (en pourcentage de la masse sèche) s'obtient en utilisant l'Équation 5.

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_{SSD} - M_{sèche})}{M_{sèche}} \quad \text{Équation 5}$$

où,

- M_{SSD} [g] représente la masse des granulats saturés mais de surface sèche
- $M_{sèche}$ [g] représente la masse des granulats séchés à l'étuve à 105°C

2.1.3.2. Fraction de granulométrie [< 5] mm

Le *mode opératoire* est identique à celui décrit pour la fraction de granulométrie [4 ; 31.5] mm, si ce n'est que lors de l'égouttage des granulats après immersion dans l'eau, il faut placer un tissu sur la passoire métallique afin de récupérer la prise d'essai. De plus, afin de s'assurer que l'état saturé mais de surface sèche est atteint, il faut tamponner la prise d'essai avec un nouveau tissu jusqu'à ce que celui-ci n'absorbe plus d'eau. Le *calcul et l'expression du résultat* s'obtiennent via l'Équation 5.

2.1.4. Détermination de la masse volumique absolue²² - Norme NF EF 1097-6

La masse volumique absolue des granulats se calcule à partir du rapport masse/volume et représente la masse de la matière qui constitue le granulat par unité de volume, sans tenir compte

²² Les essais de détermination du coefficient d'absorption d'eau et de la masse volumique absolue peuvent être réalisés en parallèle.

des vides pouvant exister dans ou entre les granulats. Les essais menés sont basés sur la Norme européenne NF EN 1097-6.

Trois échantillons de 250 ± 1 g (ou 500 ± 1 g, selon la fraction de granulométrie considérée) sont soumis à l'essai, pour les mêmes raisons énoncées précédemment.

2.1.4.1. Fractions de granulométrie [5 ; 10] et [10 ; 20] et [> 20] mm

Les essais à mener sur ces deux fractions de granulométrie sont identiques, car ces derniers sont tous les deux inclus dans l'ensemble [4 ; 31.5] mm.

Mode opératoire

Tout d'abord, peser le pycnomètre rempli uniquement avec de l'eau (M_{P+Eau}). La surface libre de l'eau doit correspondre précisément à une certaine graduation.

Ensuite, immerger la prise d'essai dans le même pycnomètre rempli d'eau à (22 ± 3) °C. Cette immersion à température constante doit durer $(24 \pm 0,5)$ h, afin que les granulats atteignent l'état saturé. Cet état saturé correspond à un remplissage de la quasi-totalité des pores accessibles par l'eau.

Peser ensuite le pycnomètre rempli d'eau et des granulats saturés ($M_{P+Eau+Ech}$) (en n'omettant pas de vérifier que le niveau de l'eau est précisément à la même graduation que lors de la pesée M_{P+Eau}).

Ensuite, retirer la prise d'essai du pycnomètre et laisser les granulats égoutter à travers une grille/passoire métallique. Transférer les granulats sur un plateau et placer ce plateau dans une étuve à 105°C. Laisser sécher les granulats jusqu'à atteindre une masse constante, ce qui équivaut à les laisser sécher (24 ± 1) h. Retirer le plateau de l'étuve, le laisser refroidir à l'air ambiant pendant environ 15 minutes puis peser les granulats ($M_{105^\circ C}$).

Calcul et expression du résultat

La masse volumique absolue (en g/cm^3)²³ s'obtient en utilisant l'Équation 6.

$$\rho_a = \frac{M_{105^\circ C}}{M_{105^\circ C} - (M_{P+Eau+Ech} - M_{P+Eau})} \quad \text{Équation 6}$$

où,

- $M_{105^\circ C}$ [g] représente la masse des granulats séchés à l'étuve à 105°C
- M_{P+Eau} [g] représente la masse du pycnomètre rempli uniquement d'eau
- $M_{P+Eau+Ech}$ [g] représente la masse du pycnomètre rempli d'eau et des granulats saturés

²³ $1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$

2.1.4.2. Fraction de granulométrie [< 5] mm

Le *mode opératoire* est identique à celui décrit pour la fraction de granulométrie [4 ; 31.5] mm, si ce n'est que lors du retrait des granulats hors du pycnomètre, il faut placer un tissu sur la passoire métallique afin de récupérer la prise d'essai. Le *calcul et l'expression du résultat* s'obtiennent via l'Équation 6.

2.1.5. Cinétique d'absorption d'eau

L'étude de la cinétique d'absorption d'eau des granulats permet de déterminer l'évolution de la propriété de teneur en eau depuis l'état initial sec jusqu'à l'état final saturé (état correspondant au coefficient d'absorption d'eau). Cet essai est basé sur les normes NF EN 1097-5 et NF EN 1097-6.

Mode opératoire

Tout d'abord, couper un bas en nylon [Figure 47] afin que sa longueur soit d'environ 10 cm à l'état sec ; ce bas servira de filet permettant d'immerger la prise d'essai dans l'eau. Immerger le bas dans de l'eau pendant environ 5 secondes et le ressortir. L'essorer puis le peser (M_{Bas}). Cette masse correspond à la masse du bas à l'état légèrement humide. Peser également la prise d'essai préalablement séchée à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante ($M_{105°C}$).



Figure 47 - Bas en nylon

Remplir ensuite un bassin d'eau [Figure 48]. Placer la prise d'essai dans le bas et immerger le tout dans le bassin d'eau. Enclencher le chronomètre au moment où la prise d'essai rentre en contact avec l'eau. Peser ensuite la masse du bas contenant la prise d'essai toute les 10 minutes durant la première heure puis toutes les 30 minutes jusqu'à l'atteinte de l'état saturé²⁴ (M_t). Les pesées s'effectuent sur le bas à l'état légèrement humide et la prise d'essai de surface quasi sèche ; l'utilisation d'un ou plusieurs tissu(s) sec(s) est nécessaire.

²⁴ Les relevés de masse ont été effectués durant les 4 premières heures et après 24 h uniquement.



Figure 48 - Bassin d'eau

Calcul et expression du résultat

La teneur en eau (en pourcentage de la masse sèche) de la prise d'essai après t minutes d'immersion s'obtient en utilisant l'Équation 7.

$$W_t = \frac{100 * ((M_t - M_{Bas}) - M_{105^\circ C})}{M_{105^\circ C}} \quad \text{Équation 7}$$

où,

- M_t [g] représente la masse du bas contenant la prise d'essai après t minutes d'immersion
- M_{Bas} [g] représente la masse du bas à l'état légèrement humide
- $M_{105^\circ C}$ [g] représente la masse des granulats séchés à l'étuve à 105°C

2.1.6. Détermination de l'épaisseur de l'enrobage

La détermination de l'épaisseur de l'enrobage, sur base d'une hypothèse forte, permet d'estimer l'augmentation de la taille des GR due à l'enrobage de ceux-ci. L'hypothèse consiste à considérer les GR comme étant parfaitement sphériques.

Calcul et expression du résultat

Vu l'hypothèse posée, le diamètre de référence est donc le diamètre moyen [Équation 8] de la fraction de granulométrie étudiée; le rayon moyen d'un GR est ainsi connu [Équation 9].

$$D_{moyen} = \frac{D_{max} + D_{min}}{2} [mm] \quad \text{Équation 8}$$

$$R_{moyen} = \frac{D_{moyen}}{2} [mm] \quad \text{Équation 9}$$

S'en déduisent la surface moyenne [Équation 10] et le volume moyen [Équation 11] des GR.

$$S_{moyenne} = 4 * \pi * R_{moyen}^2 [mm^2] \quad \text{Équation 10}$$

$$V_{moyen} = \frac{4}{3} * \pi * R_{moyen}^3 [mm^3] \quad \text{Équation 11}$$

La masse moyenne théorique d'un GR [Équation 12] s'obtient en multipliant le volume moyen V_{moyen} et la masse volumique absolue ρ_a des GR.

$$M_{GR} = \frac{V_{moyen}}{1000} * \rho_a [g] \quad \text{Équation 12}$$

Connaissant la masse de l'échantillon de GR avant traitement par un produit d'enrobage ($M_{Initiale}$), il est dès lors possible de déterminer le nombre théorique de GR [Équation 13] présents dans l'échantillon.

$$N_{GR} = \frac{M_{initiale}}{M_{GR}} [g] \quad \text{Équation 13}$$

Afin de pouvoir calculer l'épaisseur de l'enrobage, il est nécessaire de connaître sa masse volumique. Lorsqu'il s'agit d'un enrobage de type pâte (comme la pâte de ciment ou encore la pâte de chaux), la masse volumique de l'enrobage [Équation 14] s'obtient grâce à la masse de produit ($M_{produit}$), la masse d'eau (M_{eau}), la masse volumique du produit ($\rho_{produit}$) et la masse volumique de l'eau (ρ_{eau}).

$$\rho_{enrobage} = \frac{M_{produit} + M_{eau}}{\frac{M_{produit}}{\rho_{produit}} + \frac{M_{eau}}{\rho_{eau}}} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad \text{Équation 14}$$

Une fois l'enrobage effectué, la masse de l'échantillon finale (M_{finale}) et la masse de l'échantillon initiale ($M_{Initiale}$) permettent de calculer la masse de l'enrobage [Équation 15].

$$M_{enrobage} = M_{finale} - M_{initiale} [g] \quad \text{Équation 15}$$

L'épaisseur de l'enrobage [Équation 16] s'obtient en combinant la masse de l'enrobage ($M_{enrobage}$), le nombre de GR (N_{GR}), la masse volumique de l'enrobage ($\rho_{enrobage}$) et la surface moyenne des GR ($S_{moyenne}$).

$$Epaisseur_{enrobage} = 1000 * \frac{M_{enrobage}}{N_{GR} * \rho_{enrobage} * S_{moyenne}} [mm] \quad \text{Équation 16}$$

Finalement, le pourcentage d'accroissement de la taille des GR [Équation 17] est obtenu en combinant l'épaisseur de l'enrobage ($Epaisseur_{enrobage}$) et le rayon moyen d'un GR (R_{moyen}).

$$Accroissement_{GR} = 100 * \frac{Epaisseur_{enrobage}}{R_{moyen}} [\%] \quad \text{Équation 17}$$

2.2. Résultats de la première phase

Les résultats présentés dans cette section sont les résultats finaux. Une partie des étapes intermédiaires est disponible en annexe [Annexes A.1 et A.3]. Seules les fractions de granulométrie [5 ; 10] mm et [10 ; 20] mm ont été étudiés lors de ce travail.

2.2.1. Coefficients d'absorption d'eau²⁵

Les résultats obtenus pour chaque type d'enrobage sont tout d'abord présentés. Ensuite, une comparaison du résultat moyen optimal (correspondant au coefficient d'absorption d'eau le plus faible) obtenu pour chaque type d'enrobage avec le coefficient d'absorption d'eau moyen des GR non traités est menée à la section 2.2.1.6.

2.2.1.1. Ciment CEM I 52.5

Etude de l'influence du rapport E/C

Les résultats [Tableau 8] pour les deux fractions de granulométrie montrent que le coefficient d'absorption d'eau est minimum pour le rapport E/C = 0.8 [Figure 49 et Figure 50]. Ces résultats sont en accord avec la littérature [Section 1.5.1]. Ce rapport a donc été choisi pour l'étude de l'influence du temps de séchage. Cependant, les coefficients obtenus après enrobage sont tous supérieurs au coefficient des GR non traités.

Coefficient d'absorption d'eau [%]	E/C = 0.5	E/C = 0.6	E/C = 0.7	E/C = 0.8	E/C = 0.9	E/C = 1.0	Non traités
Fraction [5 ; 10] mm	12.80	13.16	11.64	8.22	8.68	10.78	8.04
Fraction [10 ; 20] mm	16.63	13.71	7.88	7.50	9.22	10.61	5.56

Tableau 8 - Influence du rapport E/C de la pâte de ciment

²⁵ Tous les échantillons ayant été enrobés avaient une masse initiale de 50 ± 1 g.

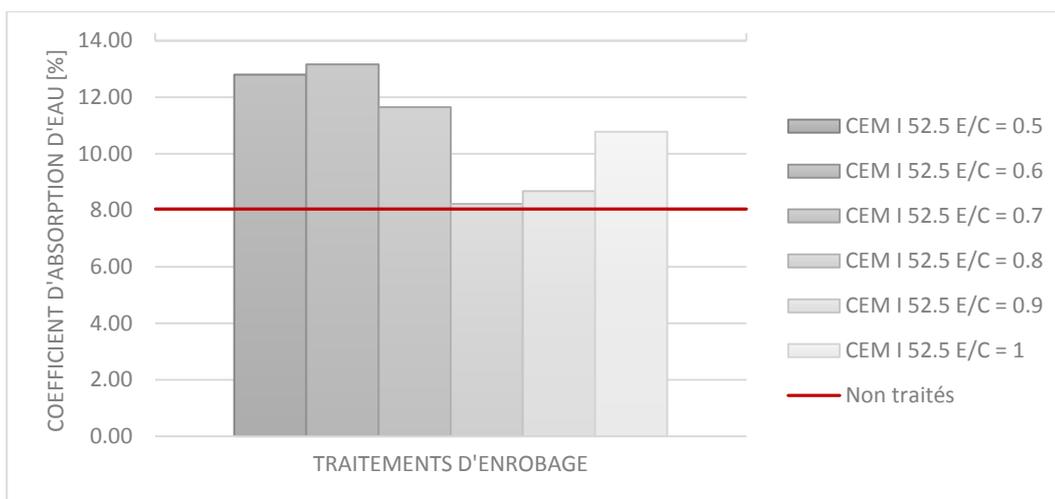


Figure 49 - Influence du rapport E/C de la pâte de ciment sur la fraction [5 ; 10] mm

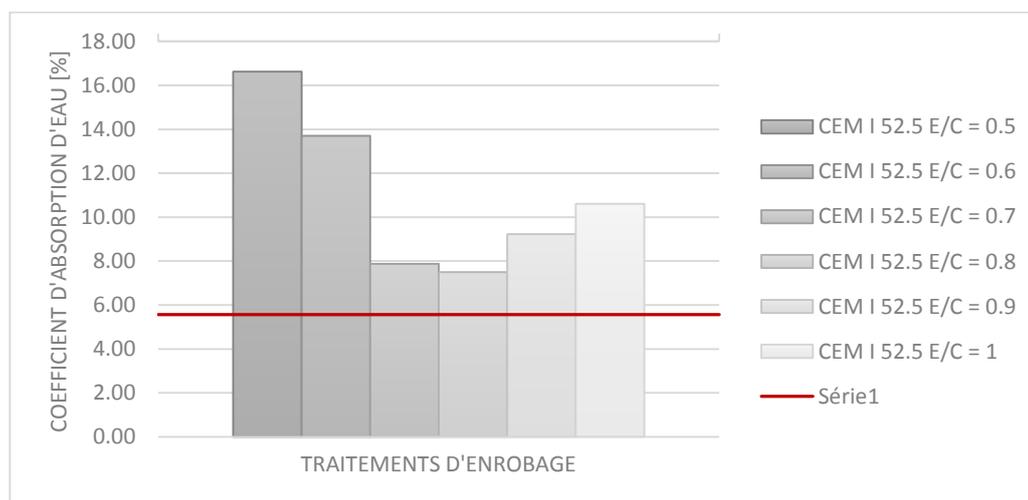


Figure 50 - Influence du rapport E/C de la pâte de ciment sur la fraction [10 ; 20] mm

Etude de l'influence du temps de séchage

Les résultats relatifs à la fraction [5 ; 10] mm [Tableau 9] montrent que le temps de séchage n'influence pas significativement le coefficient d'absorption d'eau et que celui-ci est de l'ordre de 11%. Les résultats relatifs à la fraction [10 ; 20] mm [Tableau 10] établissent cependant que le temps de séchage de plus de 72 h est préférable. Cela est dû au degré d'hydratation du ciment [voir section 2.1.1.1]. Cependant, l'ensemble de ces résultats est supérieur au coefficient d'absorption d'eau des GR non traités. Le pourcentage d'augmentation de ce coefficient [Équation 18] peut atteindre 70% pour la fraction [10 ; 20] mm.

$$Augmentation_{WA_{24}} = \left(100 * \frac{WA_{24\text{traité}}}{WA_{24\text{non traité}}} \right) - 100 [\%] \quad \text{Équation 18}$$

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Augmentation [%]
Séchage de 30 min	10.57	0.97	31.35
Séchage de 3 h	10.48	0.80	30.33
Séchage de 24 h	11.27	1.06	40.14
Séchage de 72 h	10.95	0.45	36.23

Tableau 9 - Influence du temps de séchage de la pâte de ciment sur la fraction [5 ; 10] mm

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Augmentation [%]
Séchage de 30 min	9.66	1.30	73.77
Séchage de 3 h	9.64	2.76	73.36
Séchage de 24 h	9.56	1.92	71.85
Séchage de 72 h	6.53	1.68	17.43

Tableau 10 - Influence du temps de séchage de la pâte de ciment sur la fraction [10 ; 20] mm

Observations

Après 30 minutes de séchage, le ciment n'a pas encore réagi avec l'eau et n'a donc pas encore pris. L'immersion des échantillons dans l'eau servant à les saturer a pour effet de retirer une partie de la pâte de ciment [Figure 51].



Figure 51 - Retrait de la pâte de ciment séchée pendant 30 min

2.2.1.2. 50 % ciment CEM I 52.5 / 50 % cendres volantes

Seuls des échantillons de la fraction [10 ; 20] mm ont été utilisés afin d'étudier l'influence du temps de séchage de la pâte d'enrobage sur le coefficient d'absorption d'eau. Les résultats [Tableau 11] montrent que le temps de séchage induisant le coefficient d'absorption d'eau le plus faible est égal à 3h. La raison est identique à celle donnée dans le cas de la pâte de ciment et provient du degré d'hydratation du ciment. L'ensemble de ces résultats est également supérieur au coefficient d'absorption d'eau des GR non traités. Cette augmentation du coefficient atteint les 100%.

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Augmentation [%]
Séchage de 30 min	11.20	1.57	101.41
Séchage de 3 h	7.79	0.84	40.10

Tableau 11 - Influence du temps de séchage de la pâte de ciment et de cendres volantes sur la fraction [10 ; 20] mm

2.2.1.3. Agents hydrofuges à base de Silane

L'étude de l'influence du pourcentage de matière active des agents hydrofuges montre que l'enrobage d'hydrofuge A induit le coefficient d'absorption d'eau le plus faible [Tableau 12] pour les deux fractions de granulométrie, à consommations égales. Le pourcentage de réduction absolue [Équation 19] atteint 27% pour le produit A et 21% pour le produit B. Le produit C induit quant à lui une augmentation de 4,76% du coefficient d'absorption d'eau.

$$Réduction_{absolue} = 100 - \left(100 * \frac{WA_{24n^e\ trempage}}{WA_{24non\ traité}} \right) [\%] \quad \text{Équation 19}$$

	Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Réduction absolue [%]
Hydrofuge A	Fraction [5 ; 10] mm	5.84	0.45	27.39
	Fraction [10 ; 20] mm	4.39	1.70	21.04
Hydrofuge B	Fraction [5 ; 10] mm	6.32	0.48	21.42
	Fraction [10 ; 20] mm	5.46	0.58	1.79
Hydrofuge C	Fraction [5 ; 10] mm	6.02	0.35	25.06
	Fraction [10 ; 20] mm	5.83	0.58	-4.76

Tableau 12 - Influence du pourcentage de matière active sur les fractions [5 ; 10] et [10 ; 20] mm

Le deuxième trempage des mêmes échantillons permet de réduire un peu plus le coefficient d'absorption d'eau [Tableau 13]. Le pourcentage de réduction relative du coefficient d'absorption d'eau par rapport au premier trempage [Équation 20] est significatif pour les hydrofuges A et B et est de l'ordre de 20 à 30%. Il y a par contre une augmentation du coefficient après le deuxième trempage de l'hydrofuge C, hydrofuge qui n'est pas une solution aqueuse (contrairement aux hydrofuges A et B). En ce qui concerne le pourcentage de réduction absolue du coefficient d'absorption d'eau, celui-ci atteint 45% pour le produit A et 32% pour le produit B.

$$Réduction_{relative} = 100 - \left(100 * \frac{WA_{242e\ trempage}}{WA_{241e\ trempage}} \right) [\%] \quad \text{Équation 20}$$

	Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Réduction relative [%]	Réduction absolue [%]
Hydrofuge A	Fraction [5 ; 10] mm	4.39	0.12	24.78	45.38
	Fraction [10 ; 20] mm	3.07	1.19	30.00	44.72
Hydrofuge B	Fraction [5 ; 10] mm	5.46	0.35	13.56	32.07
	Fraction [10 ; 20] mm	3.87	0.70	29.07	30.34
Hydrofuge C	Fraction [5 ; 10] mm	5.83	1.11	3.31	27.54
	Fraction [10 ; 20] mm	5.51	0.51	5.37	0.86

Tableau 13 - Influence du 2e trempage sur le coefficient d'absorption d'eau sur les fractions [5 ; 10] et [10 ; 20] mm

2.2.1.4. Chaux

L'enrobage de chaux induit un coefficient d'absorption d'eau de l'ordre de 10% [Tableau 14]. Ce type d'enrobage a pour effet d'augmenter le coefficient d'absorption d'eau des GR. L'augmentation atteint 66% dans le cas de la fraction [10 ; 20] mm.

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Augmentation [%]
Fraction [5 ; 10] mm	12.48	1.69	55.30
Fraction [10 ; 20] mm	9.28	2.09	66.83

Tableau 14 - Coefficient d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] et [10 ; 20] mm traités à la chaux

2.2.1.5. Amidon

Lors de l'étude de l'influence du rapport E/A, seulement deux échantillons par mélange de rapport E/A différent ont été enrobés. Cependant, une moyenne et un écart-type ont tout de même été déterminés [Tableau 15]. Ce traitement a lui aussi pour effet d'augmenter le coefficient d'absorption d'eau des GR, jusqu'à atteindre un pourcentage d'augmentation de 100%.

	Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Augmentation [%]
Fraction [5 ; 10] mm	Amidon E/A = 1	10.94	0.94	36.12
	Amidon E/A = 2	8.16	0.40	1.51
Fraction [10 ; 20] mm	Amidon E/A = 2	11.26	0.70	102.50

Tableau 15 - Influence du rapport E/A sur les fractions [5 ; 10] et [10 ; 20] mm

Les deux pâtes d'amidon donnent des résultats sensiblement égaux, avec des coefficients d'absorption d'eau avoisinant les 10%.

Observations

L'immersion des échantillons de fraction [5 ; 10] mm dans l'eau servant à les saturer a pour effet de retirer une partie de la pâte d'amidon ; en effet, celle-ci se dilue dans l'eau. Sachant que

l'enrobage se décolle après séchage, il ne reste pratiquement aucun enrobage après passage des GR traités dans l'eau [Figure 52].



Figure 52 - Retrait de l'enrobage d'amidon par l'eau

2.2.1.6. Comparaison des résultats

La comparaison [Figure 53 et Figure 54] des résultats moyens optimaux [Tableau 16 et Tableau 17] obtenus pour chaque type d'enrobage avec le coefficient d'absorption d'eau moyen des GR non traités démontrent que les agents hydrofuges à base de Silane (après deux trempages de 5 minutes) permettent de diminuer significativement ce coefficient d'absorption d'eau. Une diminution respectivement de l'ordre de 40%, 40% et 20% pour les hydrofuges A B et C a lieu pour la fraction de granulométrie [5 ; 10] mm et de l'ordre de 45%, 30% et 1% pour la fraction [10 ; 20] mm. Ce qui amène à la conclusion que l'hydrofuge A est le plus performant. Ce sont cependant les seuls produits d'enrobage permettant d'influencer positivement le coefficient d'absorption d'eau. Effectivement, les enrobages de ciment, ciment et cendres volantes, chaux et amidon augmentent la propriété d'absorption d'eau. Ainsi, tous les enrobages de type pâte fournissent l'effet contraire à celui attendu : le coefficient d'absorption d'eau augmente. L'hypothèse est que lorsque la pâte d'enrobage sèche, l'eau laisse place à des vides et rend donc l'enrobage poreux, voire plus poreux que le mortier résiduel attaché aux GR.

Traitement	Moyenne [%]	Ecart-type [%]	Réduction [%]
Non traités	8.04	0.48	/
CEM I 52.5 E/C = 0.8 ²⁶	10.48	0.80	/
Hydrofuge A (1e trempage)	5.84	0.45	27.39
Hydrofuge A (2e trempage)	4.77	0.12	40.67
Hydrofuge B (1e trempage)	6.32	0.48	21.42
Hydrofuge B (2e trempage)	4.71	0.35	41.46
Hydrofuge C (1e trempage)	6.02	0.35	25.06
Hydrofuge C (2e trempage)	6.28	1.11	21.96
Chaux E/C = 2	12.48	1.69	/
Amidon E/A=2	8.16	0.40	/

Tableau 16 – Résultats moyens optimaux – Fraction [5 ; 10] mm

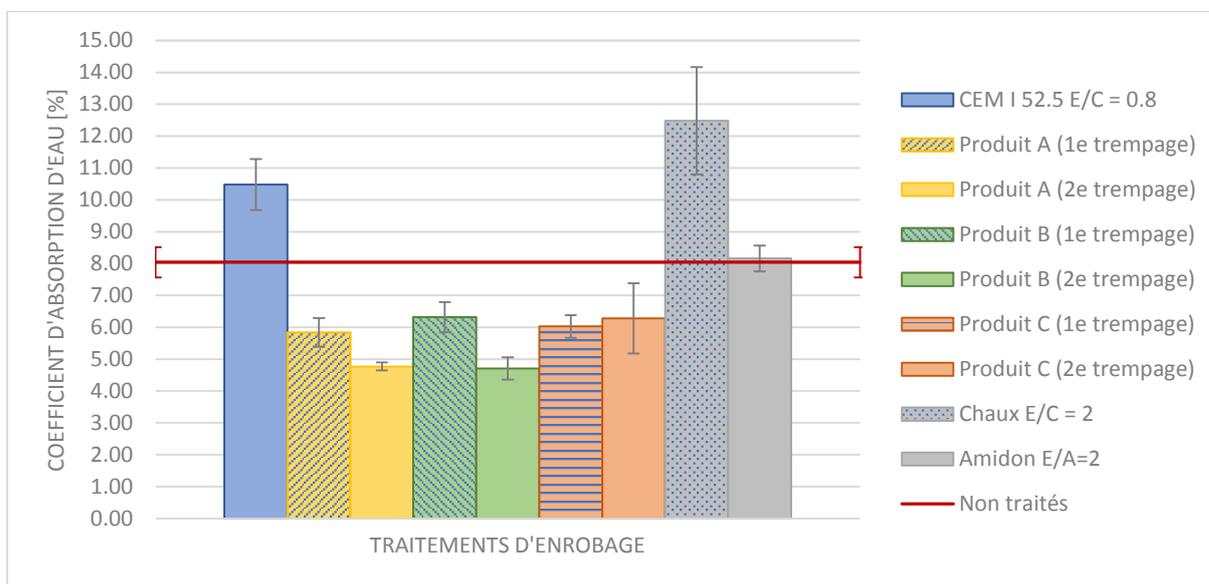


Figure 53 - Comparaison des différents traitements - Fraction [5 ; 10] mm

²⁶ 3h de temps de séchage

Traitement	Moyenne [%]	Ecart-type [%]	Réduction [%]
Non traités	5.56	0.53	/
Non traités	5.56	0.53	/
CEM I 52.5 E/C = 0.8	6.53	1.68	/
50% CEM I 52.5 / 50% CV E/C=0.8	7.79	0.84	/
Hydrofuge A (1e trempage)	4.39	1.70	21.04
Hydrofuge A (2e trempage)	3.07	1.19	44.72
Hydrofuge B (1e trempage)	5.46	0.58	1.79
Hydrofuge B (2e trempage)	3.87	0.70	30.34
Hydrofuge C (1e trempage)	5.83	0.58	/
Hydrofuge C (2e trempage)	5.51	0.51	0.86
Chaux E/C = 2	9.28	2.09	/
Amidon E/A=2	11.26	0.70	/

Tableau 17 - Résultats moyens optimaux – Fraction [10 ; 20] mm

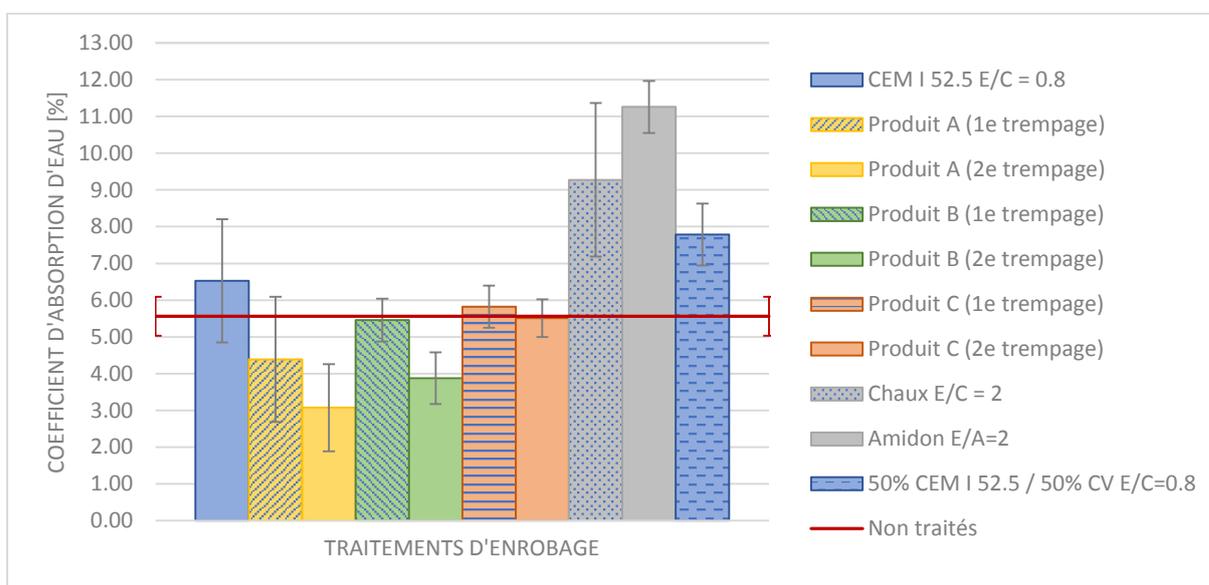


Figure 54 - Comparaison des différents traitements - Fraction [10 ; 20] mm

2.2.2. Cinétique d'absorption d'eau

Cet essai a été mené sur tous les échantillons étudiés dans la section 2.2.1 et sur les échantillons de référence, c'est-à-dire non traités. Ainsi, les valeurs de la teneur en eau au cours du temps d'immersion [voir Annexes A.3, Tableau 48 et Tableau 49] ont permis de déterminer une valeur moyenne [Tableau 18 et Tableau 19] d'après l'Équation 1 et ce, pour chaque traitement. Une comparaison graphique du comportement des GR traités et non traités peut donc être effectuée pour chaque type d'enrobage. L'allure des courbes relatives à la fraction [5 ; 10] mm [Figure 55 à Figure 60] est identique celle des courbes relatives à la fraction [10 ; 20] mm [voir Annexes A.3, Figure 93 à Figure 99].

Afin de relier les points représentant les teneurs en eau moyennes au temps t , il a été décidé d'utiliser la courbe de tendance correspondant à la moyenne mobile [Équation 21]. La moyenne mobile (ou moyenne glissante) permet de donner l'allure générale du comportement des GR au cours du temps négligeant les fluctuations transitoires, c'est-à-dire en lissant les erreurs de mesures dues à la présence d'eau résiduelle au sein des échantillons. Afin de représenter au mieux la réalité, la période choisie est de 2.

$$\bar{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{n-k} \text{ , où } N = 2 \quad \text{Équation 21}$$

Ces graphiques montrent que les agents hydrofuges à base de Silane permettent non seulement de diminuer le coefficient d'absorption d'eau, mais également de contrôler l'absorption d'eau au cours du temps d'immersion.

Teneur en eau [%]	t = 0 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min	t = 40 min	t = 50 min	t = 60 min	t = 90 min	t = 120 min	t = 150 min	t = 180 min	t = 210 min	t = 240 min	t = 1440 min
Non traités	0.00	5.66	4.95	5.51	5.03	4.58	4.59	4.98	6.05	7.43	7.63	7.47	7.84	8.04
CEM I 52.5 E/C = 0.8	0.00	9.03	8.81	9.17	10.55	7.00	6.98	7.22	7.38	10.54	9.37	9.75	9.93	10.48
Hydrofuge A (2e trempage)	0.00	1.16	1.76	1.77	2.14	1.54	1.75	1.75	1.59	3.49	3.84	4.36	4.31	4.77
Hydrofuge B (2e trempage)	0.00	3.64	3.30	3.01	3.65	3.41	3.67	3.74	3.47	4.01	4.28	4.43	4.44	4.71
Hydrofuge C (2e trempage)	0.00	2.81	2.45	2.39	2.74	2.87	3.24	3.85	3.94	4.71	5.68	5.71	6.27	6.28
Chaux E/C = 2	0.00	13.46	13.27	13.44	13.38	13.82	12.83	13.22	11.09	11.06	12.07	12.74	13.53	13.67
Amidon E/A=2	0.00	4.33	4.27	4.13	4.90	4.90	4.96	4.40	6.48	7.00	7.10	7.35	7.43	8.16

Tableau 18 - Moyenne de la cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm

Teneur en eau [%]	t = 0 min	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min	t = 40 min	t = 50 min	t = 60 min	t = 90 min	t = 120 min	t = 150 min	t = 180 min	t = 210 min	t = 240 min	t = 1440 min
Non traités	0.00	2.91	3.56	3.35	3.27	3.05	3.19	3.37	3.91	4.26	4.09	4.42	4.91	5.56
CEM I 52.5 E/C = 0.8	0.00	2.95	3.56	3.54	4.01	2.65	2.72	3.95	4.36	6.02	5.41	5.79	6.46	6.53
50 % CEM I 52.5 / 50% CV E/C = 0.8	0.00	3.88	4.36	4.53	4.17	3.50	3.54	4.82	4.60	6.24	5.60	6.21	6.65	6.57
Hydrofuge A (2e trempage)	0.00	0.69	0.91	1.15	1.41	1.21	1.45	0.95	1.40	1.78	1.70	1.99	2.21	3.07
Hydrofuge B (2e trempage)	0.00	1.55	1.51	1.60	1.56	2.07	2.18	2.19	2.07	2.17	2.13	2.62	2.94	3.87
Hydrofuge C (2e trempage)	0.00	1.60	1.78	1.83	1.47	1.76	1.98	1.54	1.84	1.66	2.32	2.88	3.90	5.51
Chaux E/C = 2	0.00	6.38	6.27	5.27	5.23	6.05	6.14	5.38	6.01	6.83	6.29	6.68	7.28	9.28
Amidon E/A=2	0.00	9.35	8.33	7.68	8.12	8.40	8.76	8.44	8.56	9.79	9.70	9.85	10.31	11.26

Tableau 19 - Moyenne de la cinétique d'absorption d'eau des GR [10 ; 20] mm

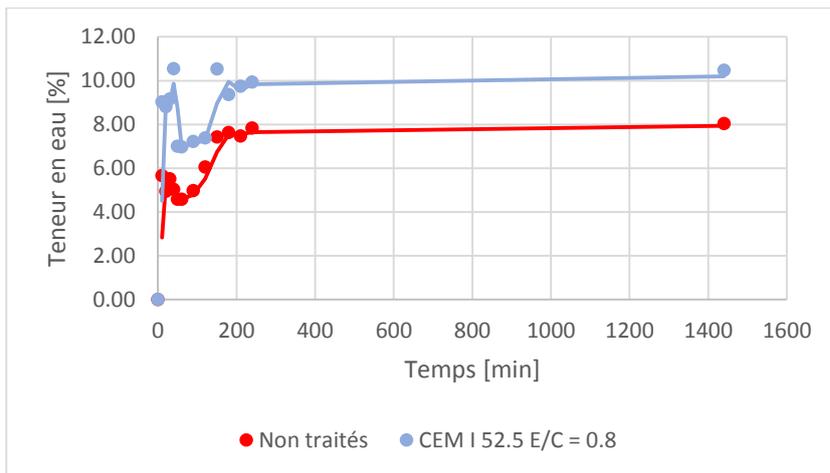


Figure 55 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm - CEM I 52.5

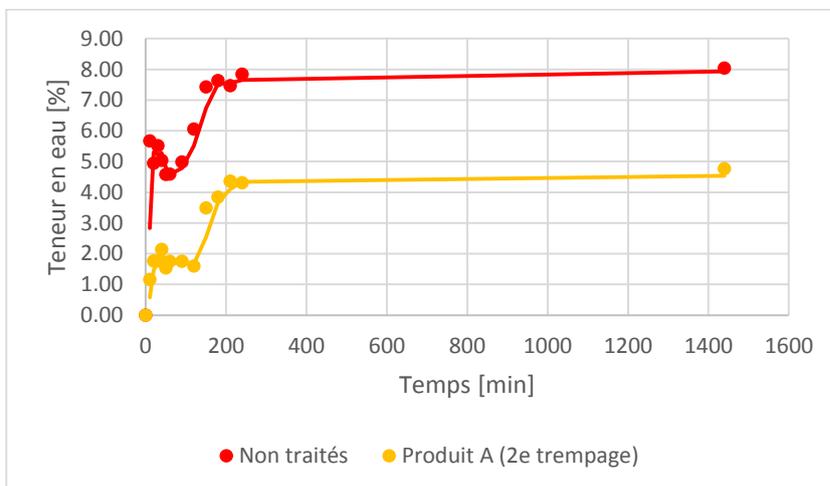


Figure 56 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm - Hydrofuge A (2e trempage)

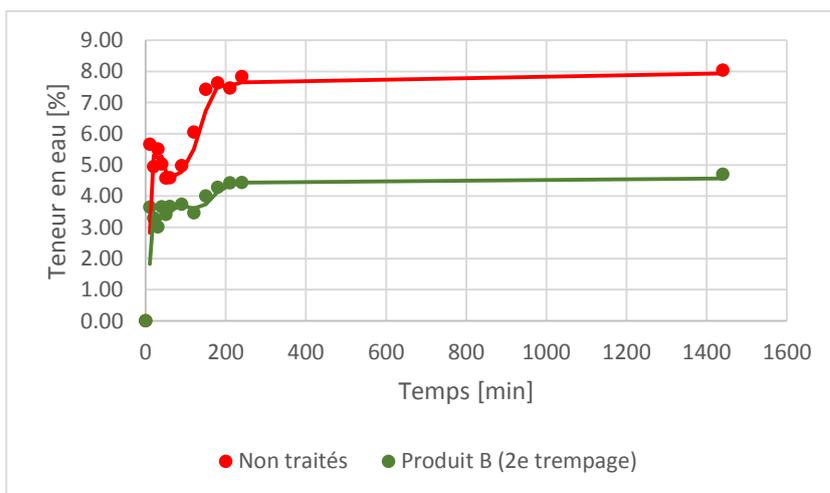


Figure 57 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm - Hydrofuge B (2e trempage)

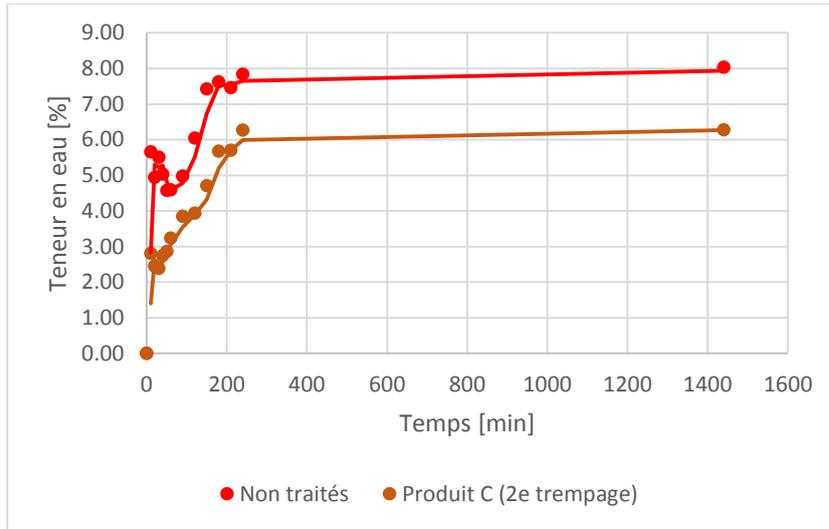


Figure 58 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm - Hydrofuge C (2e trempage)

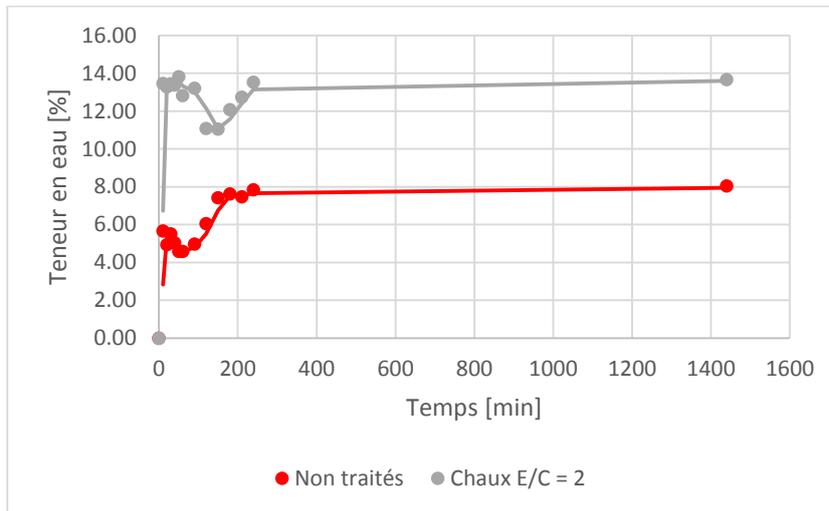


Figure 59 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm - Chaux

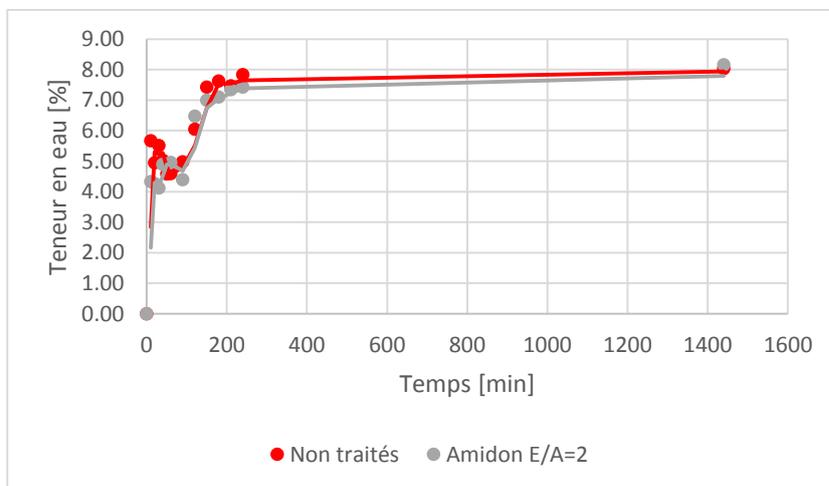


Figure 60 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm - Amidon

2.2.3. Épaisseur des enrobages

L'épaisseur des enrobages de type pâte a été déterminée pour les deux fractions de granulométrie étudiés²⁷. Le pourcentage d'augmentation de la taille des GR a également été déterminé ; celui-ci a toujours été ramené à la taille théorique du GR moyen²⁸ de la fraction considéré. Une analyse des résultats relatifs à chaque traitement précède une comparaison des épaisseurs associées aux résultats optimaux vis-à-vis du coefficient d'absorption d'eau (voir section 2.2.1).

2.2.3.1. Ciment CEM I 52.5²⁹

L'épaisseur des enrobages et l'augmentation de la taille des GR en fonction du rapport E/C des mélanges [Tableau 20] montrent qu'en général, l'épaisseur diminue lorsque le rapport E/C augmente [Figure 61 et Figure 62] ; plus la pâte d'enrobage contient de l'eau, plus l'épaisseur de l'enrobage est faible.

	Épaisseur de l'enrobage	E/C = 0.5	E/C = 0.6	E/C = 0.7	E/C = 0.8	E/C = 0.9	E/C = 1.0
Fraction [5 ; 10] mm	Épaisseur [mm]	0.43	0.58	0.24	0.15	0.20	0.04
	Augmentation de la taille des GR [%]	11.39	15.44	6.37	3.93	5.25	1.02
Fraction [10 ; 20] mm	Épaisseur [mm]	1.71	0.75	0.24	0.12	0.16	0.15
	Augmentation de la taille des GR [%]	22.74	9.99	3.21	1.56	2.17	1.95

Tableau 20 - Épaisseur des enrobages en fonction du rapport E/C des mélanges

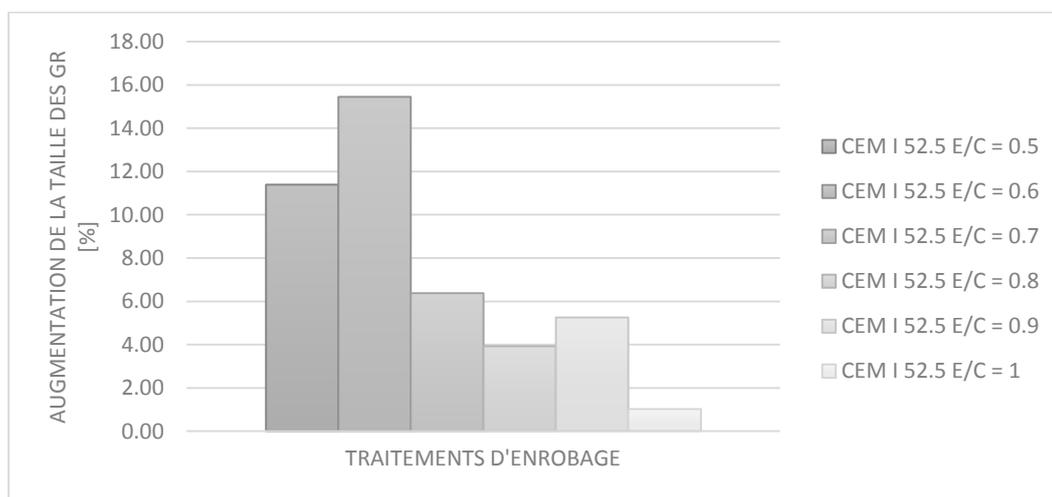


Figure 61 - Épaisseur des enrobages en fonction du rapport E/C des mélanges - Fraction [5 ; 10] mm

²⁷ Les agents hydrofuges ne sont pas considérés dans cette section car ceux-ci n'influencent pas l'épaisseur des GR.

²⁸ Selon la méthode exposée à la section 2.1.6.

²⁹ $\rho_{\text{ciment}} = 2,99 \text{ g/cm}^3$ et $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g/cm}^3$

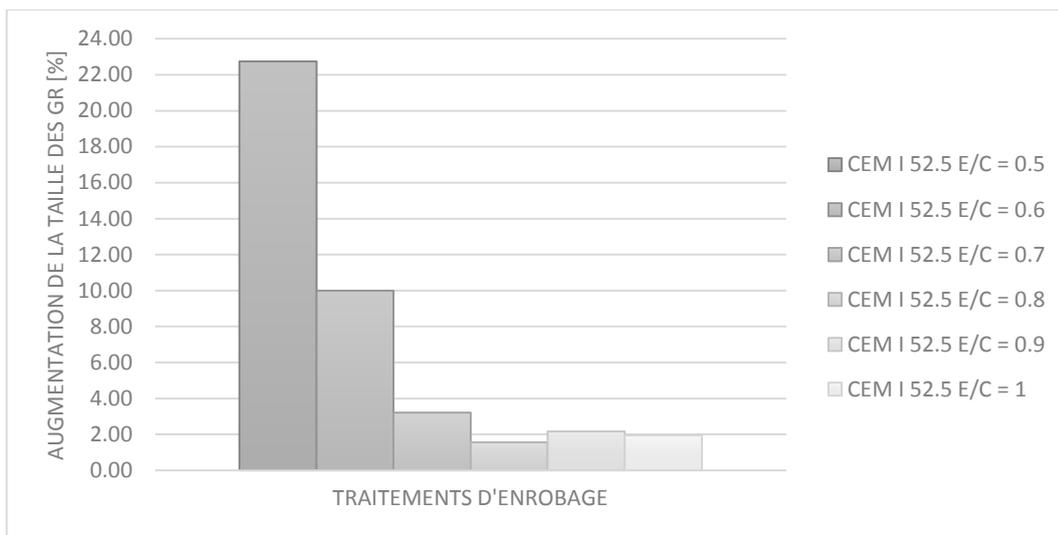


Figure 62 - Epaisseur des enrobages en fonction du rapport E/C des mélanges - Fraction [10; 20] mm

En ce qui concerne l'épaisseur de l'enrobage en fonction du temps de séchage [Tableau 21 et Tableau 22] (pour un rapport E/C = 0.8 fixé), il apparaît que l'épaisseur diminue lorsque le temps de séchage augmente. Cette tendance s'explique par le fait que l'épaisseur de l'enrobage est directement liée à la quantité de matière solide présente dans la pâte.

Epaisseur de l'enrobage [mm]	Moyenne	Ecart-type	Augm. [%]
Séchage de 30 min	0.31	0.06	8.23
Séchage de 3 h	0.22	0.05	5.89
Séchage de 24 h	0.20	0.03	5.30
Séchage de 72 h	0.18	0.03	4.76

Tableau 21 - Epaisseur de l'enrobage de ciment en fonction du temps de séchage – Fraction [5 ; 10] mm

Epaisseur de l'enrobage [mm]	Moyenne	Ecart-type	Augm. [%]
Séchage de 30 min	0.53	0.03	7.09
Séchage de 3 h	0.40	0.11	5.36
Séchage de 24 h	0.26	0.07	3.46
Séchage de 72 h	0.16	0.02	2.11

Tableau 22 - Epaisseur de l'enrobage de ciment en fonction du temps de séchage – Fraction [10 ; 20] mm

2.2.3.2. 50 % ciment CEM I 52.5 / 50 % cendres volantes³⁰

La même tendance générale que celle observée dans le cas de l'enrobage de ciment est suivie pour ce traitement [Tableau 23].

³⁰ $\rho_{\text{cendres volantes}} = 2,21 \text{ g/cm}^3$

Epaisseur de l'enrobage [mm]	Moyenne	Ecart-type	Augm. [%]
Séchage de 30 min	0.56	0.09	7.52
Séchage de 3 h	0.27	0.04	3.62
Séchage de 24 h	0.29	0.11	3.88
Séchage de 72 h	0.25	0.13	3.35

Tableau 23 - Epaisseur de l'enrobage de ciment et de c.v. en fonction du temps de séchage – Fraction [10 ; 20] mm

2.2.3.3. Chaux³¹

Les pourcentages d'augmentation de la taille des GR ne dépassent pas les 6%, contrairement aux enrobages de ciment.

Epaisseur de l'enrobage [mm]	Moyenne	Ecart-type	Augm. [%]
Fraction [5 ; 10] mm	0.20	0.03	5.28
Fraction [10 ; 20] mm	0.26	0.05	3.47

Tableau 24 - Epaisseur de l'enrobage de chaux E/C = 2 - Fractions [5 ; 10] et [10 ; 20] mm

2.2.3.4. Amidon³²

Ce type d'enrobage semble avoir une plus forte influence sur la fraction [5 ; 10] mm que sur la fraction [10 ; 20] mm.

	Epaisseur de l'enrobage [mm]	Moyenne	Ecart-type	Augm. [%]
Fraction [5 ; 10] mm	Amidon E/A = 1	0.24	0.03	6.48
	Amidon E/A = 2	0.11	0.00	2.81
Fraction [10 ; 20] mm	Amidon E/A = 1	0.28	0.13	3.72
	Amidon E/A = 2	0.19	0.09	2.49

Tableau 25 - Epaisseur des enrobages d'amidon - Fractions [5 ; 10] et [10 ; 20] mm

2.2.3.5. Comparaison des résultats

La comparaison [Figure 63 et Figure 64] des augmentations moyennes de la taille des GR [Tableau 26 et Tableau 27] associées aux différents traitements de surface de type pâte optimaux (du point de vue de la réduction du coefficient d'absorption d'eau) montre que l'ensemble des traitements limite l'accroissement de taille des GR (accroissement oscillant respectivement entre 2 à 6 % et entre 2 à 4 % pour les fractions [5 ; 10] et [10 ; 20] mm).

³¹ $\rho_{chaux} = 2,66 \text{ g/cm}^3$

³² $\rho_{amidon} = 1,5 \text{ g/cm}^3$

Traitements	Augmentation moyenne [%]
CEM I 52.5 E/C = 0.8	5.89
Chaux E/C = 2	5.28
Amidon E/A=2	3.16

Tableau 26 - Augmentations moyennes des différents traitements - Fraction [5 ; 10] mm

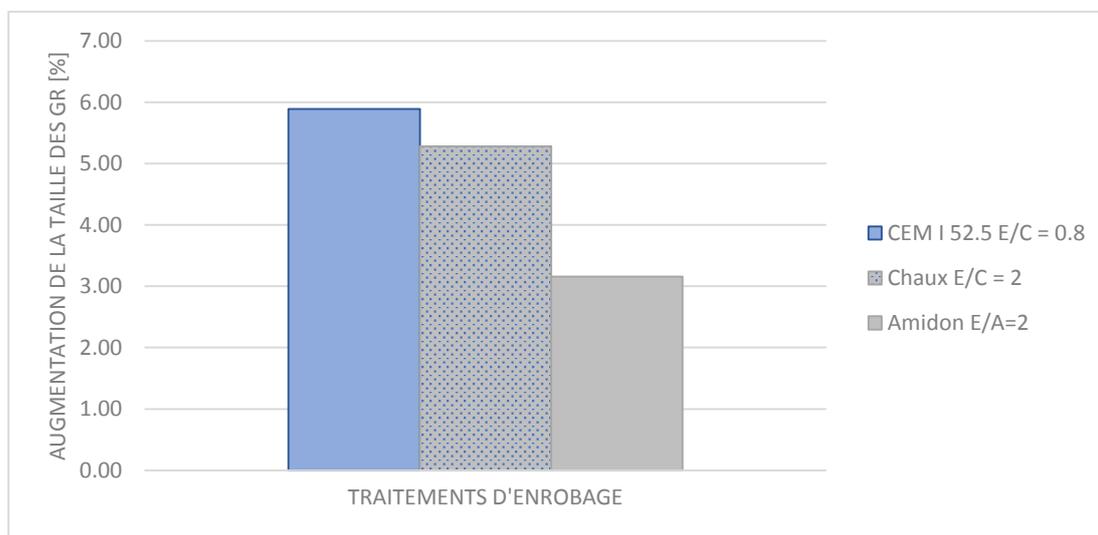


Figure 63 - Comparaison des augmentations moyennes des différents traitements de type pâte - Fraction [5 ; 10] mm

Traitements	Augmentation moyenne [%]
CEM I 52.5 E/C = 0.8	2.11
50% CEM I 52.5 / 50% CV E/C=0.8	3.62
Chaux E/C = 2	3.47
Amidon E/A=2	2.80

Tableau 27 - Augmentations moyennes des différents traitements de type pâte - Fraction [10 ; 20] mm

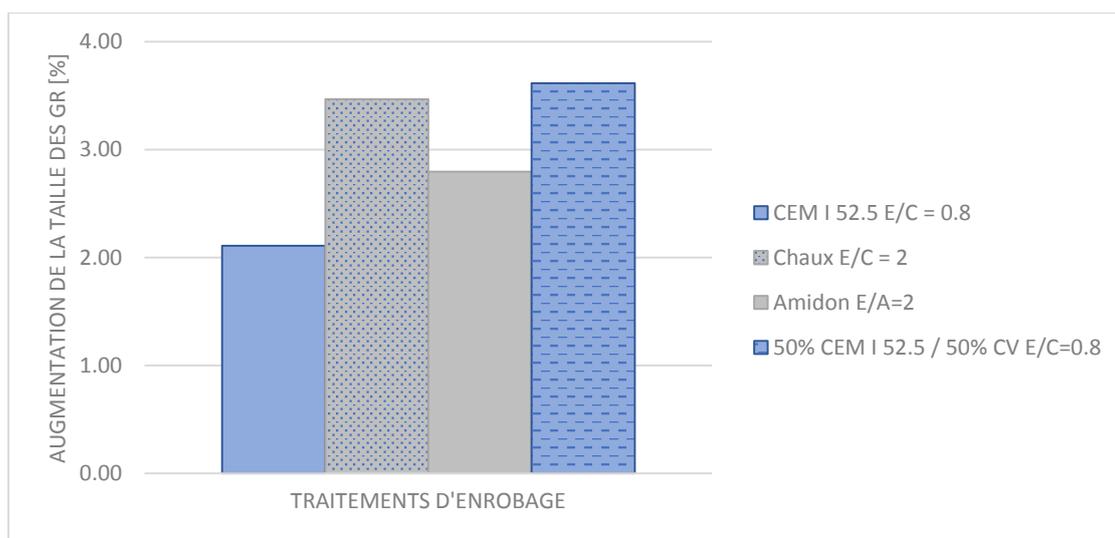


Figure 64 - Comparaison des augmentations moyennes des différents traitements de type pâte - Fraction [10 ; 20] mm

2.2.4. Conclusion

Au terme de cette première phase, il est possible de répondre à la question : *Quel traitement permet de réduire la cinétique d'absorption d'eau des GR?*

En effet, il en ressort que seuls les agents hydrofuges à base de Silane à base aqueuse de 20 % (Hydrofuge A) et 40 % (Hydrofuge B) de matière active permettent de réduire significativement le coefficient d'absorption d'eau ainsi que la cinétique d'absorption d'eau des GR appartenant aux fractions de granulométrie [5 ; 10] mm et [10 ; 20] mm. La réduction après deux trempages de 5 minutes est respectivement de l'ordre de 40% à 50% et de 30% pour les hydrofuges A et B. La consommation massique par trempage de 5 minutes oscille quant à elle entre 1% et 4%, selon la fraction considérée.

L'hydrofuge A, contenant seulement 20 % de matière active, est meilleur marché que l'hydrofuge B qui lui, en contient 40 %³³. De plus, il a un rendement supérieur en termes de réduction du coefficient d'absorption d'eau. C'est principalement pour ces raisons que ce produit a été retenu pour la deuxième phase du travail, phase permettant d'étudier l'influence du traitement de surface des GR sur certaines propriétés du béton les contenant.

³³ Les prix hors TVA des hydrofuges A et B sont respectivement de 7,30€/l et de 8,20€/l.

2.3. Deuxième phase : influence des traitements sur les propriétés du béton

Lors de cette deuxième phase, l'objectif est d'étudier l'influence du traitement permettant de réduire au mieux le coefficient d'absorption d'eau des GR sur les propriétés du béton telles que l'ouvrabilité et la résistance mécanique. Le produit retenu est l'hydrofuge A qui correspond à un agent hydrofuge à base de Silane contenant 20 % de matière active.

Afin d'étudier au mieux cette influence, trois séries de béton sont réalisées : ces séries sont respectivement constituées de béton contenant des GN, de béton contenant des GR non traités et de béton contenant des GR traités à l'hydrofuge A. Les études menées sur ces bétons, à savoir la détermination de l'affaissement, de la teneur en air, de la masse volumique et des résistances à la compression et à la traction (après 28 jours) permettent une comparaison des propriétés des bétons.

Les résultats présentés dans cette section sont les résultats finaux. Les étapes intermédiaires sont disponibles en annexe [Annexe A.4].

2.3.1. Préparation des échantillons

Les trois séries de béton sont réalisées sur base de la formule adoptée par la société PREFER pour la fabrication de hourdis prêts à l'emploi.

2.3.1.1. Béton de granulats naturels

Ce béton traditionnel sert de référence. Il est exclusivement constitué de GN. Les propriétés moyennes telles que masse volumique absolue, teneur en eau et coefficient d'absorption d'eau ont été calculées [Tableau 28] sur base des essais décrits lors de la première phase. Les GN utilisés sont des calcaires concassés de calibres 2/8 et 6/14 provenant de la société PREFER. Le sable naturel 0/2 provient de la société allemande Rheinische Baustoffwerke.

	Masse vol. absolue [g/cm ³]	Teneur en eau [%]	Coeff. d'abs. d'eau [%]
Sable 0/2 ³⁴	2.65	1.47	0.70
GN 2/8	2.76	0.80	1.25
GN 6/14	2.76	0.18	0.38

Tableau 28 - Propriétés des GN

La formulation théorique du béton a été corrigée [Tableau 29] afin de prendre en compte la teneur en eau [Équation 4] des GN ainsi que leur coefficient d'absorption d'eau [Équation 5]. Le raisonnement se base sur ces deux équations mais réarrangées [Équation 22 et Équation 23] et permet de déterminer les masses humides de chaque constituant [Équation 22] et la quantité d'eau qu'ils contiennent [Équation 24]. Ce raisonnement est tiré de la littérature se rapportant aux techniques de mélange [Section 1.5.3].

³⁴ La masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau proviennent de la fiche technique.

$$W = \frac{100 * (M_{humide} - M_{sèche})}{M_{sèche}} \Leftrightarrow M_{humide} = \left(\frac{W * M_{sèche}}{100} \right) + M_{sèche} [kg] \quad \text{Équation 22}$$

$$WA_{24} = \frac{100 * (M_{SSD} - M_{sèche})}{M_{sèche}} \Leftrightarrow M_{SSD} = \left(\frac{WA_{24} * M_{sèche}}{100} \right) + M_{sèche} [kg] \quad \text{Équation 23}$$

$$M_{eau\ présente} = M_{humide} - M_{théorique} [kg] \quad \text{Équation 24}$$

Finalement, la quantité corrigée d'eau à ajouter au mélange [Équation 25] s'obtient sur base de ces nouvelles équations. Cette correction appliquée à la formulation est également effectuée lors de la réalisation des deux autres séries de béton [section 2.3.1.2 et 2.3.1.3]. Le but recherché est que les rapports E/C des trois séries de béton soient exactement identiques afin de pouvoir comparer au mieux les résultats obtenus.

$$M_{eau\ aj.\ corr.} = M_{eau\ thé.} - \sum_i M_{eau\ présente\ i} + \left(\frac{\sum_i WA_{24\ i} * M_{sèche\ i}}{100} \right) [kg] \quad \text{Équation 25}$$

Béton avec GN	Masse théorique [kg]	Masse réelle [kg]	Masse d'eau présente [kg]
Ciment CEM I 52.5	9.6	9.6	\
Eau ajoutée	4.95	4.902	\
Sable 0/2	24	24.353	0.353
GN 2/8	26.4	26.611	0.211
GN 6/14	9.6	9.618	0.018

Tableau 29 - Formulation du béton avec GN corrigée

Procédure de fabrication

Tout d'abord, chaque composant a été minutieusement pesé et placé dans un seau en plastique [Figure 65]. Les parois du malaxeur [Figure 66], constitué de deux pâles rotatives ainsi d'un racleur de parois, ont ensuite été humectées. La procédure de fabrication du béton a finalement pu être suivie pour obtenir le béton désiré [Figure 67] :

- Placer l'ensemble des granulats, aussi bien fins que grossiers, dans le malaxeur
- Mélanger pendant 30 secondes
- Verser ensuite la moitié de la quantité d'eau à ajouter
- Mélanger pendant 120 secondes
- Laisser reposer le mélange pendant 120 secondes
- Placer l'entièreté du ciment
- Mélanger pendant 30 secondes
- Verser le restant d'eau
- Mélanger pendant 90 secondes



Figure 65 - Composants du béton de GN

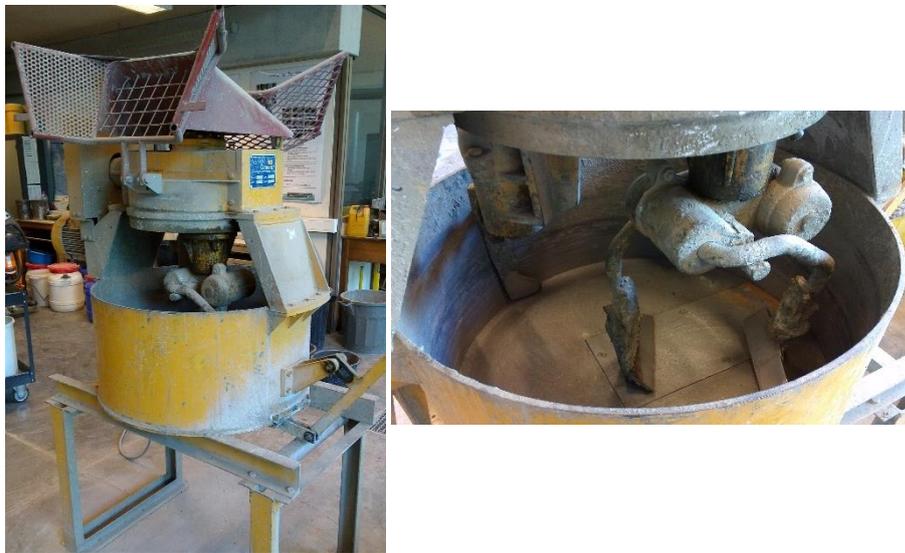


Figure 66 - Malaxeur



Figure 67 - Béton de GN

2.3.1.2. Béton de granulats recyclés non traités

Ce béton de GR, identiques à ceux étudiés lors de la première phase, a été réalisé sur base de la même procédure ainsi que de la même formulation qu'énoncées précédemment dans la section 2.3.1.1. Les GR ont été tamisés à l'aide des tamis 2 mm, 7,1 mm, 6,3 mm et 14 mm afin de les répartir selon les fractions de granulométrie [2 ; 7,1] mm et [6,3 ; 14] mm. Ces fractions ont été choisies en fonction des calibres des GN utilisés pour fabriquer le béton de référence et de la disponibilité des tamis³⁵, dans le but de pouvoir comparer au mieux les résultats obtenus.

Une fois répartis par granulométrie, les GR ont été classés selon leur composition [Tableau 30 et Tableau 31] [Figure 69 et Figure 70] suivant la Norme NF EN 933-11. Cette classification consiste en un tri manuel de particules constituant une prise d'essai de GR [Figure 68]. Ces particules sont réparties en différentes classes telles que les matériaux bitumineux, les céramiques, les éléments de béton (mortier, GN), les corps flottants tels que le bois et les particules fines. La méthode suivie afin de réaliser cet essai provient de la Norme NF EN 933-11.



Figure 68 - Essai de classification des GR

Le mode opératoire consiste à peser la prise d'essai et l'étaler sur une surface plane. Il faut ensuite séparer les particules et les répartir dans les quatre classes décrites ci-dessus. Finalement, peser chaque classe afin de pouvoir les comparer à la masse totale de la prise d'essai. Le calcul et l'expression du résultat consistent à calculer le pourcentage massique des particules appartenant à chaque classe suivant l'Équation 26.

$$P_{classe} = \frac{M_{classe}}{M_{totale}} * 100 \text{ [%]} \quad \text{Équation 26}$$

Il en ressort qu'en moyenne³⁶, les GR présentent plus de 80 % d'éléments de béton et ce, pour les deux fractions de granulométrie considérés. Les matériaux bitumineux sont présents à hauteur de 5 à 9 % pour les fractions [2 ; 7.1] et [6.3 ; 14] mm, ce qui peut induire une diminution de la résistance mécanique du béton durci. Les quantités de céramiques et de corps flottants (ici le bois)

³⁵ Les tamis 6 mm et 8 mm n'étaient pas disponibles

³⁶ Détails présents à l'annexe A.4.

ne représentent qu'un très faible pourcentage de présence, ce qui limite les effets néfastes induits par ceux-ci. La quantité de fines non valorisables est négligeable.

Types de matériaux	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	22.77	4.93
Céramiques	7.72	1.67
Béton, mortier, granulats naturels	430.38	93.24
Bois	0.08	0.02
Particules fines	0.61	0.13
Total	461.56	100.00

Tableau 30 - Classification moyenne des GR - Fraction [2 ; 7.1] mm



Figure 69 - Classification des GR - Fraction [2 ; 7.1] mm

Types de matériaux	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	41.65	8.77
Céramiques	12.87	2.71
Béton, mortier, granulats naturels	419.77	88.40
Bois	0.43	0.09
Particules fines	0.11	0.02
Total	474.84	100.00

Tableau 31 - Classification moyenne des GR - Fraction [6.3 ; 14] mm



Figure 70 - Classification des GR - Fraction [6.3 ; 14] mm

Le sable de calibre 0/2, quant à lui, ne provient pas de matériaux recyclés. Il est identique à celui utilisé pour la fabrication du béton de référence. Les propriétés moyennes des GR appartenant à ces fractions ont été déterminées [Tableau 32]. Le premier constat est que le coefficient d'absorption d'eau des GR est bel et bien supérieur au coefficient d'absorption d'eau des GN. Deuxièmement, la masse volumique des GR est plus faible que celle des GN.

	Masse vol. absolue [g/cm ³]	Teneur en eau [%]	Coeff. d'abs. d'eau [%]
Sable 0/2	2.65	1.47	0.70
GR 2/7.1	2.63	10.89	11.42
GR 6.3/14	2.56	7.43	9.55

Tableau 32 - Propriétés des GR non traités et du sable naturel

La formulation corrigée de ce béton [Tableau 33] montre à quel point la teneur en eau des composants [Figure 71] peut influencer la quantité d'eau à ajouter au mélange. La *procédure de fabrication* est identique à celle du béton de référence.

Béton avec GR non traités	Masse théorique [kg]	Masse corrigée [kg]	Masse d'eau [kg]
Ciment	9.6	9.6	\
Eau ajoutée	4.95	5.110	\
Sable 0/2	24	24.353	0.353
GR 2/7.1	26.4	29.274	2.874
GR 6.3/14	9.6	10.313	0.713

Tableau 33 - Formulation du béton avec GR non traités corrigée



Figure 71 - Composants du béton de GR non traités

2.3.1.3. Béton de granulats recyclés traités

Ce béton a également été réalisé selon les mêmes procédures de réalisation et formulations décrites précédemment. La différence réside dans la préparation des composants du béton, et plus particulièrement dans la préparation des GR appartenant aux fractions [2 ; 7.1] mm et [6.3 ; 14] mm. En effet, ceux-ci ont été préalablement enrobés par l'hydrofuge A [voir section 2.1.1.4], agent hydrofuge contenant 20 % de matière active. La procédure de trempage a été légèrement modifiée par rapport à la première phase du travail ; à ce stade, deux trempages de 10 minutes ont été effectués pour chaque granulat. Une division en part de six kilogrammes [Figure 72] a permis de limiter la quantité d'hydrofuge A nécessaire à la réalisation du trempage [Figure 73]. Un tamis de 2 mm [Figure 74] a été utilisé afin de récupérer les GR et conserver l'excédent d'hydrofuge A. Après chaque trempage, un séchage de 48h à l'air ambiant [Figure 75] a été effectué, en veillant à répartir les GR en une seule couche pour que le séchage soit uniforme.



Figure 72 - Parts de 6 kg - Fractions [2 ; 7.1] et [6.3 ; 14] mm



Figure 73 - Trempage des GR dans l'hydrofuge A



Figure 74 - Tamis de 2 mm



Figure 75 - Séchage à l'air ambiant

La réduction du coefficient d'absorption d'eau par rapport aux GR non traités est de l'ordre de 40 à 70 % [Tableau 34 et Tableau 35], selon les fractions granulométriques considérées.

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Réduction [%]
Après 1e trempage	6.53	0.13	42.82
Après 2e trempage	3.23	0.03	71.75

Tableau 34 - Influence du nombre de trempage - Fraction [2 ; 7.1] mm

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Réduction [%]
Après 1e trempage	5.58	0.24	41.57
Après 2e trempage	4.30	0.18	55.00

Tableau 35 - Influence du nombre de trempage - Fraction [6.3 ; 14] mm

La consommation en hydrofuge A a été quantifiée en pourcentage massique rapporté à la masse de l'échantillon traité [Tableau 36]. Il en résulte une consommation par trempage de l'ordre de 7 % pour la fraction [2 ; 7.1] mm et de 4 % pour la fraction [6.3 ; 14] mm. La consommation de la fraction la plus fine est légèrement supérieure à la consommation de la fraction plus grossière ; cette tendance est liée au coefficient d'absorption d'eau des GR. De plus, il existe des forces de cohésion entre les grains de granulométrie fine. Ces forces vont interagir avec le liquide et l'empêcher de s'écouler au travers du tamis.

Il est intéressant de comparer les valeurs du pourcentage de réduction du coefficient d'absorption d'eau ainsi que les valeurs de la consommation massique avec celles obtenues lors de la première phase pour les fractions [5 ; 10] et [10 ; 20] mm, où le trempage ne durait que 5 minutes.

Lors de la première phase, suite à deux trempages de 5 minutes chacun, le pourcentage de réduction du coefficient d'absorption d'eau s'élevait à 45%. Il est de 40% suite au trempage de 10 minutes, le résultat est donc sensiblement identique en fonction de la durée du trempage.

Les consommations massiques étaient respectivement de l'ordre de 3 et 2,5 %. La constatation est que la consommation massique est liée à la durée de trempage, car celle-ci double lorsque la durée de trempage est doublée.

En ce qui concerne l'influence du nombre de trempage sur cette consommation massique, il s'avère que celle-ci est inexistante, contrairement aux résultats obtenus lors de la première phase. Ceci peut s'expliquer par le fait que les masses de GR sont beaucoup plus importantes que lors des trempages de la première phase et que l'effet des forces de cohésion est donc plus important lui aussi.

Consommation massique [%]	Fraction [2 ; 7.1] mm	Fraction [6.3 ; 14] mm
Pendant 1e trempage	6.34	3.72
Pendant 2e trempage	7.15	3.64

Tableau 36 - Consommation massique en Hydrofuge A - Fractions [2 ; 7.1] et [6.3 ; 14] mm

La formulation [Tableau 38] s'obtient grâce aux propriétés moyennes des GR traités [Tableau 37]. La densité de ces GR traités est inférieure à celle des GR non traités ; cela peut s'expliquer par le fait que l'hydrofuge A, en empêchant l'eau de pénétrer la porosité ouverte des GR, empêche également l'air présent au sein du matériau de sortir. La teneur en eau est très faible vu le séchage

à l'air ambiant effectué. La *procédure de fabrication* est identique aux séries de béton précédentes.

	Masse vol. absolue [g/cm ³]	Teneur en eau [%]	Coeff. d'abs. d'eau [%]
Sable 0/2	2.65	1.47	0.70
GR 2/7.1 traités	2.38	3.23	5.42
GR 6.3/14 traités	2.36	3.09	4.30

Tableau 37 - Propriétés des GR traités et du sable naturel

Béton avec GR traités	Masse théorique [kg]	Masse corrigée [kg]	Masse d'eau [kg]
Ciment	9.6	9.6	\
Eau ajoutée	4.95	5.461	\
Sable 0/2	24	24.353	0.353
GR 2/7.1	26.4	27.252	0.852
GR 6.3/14	9.6	9.896	0.296

Tableau 38 - Formulation du béton avec GR traités corrigée

2.3.2. Détermination de l'affaissement – Norme NF EN 12350-2

Cet essai permet de déterminer la consistance du béton frais en mesurant son affaissement. Cette indication permet d'évaluer l'ouvrabilité du béton. Plus l'affaissement sera important, plus l'ouvrabilité sera élevée. L'essai se réalise à l'aide d'un moule appelé le cône d'Abrams [Figure 76³⁷] et ayant la forme d'un tronc de cône, d'une tige de piquage, d'un portique de mesure et d'un plateau de base. L'essai se base sur la Norme NF EN 12350-2.



Figure 76 - Cône d'Abrams

³⁷ Sogeo-expert. 2015. [En ligne] http://www.sogeo-expert.com/mageo_beton.php

Mode opératoire

Tout d'abord, humidifier l'intérieur du moule et le plateau de base. Fixer le moule sur ce dernier à l'aide de deux pattes de fixation. Remplir le moule de béton frais en trois couches correspondant approximativement au tiers de la hauteur du moule. Chaque couche doit être piquée 25 fois à l'aide de la tige de piquage ; le piquage doit être uniformément réparti sur la section de la couche.

Une fois la troisième couche piquée, araser le béton suivant le bord supérieur du moule à l'aide de la tige de piquage. Démouler le béton frais en soulevant délicatement et régulièrement le moule ; la durée du mouvement ne doit pas dépasser 10 secondes. Mesurer immédiatement l'affaissement en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé.

Calcul et expression du résultat

Le béton frais peut ainsi être classé en fonction de sa consistance selon l'affaissement observé [Figure 77³⁸]. Un béton sera de consistance fluide si l'affaissement est supérieur à 150 mm, plastique si l'affaissement est compris entre 100 et 150 mm, semi-plastique si l'affaissement est compris entre 50 et 95 mm et enfin de consistance terre humide si l'affaissement est compris entre 10 et 45 mm.

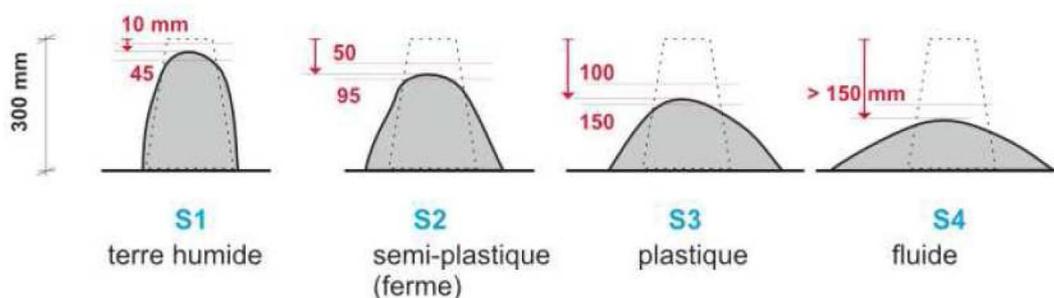


Figure 77 - Classes de consistance du béton frais

2.3.3. Détermination de la teneur en air – Norme NF EN 12350-7

Cet essai permet de déterminer la teneur en air du béton frais via la méthode du manomètre [Figure 78³⁹]. Cette méthode consiste à égaliser un volume d'air dans une enceinte hermétique (à pression connue) avec le volume d'air de la prise d'essai de béton, qui lui est à déterminer. Le cadran du manomètre est quant à lui étalonné en pourcentage d'air correspondant à la pression résultante. Cet essai se base sur la Norme NF EN 12350-7.

³⁸ COURARD, Luc. 2013-2014. *Choix et Optimisation des Matériaux de Construction*.

³⁹ Tecnotest. 2015. [En ligne] <http://www.tecnotest.it/f/it/Prods/calcestruzzo/calcestruzzo-fresco>



Figure 78 - Dispositif de mesure à manomètre

Mode opératoire

Tout d'abord, placer le béton dans le récipient en trois couches approximativement égales à l'aide d'une main écope. Serrer les couches de béton immédiatement après placement dans le récipient afin de réaliser un serrage à refus du béton. Ce serrage est effectué par vibration mécanique à l'aide d'une table vibrante [Figure 79]. La dernière couche de béton doit permettre de remplir le récipient sans avoir à retirer de matériau en excès.



Figure 79 - Table vibrante

Nettoyer les rebords du récipient et de l'ensemble du couvercle et serrer ce dernier sur le récipient en s'assurant de la bonne étanchéité entre les deux éléments. Ouvrir les deux robinets A et B et injecter de l'eau par le robinet A jusqu'à ce que l'eau sorte par le robinet B ; refermer les deux robinets. Pomper de l'air dans le sas jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre atteigne le niveau de pression initiale et se stabilise. Ouvrir la soupape principale et attendre que le manomètre se stabilise. La valeur lue sur ce dernier est égale au pourcentage apparent d'air.

2.3.4. Détermination de la masse volumique du béton frais – Norme NF EN 12350-6

Le principe de cet essai consiste à placer le béton frais dans un récipient rigide de volume connu et le peser. L'essai se base sur la Norme NF EN 12350-6.

Mode opératoire

Tout d'abord, déterminer le volume V du récipient. Peser ensuite ce récipient afin de déterminer sa masse ($m_{\text{récipient}}$). Remplir le récipient de béton frais en deux couches minimum. Serrer chaque couche de béton immédiatement après le remplissage à l'aide d'une table vibrante [Figure 79]. Une fois en place, la couche supérieure doit être minutieusement mise au niveau de la partie supérieur du récipient par arasement. L'extérieur du récipient doit être nettoyé. Enfin, peser l'ensemble constitué du récipient et de son contenu de béton frais (m_{totale}).

Calcul et expression du résultat

La masse volumique est calculée selon l'

$$\rho_{\text{béton frais}} = \frac{m_{\text{totale}} - m_{\text{récipient}}}{V} \quad \text{Équation 27}$$

2.3.5. Détermination de la résistance en compression – Norme NF EN 12390-3

Cet essai permet de déterminer la résistance en compression du béton durci. Une éprouvette cubique de 150 mm d'arête est utilisée afin d'être conforme à la Norme NF EN 12390-3.

Mode opératoire

Tout d'abord, l'éprouvette de béton doit durcir dans une chambre humide pendant 28 jours. Le 28^e jour, sortir l'éprouvette et essuyer toute humidité excessive de sa surface avant de la placer dans la machine d'essai. Veiller à ce que les plateaux de la machine qui sont en contact avec l'éprouvette soient exempts de toute impureté ou aspérité. Positionner l'éprouvette cubique au centre du plateau et de telle sorte que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.

Sélectionner une vitesse constante de chargement comprise dans l'intervalle [0.2 ; 1.0] MPa/s. Appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Noter la charge de rupture (F)

Calcul et expression du résultat

La résistance en compression s'obtient en utilisant l'Équation 28.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{MPa}^{40}] \quad \text{Équation 28}$$

où,

- f_c représente la résistance en compression du béton durci
- F représente la charge de rupture, exprimée en Newtons (N)

⁴⁰ 1 MPa = 1 N/mm²

- A_c représente l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée

2.3.6. Détermination de la résistance à la traction simple – Norme NBN B 15-211

Cet essai permet de déterminer la résistance en traction simple du béton durci. Une éprouvette cubique de 15 cm de côté est utilisée afin d'être conforme à la Norme NBN B 15-211. L'essai doit être effectué sur une machine d'essai dont l'échelle de force est choisie de telle sorte que la charge de rupture soit supérieure au 1/5 de cette échelle, permettant ainsi une erreur de mesure de l'ordre de 1%.

Mode opératoire

Le dispositif de traction est constitué, à chaque extrémité de l'éprouvette, d'une plaque en acier dur de section identique à celle de l'éprouvette et collée à cette dernière. Sur cette plaque est fixé un dispositif de rotation dont les articulations servent à minimiser les effets de flexion parasites pouvant provenir d'un mauvais centrage de l'axe de la tige, tige reliant cet ensemble à la machine.

Tout d'abord, l'éprouvette de béton doit durcir dans une chambre humide pendant 28 jours. Le 28^e jour, sortir l'éprouvette et essuyer toute humidité excessive de sa surface. Appliquer une colle (résine polyépoxyde avec durcisseur polyamine ou polyamide) en une couche très mince sur les surfaces de l'éprouvette afin de réaliser un joint entre l'éprouvette et les plaque métalliques. Le joint doit durcir pendant 24 h à une température de 20 ± 2 °C.

Placer ensuite l'éprouvette dans la machine et appliquer l'effort de traction sans chocs et d'une manière continue et uniforme. L'augmentation de contrainte par seconde doit valoir $[0.1 \pm 0.05]$ N/mm² à tout instant. Atteindre la charge de rupture (P) et la noter.

Calcul et expression du résultat

La résistance en traction simple s'obtient en utilisant l'Équation 29.

$$f_t = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad \text{Équation 29}$$

où,

- f_t représente la résistance en traction simple du béton durci
- F représente la charge de rupture, exprimée en Newtons (N)
- S [mm²] représente l'aire de la section de rupture de l'éprouvette

2.4. Résultats de la deuxième phase

Les résultats présentés dans cette section permettent de comparer les propriétés des trois séries de béton et ainsi pouvoir appréhender au mieux l'incidence qu'a le traitement des GR sur le béton.

2.4.1. Affaissement

L'affaissement observé est nul pour les trois séries de béton [Figure 80] et ce, quel que soit le temps écoulé après le mélange. Ces résultats sont dus à la formulation utilisée, qui provient de la société PREFER, servant à la fabrication de hourdis prêt à l'emploi. L'ouvrabilité du béton peut être faible étant donné que la mise en moule se réalise en atelier avec vibration mécanique à l'appui. Bien que la quantification de la différence relative à la consistance des trois séries de béton ne peut être précisément étudiée, il est tout de même remarquable que les trois séries de béton présentent un affaissement nul. L'utilisation de GR traités n'implique donc pas d'influence significative quant à la consistance, du moins selon l'essai effectué.



Figure 80 – Affaissements après 0 minutes du béton de GN, du béton de GR non traités et du béton de GR traités

2.4.2. Teneur en air et masse volumique du béton frais

La teneur en air et la masse volumique sont deux propriétés liées. Les résultats le prouvent [Tableau 39] ; en effet, plus la teneur en air du béton est élevée et plus la masse volumique du béton est faible. La teneur en air est bien entendu plus élevée lorsque le béton contient des GR mais ne semble pas affectée par le traitement de surface de ceux-ci. La masse volumique moyenne du béton est fortement corrélée à la masse volumique des granulats [Tableau 40]. Bien que l'essai d'affaissement ait fourni des résultats identiques pour les trois séries de béton, la mesure de la teneur en air démontre que les bétons à base de GR contiennent plus d'air, ce qui implique une diminution de l'ouvrabilité [Section 1.4.1.2].

	Teneur en air [%]	Masse vol. moyenne [g/cm ³]
Béton de GN	2.70	2.40
Béton de GR non traités	3.80	2.19
Béton de GR traités	3.80	2.16

Tableau 39 - Teneur en air et masse volumique moyenne des trois types de béton

	Masse vol. absolue [g/cm ³]
GN 2/8	2.76
GN 6/14	2.76
GR 2/7.1	2.63
GR 6.3/14	2.56
GR 2/7.1 traités	2.38
GR 6.3/14 traités	2.36

Tableau 40 - Masse volumique absolue des différents types de granulat

2.4.3. Résistance à la compression et à la traction simple

Trois éprouvettes cubiques de 150 mm d'arête ont été préparées pour chaque série de béton et pour chaque essai à effectuer [Figure 81]. Le but étant de pouvoir déterminer les valeurs moyennes ainsi que les écart-types associés.

Les moules utilisés ont été préalablement huilés afin que le béton n'adhère pas à leurs parois internes [Figure 82]. Les éprouvettes sont restées 24 h dans les moules avant d'être placées pendant 27 jours dans une chambre humide [Figure 83].



Figure 81 - 18 éprouvettes préparées



Figure 82 - Huilage des moules



Figure 83 - Epreuves dans la chambre humide

Les éprouvettes relatives à l'essai de traction simple ont été préparées et carottées 27 jour après la fabrication; des cylindres de 80 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur sont placés et maintenus entre deux pastilles métalliques à l'aide de résine polyépoxyde [Figure 84].



Figure 84 - Epreuves cylindriques

Le jour suivant cette préparation, c'est à dire 28 jours après la fabrication des bétons, ces éprouvettes sont placées dans la machine de traction [Figure 85] de marque INSTRON (modèle 5585) et subissent une contrainte de traction croissante, à raison de 0,05 MPa/s, jusqu'à atteindre la rupture.



Figure 85 - Machine de traction

Les résultats [Tableau 41] [Figure 86] (détails du rapport disponibles à l'annexe A.5) montrent que les bétons réalisés à base de GR sont environ 25% moins résistants en traction que les bétons à base de GN. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que la zone de rupture est différente selon la composition du béton. En effet, dans le cas des bétons contenant des GR, la rupture semble s'être produite au niveau des GR et non au niveau de l'interface entre les GR et la pâte de ciment, autrement dit l'ITZ (Interfacial Transition Zone) [Figure 87]. Selon la littérature [1.4.1.3], la zone de faiblesse des bétons est la zone la plus poreuse, qui est logiquement l'ITZ. Les GR semblent donc être plus poreux que l'ITZ ; leur cohésion est donc plus faible que la cohérence du béton.

De plus, les résultats montrent que le traitement des GR à l'hydrofuge A n'a aucune influence sur la résistance à la traction du béton. Les résistances moyennes à la traction des bétons de GR non traités et traités sont pour ainsi dire identiques.

Résistance en traction simple [Mpa]	Moyenne	Ecart-type
Béton de GN	2.83	0.06
Béton de GR non traités	2.07	0.14
Béton de GR traités	2.10	0.23

Tableau 41 - Résistances à la traction

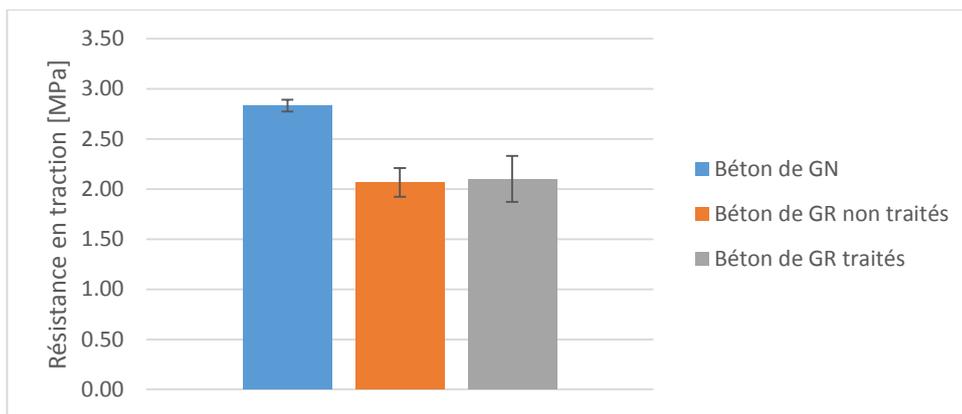


Figure 86 - Résistances à la traction



Figure 87 - Surfaces de rupture à la traction du béton de GR traités, du béton de GR non traités et du béton de GN

Les éprouvettes cubiques relatives à l'essai de compression, quant à elles, sont pesées 28 jours après la fabrication des bétons. Les masses volumiques des bétons durcis ainsi obtenues [Tableau 42] suivent la même tendance que les masses volumiques des bétons frais [section 2.4.2].

	Masse vol. moyenne [g/cm ³]
Béton de GN	2.41
Béton de GR non traités	2.20
Béton de GR traités	2.16

Tableau 42 - Masses volumiques des bétons durcis

Ces éprouvettes sont ensuite placées dans la machine de compression [Figure 88] et subissent une contrainte de chargement croissante respectant les valeurs préconisées par la norme Norme NF EN 12390-3.



Figure 88 - Machine de compression

Les résultats [Tableau 43] [Figure 89] montrent que les bétons de GR non traités sont 45% moins résistants en compression que les bétons de GN, ce qui est en accord avec la littérature [section 1.4.1.3]. Les bétons de GR traités sont également moins résistants en compression que les bétons de GN mais aussi moins résistants que les bétons de GR non traités ; le béton de GR traités présente une résistance inférieure de 20% au béton de GR non traités et inférieure de 56% au béton de GN. Cette tendance observée indique que le traitement des GR à l'hydrofuge A a bel et bien une influence sur les propriétés du béton durci.

Au vu des ruptures [Figure 90] observées, il semble que la zone de faiblesse soit l'ITZ et ce, pour les trois séries de béton considérées. Les résultats montrent que l'ITZ semble avoir été affectée par la présence de l'hydrofuge ; en effet, cette dernière est plus faible (et certainement plus poreuse) que l'ITZ formée à la périphérie des GR non traités. Cette hypothèse pourrait être confirmée par vue au microscope électronique des ITZ. L'agent hydrofuge A a donc diminué la cohérence du béton et a un impact négatif sur celui-ci.

Il est à noter que les rapports E/C sont théoriquement identiques pour tout béton réalisé, étant donné que les formulations ont été corrigées [section 2.3.1.]. Des tests d'absorption d'eau des bétons pourraient confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Résistance en compression [Mpa]	Moyenne	Ecart-type
Béton de GN	65.11	0.79
Béton de GR non traités	35.70	0.76
Béton de GR traités	28.15	0.21

Tableau 43 - Résistances en compression

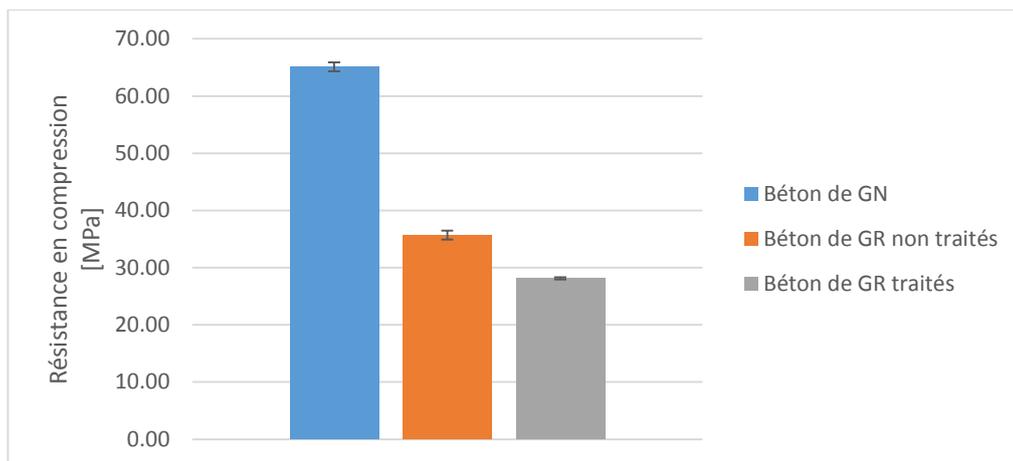


Figure 89 - Résistances en compression



Figure 90 - Rupture à la compression du béton de GN, du béton de GR non traités et du béton de GR traités

2.4.4. Conclusion

Au terme de cette deuxième phase, il est possible de répondre à la question : *Quelle est l'influence de ce traitement sur les propriétés du béton, aussi bien frais que durci ?*

En effet, il en ressort que pour un rapport E/C constant, l'influence du traitement des GR sur les propriétés du béton frais est négligeable, tant au niveau de l'affaissement que de la teneur en air ou encore de la masse volumique. Les résultats observés montrent que les bétons de GR traités et non traités sont plus légers que le béton de GN, mais ne présente aucune différence significative entre eux. En ce qui concerne les propriétés du béton durci, il s'avère que seule la résistance en compression est influencée par ce traitement ; le béton de GR traités présente une résistance inférieure de 20% au béton de GR non traités et inférieure de 56% au béton de GN. L'hypothèse la plus vraisemblable est que l'ITZ est affaiblie (donc rendue plus poreuse) par la présence de l'hydrofuge A, mais cette hypothèse doit être vérifiée. La résistance à la traction est quant à elle inchangée, car la rupture se déroule au sein même des GR et non à l'ITZ.

Chapitre 3 – Analyse économique

Une analyse économique, visant à quantifier l'impact économique qu'aurait l'usage du traitement de surface des GR à l'hydrofuge A à l'échelle industrielle, permet d'aborder la problématique sous un nouvel angle. En effet, même si l'hydrofuge A fournit des résultats probants au niveau des propriétés d'absorption d'eau des GR, il faut qu'il soit économiquement accessible afin de pouvoir l'incorporer aux processus de recyclage des GR à grande échelle et ainsi proposer un tarif décent. Au vu des résultats relatifs aux propriétés des bétons durcis, il s'avère qu'une comparaison économique des coûts de production de bétons aux propriétés identiques mais de compositions différentes (GN ou GR traités) ne peut être menée. Toutefois, une comparaison des coûts de production des bétons fabriqués lors de ce travail peut être utile afin de mettre en évidence les avantages ou les inconvénients liés à l'utilisation de l'hydrofuge A et ainsi savoir s'il est intéressant d'approfondir le travail effectué ou non.

Les prix à la tonne⁴¹ des matières premières et de l'hydrofuge A [Tableau 44] permettent d'estimer le prix à la tonne des GR traités à l'hydrofuge A [Tableau 45], en se référant au pourcentage de consommation massique en hydrofuge A par trempage de 10 minutes [Équation 30]. Ce pourcentage est respectivement de l'ordre de 7% et 4% pour les fractions [2 ; 7.1] mm et [6.3 ; 14] mm [section 2.3.1.3].

Ainsi, si les enrobages d'hydrofuge A effectués lors de cette étude devaient être transposés à l'échelle industrielle, les prix en résultant seraient excessivement élevés, atteignant presque 800€/t pour les GR traités de fraction [2 ; 7.1] mm et 500€/t pour ceux de fraction [6.3 ; 14] mm.

Matières premières ⁴²	Prix [€/t]
Ciment	90
Eau ajoutée	2.5
Sable 0/2	13
GN CC 2/8	11
GN CC 6/14	13
GR 2/7.1	8.15
GR 6.3/14	8.15
Hydrofuge A	7227.72 ⁴³

Tableau 44 - Prix à la tonne des matières premières

⁴¹ 1 tonne = 1000 kg

⁴² La source des prix du ciment, du sable et des granulats naturels de calcaire concassé a souhaité rester anonyme par soucis de confidentialité. Les prix des granulats recyclés de béton proviennent de la société RECYTOUR, centre de tri et de concassage de déchets inertes de construction et démolition. Le prix de l'hydrofuge A est quant à lui disponible chez n'importe quel marchand de produits chimiques.

⁴³ 7,30 €/l = 7,23 €/kg car $\rho_{\text{Hydrofuge A}} = 1.01 \text{ kg/l}$

$$Prix_{GR\ traités} = Prix_{GR} + Pourcentage_{conso.} * Prix_{Hydrofuge\ A} \left[\frac{€}{t} \right] \quad \text{Équation 30}$$

	Prix [€/t]
GR 2/7.1 traités	514.09
GR 6.3/14 traités	297.26

Tableau 45 - Prix des GR traités à l'hydrofuge A

En connaissant les prix à la tonne des matières premières, de l'hydrofuge A et des GR traités, il est dès lors possible de déterminer les coûts bruts (ne prenant pas en compte les coûts liés à la main d'œuvre et à l'amortissement des machines) de production d'une tonne de ces bétons [Tableau 46], sur base de l'Équation 31. La formulation des bétons est bien identique à celle utilisée lors de la deuxième phase de ce travail [Tableau 47]. Pour rappel, cette formulation de béton permet la fabrication de hourdis préfabriqués en atelier.

$$Coût_{béton} = \sum_i \frac{pourcentage_i^{composant}}{100} * Prix_i^{composant} \left[\frac{€}{t} \right] \quad \text{Équation 31}$$

	Prix [€/t]
Béton avec GN	21.51
Béton avec GR traités	236.27

Tableau 46 - Coûts de production des bétons

Béton	Masse théorique [kg]	Pourcentage en masse [%]
Ciment	9.6	12.88
Eau ajoutée	4.95	6.64
Sable 0/2	24	32.19
GN 2/8 ou GR traités 2/7.1	26.4	35.41
GN 6/14 ou GR traités 6.3/14	9.6	12.88

Tableau 47 - Formulation béton

Le coût de production du béton fabriqué à base de GR traités serait trop élevé et vaudrait plus de 10 fois le coût du béton contenant les GN, ce qui n'est économiquement pas viable. Deux paramètres peuvent influencer ce coût :

- Le prix de l'hydrofuge A
- La consommation en hydrofuge A

Le prix de l'hydrofuge devrait pouvoir être revu à la baisse en cas de commande importante. La consommation en hydrofuge doit quant à elle être réduite au moyen d'un système optimisé permettant la récupération du produit subsistant entre les granulats à cause des forces de cohésion inter granulaires (relatives aux fractions fines) et des tensions superficielles.

Chapitre 4 – Impact environnemental

Le traitement des GR à l'hydrofuge A effectué lors de cette étude a permis de diminuer leur coefficient d'absorption d'eau mais n'a malheureusement pas permis d'influencer positivement les propriétés du béton durci les contenant. Un approfondissement de l'étude mérite toutefois d'être effectué afin de rechercher un moyen d'améliorer les propriétés des bétons durcis. Evidemment, une série d'informations est encore à déterminer afin de couvrir l'ensemble du cycle de vie de ce type de béton. Une question fondamentale à se poser est de savoir quelle incidence aurait le traitement de surface à l'hydrofuge A des GR sur les futurs déchets de béton les contenant.

Afin de répondre à cette question, il semble tout d'abord opportun de se référer à la fiche des données de sécurité de l'hydrofuge A [Annexe A.5]. Selon cette fiche, l'hydrofuge A est conforme au marquage CE et est donc approuvé par la Commission Européenne. Le marquage CE indique qu'un produit est conforme à la législation de l'UE et permet ainsi la libre circulation des produits sur le marché européen⁴⁴. De plus, cet hydrofuge n'est pas considéré comme un danger sanitaire ou environnemental en vertu de la législation actuelle.

Le stockage des GR, résultant du premier concassage, permet de réaliser une étape tampon entre le concassage et la première inspection. Ce stockage est souvent réalisé à l'air libre et est donc soumis aux conditions climatiques. Ainsi, il existe un risque de lixiviation involontaire suite à une pluie s'abattant sur les GR. Le phénomène de lixiviation consiste en une percolation lente de l'eau à travers un ensemble de grains (sols ou granulats) permettant la dissolution des matières solides qui y sont contenues. Le liquide résultant est alors appelé lixiviat [COURARD L. ; 2011-2012]. Ce phénomène est souvent rencontré dans les centres d'enfouissement techniques (CET), où l'eau peut se charger en substances toxiques lors de la traversée des sols ayant servi de décharges.

Ainsi, un risque de lixiviation involontaire existe et pourrait entraîner la dispersion de l'hydrofuge A. Des essais de lixiviation (selon la Norme NF EN 12457) doivent donc être menés afin de vérifier la conformité de ces GR traités.

⁴⁴ http://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking/index_en.htm

Conclusion

Ce travail de fin d'études s'est focalisé sur l'étude des possibilités d'amélioration des procédés actuels de recyclage des déchets de construction et de démolition (C&D), et, plus particulièrement, des déchets de béton. Tout d'abord, une étude approfondie de l'état actuel des connaissances sur ce sujet a été menée.

Les informations relatives à la gestion des ressources montrent que, pour s'inscrire dans une politique de développement durable, l'homme doit apprendre à gérer ses déchets. Les quantités de déchets de C&D générées à travers le monde nécessitent un traitement approprié. Au vu de la répartition des matériaux au sein de ces déchets, le béton s'avère être un élément fondamental. Le recyclage est prometteur mais nécessite des améliorations.

Les procédés de recyclage sont intimement liés à la qualité et à la composition des granulats recyclés (GR). Les GR ne sont pas vraiment valorisés. De plus, en Europe, leur quantité de production est presque négligeable par rapport à la quantité de production des granulats naturels (GN). Cela est dû au fait qu'il existe plusieurs problématiques qui s'opposent à l'utilisation de GR dans les bétons structurels. Ces problématiques sont non seulement dues aux propriétés intrinsèques du matériau, mais elles sont également normatives, sociales, gouvernementales et économiques. La source du problème provient de la présence d'impuretés et, plus particulièrement, de mortier attaché qui augmente fortement le coefficient d'absorption d'eau des granulats par rapport aux GN.

Des techniques variées ont déjà été mises en place afin de parer aux problèmes que présentent ces GR. Ces techniques peuvent être réparties en trois groupements distincts : les techniques de modification de la surface des GR, les techniques d'amélioration du mode de production des GR et enfin, les techniques permettant d'adapter les procédures de mélange lors de la fabrication de béton. Seul le premier groupement semble prometteur. En effet, l'amélioration du mode de production sous-entend la génération d'énormes quantités de granulats fins non valorisables. De plus, les techniques d'adaptation lors du mélange sont performantes pour les bétons frais mais réduisent les propriétés des bétons durs.

Ensuite, une étude expérimentale a permis de répondre aux questions suivantes :

Quel traitement permet de réduire la cinétique d'absorption d'eau des GR?

Seuls les agents hydrofuges (à base aqueuse) composés de matières actives à concurrence de 20 % (Hydrofuge A) et de 40 % (Hydrofuge B) permettent de réduire significativement le coefficient d'absorption d'eau ainsi que la cinétique d'absorption d'eau des GR appartenant aux fractions de granulométrie [5 ; 10] mm et [10 ; 20] mm. La réduction, après deux trempages de 5 minutes, est respectivement de l'ordre de 40% à 50% pour les hydrofuges A et de 30% pour les hydrofuges B. La consommation massique par trempage de 5 minutes oscille, quant à elle, entre 1% et 4% selon la fraction considérée.

L'hydrofuge A, contenant seulement 20 % de matières actives, est meilleur marché que l'hydrofuge B qui lui en contient 40 %⁴⁵. De plus, il a un rendement supérieur en termes de réduction du coefficient d'absorption d'eau. C'est principalement pour ces raisons que ce produit a été retenu pour la deuxième phase du travail, phase permettant d'étudier l'influence du traitement de surface des GR sur certaines propriétés du béton les contenant.

Quelle est l'influence de ce traitement sur les propriétés du béton, aussi bien frais que durci ?

Pour un rapport Eau/Ciment (E/C) constant, l'influence du traitement des GR sur les propriétés du béton frais est négligeable, tant au niveau de l'affaissement qu'à celui de la teneur en air et de la masse volumique. Les résultats observés montrent que les bétons de GR traités et non traités sont plus légers que le béton de GN mais ne présentent aucune différence significative entre eux. En ce qui concerne les propriétés du béton durci, il s'avère que seule la résistance en compression est influencée par ce traitement ; le béton de GR traités présente une résistance inférieure de 20% au béton de GR non traités et inférieure de 56% au béton de GN. L'hypothèse la plus vraisemblable est que l'Interfacial Transition Zone (ITZ) est affaiblie - donc rendue plus poreuse - par la présence de l'hydrofuge A, mais cette hypothèse doit encore être vérifiée. La résistance à la traction est, quant à elle, inchangée car la rupture se déroule au sein même des GR et non à l'ITZ.

Quelle serait l'influence économique de ce traitement à l'échelle industrielle ?

Si l'enrobage des GR à l'hydrofuge A, effectué lors de cette étude, devait être transposé à l'échelle industrielle, il en résulterait des prix à la tonne excessivement élevés, atteignant presque 800€/t pour les GR traités de fraction [2 ; 7.1] mm et 500€/t pour ceux de fraction [6.3 ; 14] mm. Cela n'est économiquement pas viable en l'état actuel. La consommation des GR en hydrofuge A doit être revue à la baisse ; il serait utile de développer une technique permettant de récupérer l'hydrofuge A après le trempage des GR afin de pouvoir le réutiliser.

Quel serait l'impact environnemental de ce traitement sur les futurs déchets de béton ?

Les futurs déchets de béton présentent un risque de lixiviation [chapitre 4] involontaire qui pourrait entraîner la dispersion de l'hydrofuge A lors du stockage en station de recyclage. Des essais de lixiviation doivent donc être menés afin de vérifier la conformité de ces GR traités.

Finalement, le constat est que le traitement de surface des GR à l'hydrofuge A présente certains atouts mais qu'un approfondissement de l'étude est nécessaire, tant au niveau de son impact sur les propriétés du béton durci qu'au niveau de son influence économique à l'échelle industrielle ou encore au niveau de son impact sur les futurs déchets de béton. Cet approfondissement devrait comprendre, entre autres, une étude des causes de l'affaiblissement de la résistance en compression du béton avec recherche axée sur l'amélioration de cette résistance, une étude de l'influence du traitement de surface des GR sur la durabilité du béton, une étude permettant de réduire la consommation des GR en hydrofuge A et enfin une étude de lixiviation des déchets contenant des GR traités.

⁴⁵ Les prix hors TVA des hydrofuges A et B sont respectivement de 7,30€/l et de 8,20€/l.

Bibliographie

- AFNOR.** 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. NF EN 1097-6. Paris: AFNOR, 2001, 30.
- AFNOR.** Essais pour béton frais. Partie 2 : Essai d'affaissement. NF EN 12350-2. Paris : AFNOR, 1999, 7.
- AFNOR.** Essais pour béton frais. Partie 7 : Teneur en air – Méthode de la compressibilité. NF EN 12350-7. Paris: AFNOR, 2001, 19.
- AFNOR.** Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique. NF EN 12350-6. Paris : AFNOR, 1999, 8.
- AFNOR.** Essais pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes. NF EN 12390-3. Paris: AFNOR, 2003, 15.
- AFNOR.** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 11 : Essai de classification des constituants de gravillons recyclés. Paris : AFNOR, 2009, 11.
- BRAND, ROESLER, SALAS,** «Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete », in *Construction and buildings materials*, 83-89, 79, 2015.
- BUREAU DE NORMALISATION.** Essais des bétons. Traction directe. NBN B 15-211.Bruxelles, 1974, 4.
- CHOI, KITAGAKI, NOGUCHI,** «Effective recycling of surface modification aggregate using microwave heating », in *Journal of advanced concrete technology*, 34-45, 12, 2014.
- COURARD, Luc.** *Maintenance, restauration et protection des constructions*, 2014-2015.
- COURARD, Luc.** *Choix et Optimisation des Matériaux de Construction*, 2013-2014.
- COURARD, Luc.** *Matériaux de construction*, 2011-2012.
- COURARD & al.,** Guide pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie, 2015.
- DE BRITO, SAIKIA,** *Recycled aggregate in concrete, Use of industrial, construction and demolition waste*, Springer, Londres, 2013.
- GHEYSENS, VANDEWALLE & al.,** *Technologie du béton, Groupement belge du béton*, Bruxelles, 2006.
- HANSEN,** *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985*, Bordas-Gauthier-Villars, Danemark, 1985.
- XIAO, LI, SUN, LANGE, SHAH,** «Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation », in *Cement & concrete composites*, 276–292, 37, 2013.
- KATZ,** « Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate », in *Journal of materials in civil engineering*, 597-603, 16, 2004.

KHAZMA, GOULLIEUX, DHEILLY, LAIDOUDI, QUENEUEDEC, «Impact of aggregate coating with a PEC elastomer on properties of lightweight flax shive concrete », in *Industrial crops and products*, 49-56, 33, 2011.

KOU, POON, «Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete », in *Construction and building materials*, 501-508, 77, 2015.

LEE, DU, SHEN, « Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt », in *Construction and building materials*, 66-71, 28, 2012.

LI, XIAO, ZHOU, « Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete », in *Construction and building materials*, 1287-1291, 23, 2009.

MANZI, MAZZOTTI, BIGNOZZI, « Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate », in *Cement & concrete composites*, 312-318, 37, 2013.

MCNEIL, KANG, « Recycled Concrete Aggregates: A Review », in *International journal of concrete structures and materials*, 61-69, 7, 2013.

MEDINA, ZHU, HOWIND, FRIAS, SANCHEZ DE ROJAS, « Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes », in *Construction and building materials*, 22-33, 79, 2015.

OIKONOMOU, « Recycled concrete aggregates », in *Cement & concrete composites*, 315-318, 27, 2005.

RAO, JHA, MISRA, « Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete », in *Resources, conservation and recycling*, 71-81, 50, 2007.

RYOU, LEE, « Characterization of Recycled Coarse Aggregate (RCA) via a Surface Coating Method », in *International journal of concrete structures and materials*, 165-172, 8, 2014.

SHEEN, WANG, JUANG, LE, « Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates », in *Construction and building materials*, 298-305, 45, 2013.

TAM, « Economic comparison of concrete recycling: A case study approach », in *Resources, conservation and recycling*, 821-828, 52, 2008.

TAM, « Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis », in *Journal of hazardous materials*, 703-714, 152, 2008.

TAM, GAO, TAM, « Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach », in *Cement and concrete research*, 1195-1203, 35, 2005.

TAM, GAO, TAM, CHAN, « New approach in measuring water absorption of recycled aggregates », in *Construction and building materials*, 364-369, 22, 2008.

TEGGER, « Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach », in *Construction and building materials*, 112-116, 27, 2012.

THOMAS, SETIEN, POLANCO, ALAEJOS, SANCHEZ DE JUAN, «Durability of recycled aggregate concrete », in *Construction and building materials*, 1054-1065, 40, 2013.

ZHAO, REMOND, DAMIDOT, XU, «Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates », in *Journal of sustainable cement-based materials*, 37-41, 2013.

ZHAO, REMOND, DAMIDOT, XU, « Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars », in *Construction and building materials*, 179-186, 81, 2015.

ZHIHUI, SHOUBE, LINGCHAO, CHENCHEN, « Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar », in *Construction and building materials*, 191-196, 43, 2013.

ZHU, KOU, POON, DAI, LI, «Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete », in *Cement & concrete composites*, 32-38, 35, 2013.

Annexes

Ces annexes présentent, à titre d'exemples, certains détails relatifs aux mesures effectuées durant la partie expérimentale. Les dates des essais ainsi que les références des normes utilisées sont données pour chaque manipulation effectuée. Le traitement supplémentaire des GR ainsi que la fiche des données de sécurité de l'hydrofuge A sont également disponibles.

A.1. Résultats fraction granulométrique [5 ; 10] mm

Données pour la détermination de l'épaisseur du coating		
Rayon moyen des GR [mm]	3.75	Hypothèse sphère
Surface moyenne des GR [mm ²]	176.71	
Volume moyen des GR [mm ³]	220.89	
Masse volumique GR [g/cm ³]	2.61	
Masse d'un GR [g]	0.58	
Masse volumique ciment [g/cm ³]	2.99	
Masse volumique de l'eau [g/cm ³]	1	

CEM I 52.5 E/C = 0.8		
09.03.15	Détermination de l'épaisseur du coating	
	Coating séché pendant + de 24h à l'air du labo	
	Masse ciment [g]	100
	Masse d'eau [g]	80
	Masse volumique coating [g/cm ³]	1.59
	Masse avant coating [g]	49.91
	Nombre de GR	86
	Masse après coating [g]	53.46
	Masse coating [g]	3.55
	Epaisseur coating [mm]	0.15
	Augmentation de la taille des GR [%]	3.93
	19.03.15	Détermination de l'absorption d'eau par la norme NF EN 1097-6
Masse plateau [g]		120.19
Masse plateau + GR SSD [g]		176.94
GR SSD [g]		56.75
Masse plateau + GR 105°C [g]		172.63
GR 105°C [g]		52.44
Coeff. d'absorption d'eau [%]		8.22

GR [5;10] traités CEM I 52.5 E/C = 0.8			
11.03.15	Détermination de l'épaisseur du coating		
	Coating séché pendant 180 min (3h) à l'air du labo		
	Rayon moyen des GR [mm]	3.75	Hypothèse sphère
	Surface moyenne des GR [mm ²]	176.71	
	Volume moyen des GR [mm ³]	220.89	
	Masse volumique GR [g/cm ³]	2.61	
	Masse d'un GR [g]	0.58	
	Masse ciment [g]	700	
	Masse volumique ciment [g/cm ³]	2.99	
	Masse d'eau [g]	560	

Annexes - A.1. Résultats fraction granulométrique [5 ; 10] mm

Masse volumique de l'eau [g/cm ³]	1	
Masse volumique coating [g/cm ³]	1.59	NB : 1kg/l = 1g/cm ³
Echantillon 4		
Masse avant coating [g]	50.09	
Nombre de GR	87	
Masse après coating [g]	56.25	
Masse coating [g]	6.16	
Epaisseur coating [mm]	0.25	
Echantillon 5		
Masse avant coating [g]	50.1	
Nombre de GR	87	
Masse après coating [g]	53.85	
Masse coating [g]	3.75	
Epaisseur coating [mm]	0.15	
Echantillon 6		
Masse avant coating [g]	50.04	
Nombre de GR	87	
Masse après coating [g]	56.3	
Masse coating [g]	6.26	
Epaisseur coating [mm]	0.26	
Moyenne de l'ép. du coating [mm]	0.22	
Ecart-type de l'ép. du coating [mm]	0.05	
Augmentation de la taille des GR [%]	5.89	
Détermination de l'absorption d'eau par la norme NF EN 1097-6		
Echantillons immergés pendant 24 h		
Echantillon 4		
Masse plateau [g]	120.17	
Masse plateau + GR SSD [g]	179.14	
GR SSD [g]	58.97	
Masse plateau + GR 105°C [g]	173.22	Après 24 h
GR 105°C [g]	53.05	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	11.16	
Echantillon 5		
Masse plateau [g]	120.33	
Masse plateau + GR SSD [g]	176.82	
GR SSD [g]	56.49	
Masse plateau + GR 105°C [g]	171.99	Après 24 h
GR 105°C [g]	51.66	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	9.35	
Echantillon 6		
Masse plateau [g]	120.02	
Masse plateau + GR SSD [g]	179.13	
GR SSD [g]	59.11	
Masse plateau + GR 105°C [g]	173.31	Après 24 h
GR 105°C [g]	53.29	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	10.92	
Moyenne de l'abs. d'eau [%]	10.48	
Ecart-type de l'abs. d'eau [%]	0.80	
Sécher pendant + de 24h n'influence pas significativement l'abs. d'eau		
Echantillon 1		
Masse plateau + GR 105°C [g]	173.2	Après 120 h

Annexes - A.1. Résultats fraction granulométrique [5 ; 10] mm

GR 105°C [g]	53.03	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	11.20	
Augmentation en [%]	0.38	
Echantillon 2		
Masse plateau + GR 105°C [g]	171.98	Après 120 h
GR 105°C [g]	51.65	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	9.37	
Augmentation en [%]	0.23	
Echantillon 3		
Masse plateau + GR 105°C [g]	173.3	Après 120 h
GR 105°C [g]	53.28	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	10.94	
Augmentation en [%]	0.19	

GR [5;10] traités Hydrofuge A		
24.03.15	Détermination de l'épaisseur du coating	
Coating séché pendant 2880 min (48h) à l'air du labo		
Echantillon 1		
Masse avant coating [g]	50.08	
Masse après coating [g]	51.49	
Masse coating [g]	1.41	
Consommation en Hydrofuge A [%]	2.82	
Echantillon 2		
Masse avant coating [g]	50.11	
Masse après coating [g]	51.55	
Masse coating [g]	1.44	
Consommation en Hydrofuge A [%]	2.87	
Echantillon 3		
Masse avant coating [g]	49.84	
Masse après coating [g]	51.47	
Masse coating [g]	1.63	
Consommation en Hydrofuge A [%]	3.27	
Moyenne de la consommation [%]	2.99	
Ecart-type de la consommation [%]	0.20	
NB : trempage pdt 5 à 6 min		
Détermination de l'absorption d'eau par la norme NF EN 1097-6		
Echantillons immergés pendant 24 h		
Echantillon 1		
Masse plateau [g]	121.7	Après 24 h
Masse plateau + GR SSD [g]	174.56	
GR SSD [g]	52.86	
Masse plateau + GR 105°C [g]	171.8	
GR 105°C [g]	50.1	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	5.51	
Echantillon 2		
Masse plateau [g]	119.28	
Masse plateau + GR SSD [g]	172.18	
GR SSD [g]	52.9	

Annexes - A.1. Résultats fraction granulométrique [5 ; 10] mm

Masse plateau + GR 105°C [g]	169.41	Après 24 h
GR 105°C [g]	50.13	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	5.53	
Echantillon 3		
Masse plateau [g]	120.01	Après 24 h
Masse plateau + GR SSD [g]	173.11	
GR SSD [g]	53.1	
Masse plateau + GR 105°C [g]	169.88	
GR 105°C [g]	49.87	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	6.48	
Moyenne de l'abs. d'eau [%]	5.84	
Ecart-type de l'abs. d'eau [%]	0.45	

GR [5;10] traités Hydrofuge A (2e trempage)		
31.03.15	Détermination de l'épaisseur du coating	
Coating séché pendant 2880 min (48h) à l'air du labo		
Echantillon 1		
Masse avant coating [g]	50.1	
Masse après coating [g]	50.97	
Masse coating [g]	0.87	
Consommation en Hydrofuge A [%]	1.74	
Echantillon 2		
Masse avant coating [g]	50.13	
Masse après coating [g]	51.11	
Masse coating [g]	0.98	
Consommation en Hydrofuge A [%]	1.95	
Echantillon 3		
Masse avant coating [g]	49.85	
Masse après coating [g]	50.5	
Masse coating [g]	0.65	
Consommation en Hydrofuge A [%]	1.30	
Moyenne de la consommation [%]	1.67	
Ecart-type de la consommation [%]	0.27	
NB : trempage pdt 5 à 6 min		
Détermination de l'absorption d'eau par la norme NF EN 1097-6		
Echantillons immergés pendant 24 h		
Echantillon 1		
Masse plateau [g]	121.67	Après 24 h
Masse plateau + GR SSD [g]	174.1	
GR SSD [g]	52.43	
Masse plateau + GR 105°C [g]	171.78	
GR 105°C [g]	50.11	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	4.63	
Echantillon 2		
Masse plateau [g]	119.3	
Masse plateau + GR SSD [g]	171.81	
GR SSD [g]	52.51	

Annexes - A.1. Résultats fraction granulométrique [5 ; 10] mm

Masse plateau + GR 105°C [g]	169.43	Après 24 h
GR 105°C [g]	50.13	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	4.75	
Echantillon 3		
Masse plateau [g]	72.7	Après 24 h
Masse plateau + GR SSD [g]	124.64	
GR SSD [g]	51.94	
Masse plateau + GR 105°C [g]	122.2	
GR 105°C [g]	49.5	
Coeff. d'absorption d'eau [%]	4.93	
Moyenne de l'abs. d'eau [%]	4.77	
Ecart-type de l'abs. d'eau [%]	0.12	

A.2. Traitement des GR supplémentaire : la carbonatation

Le gaz carbonique (CO_2) est présent dans l'air ambiant. Celui-ci, en passant à travers les pores du béton, va réagir avec la chaux résultant de l'hydratation du ciment [Équation 32].

La chaux va donc se carbonater à nouveau et former du calcaire, calcaire qui est plus résistant et plus volumineux que la chaux (11% plus volumineux). Ainsi, suite à l'augmentation de volume du calcaire au sein du béton, il va y avoir un comblement des pores capillaires. Les pores capillaires sont donc moins ouverts à l'extérieur, ce qui implique une fermeture de la porosité de surface.



Équation 32

Il y a des conditions qui vont favoriser le mécanisme de diffusion de gaz carbonique. Par exemple, il ne faut pas que les pores du béton soient gorgés d'eau et il ne faut pas non plus que l'air ambiant soit complètement sec. Il faut en réalité que l'humidité relative soit d'environ 60% [Figure 91⁴⁶] car en réalité lors de la réaction, le gaz carbonique se dissout dans l'humidité en ions carbonates (CO_3^{2-}) qui réagissent avec l'ion calcium (Ca^{2+}) de la chaux pour former le calcaire.

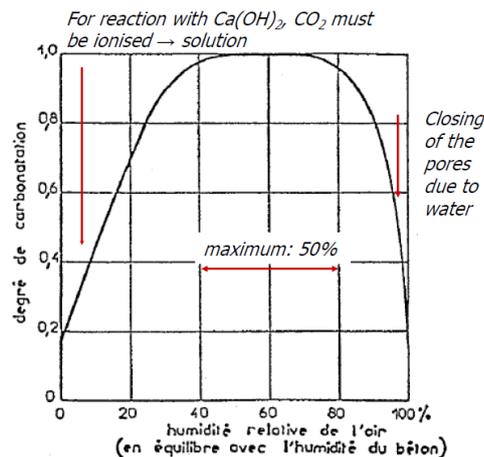


Figure 91 - Degré de carbonatation en fonction de l'humidité relative

Une conséquence relative à la carbonatation est que le pH du béton diminue et passe d'environ 13 à un pH d'environ 8. Cela peut poser problème dans le cas de bétons armés [Courard L., 2014-2015].

Les GR de fraction [5 ; 10] mm et [10 ; 20] mm sont donc placés dans une cellule de carbonatation de concentration égale à 3% pendant 2 semaines afin de fermer leur porosité de surface et tenter de réduire leur coefficient d'absorption d'eau. Il en résulte que le traitement ne fonctionne pas [Figure 92]. En effet, le coefficient d'absorption d'eau des GR est plus élevé après leur passage

⁴⁶ COURARD, Luc. Maintenance, restauration et protection des constructions

dans la cellule de carbonatation. Cependant, le pourcentage d'augmentation ne dépasse pas 15% ce qui limite l'influence de ce traitement.

Coefficient d'absorption d'eau [%]	Moyenne	Ecart-type	Augmentation [%]
Fraction [5 ; 10] mm	9.04	0.82	12.46
Fraction [10 ; 20] mm	8.32	0.39	3.48

Figure 92 - Coefficient d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] et [10 ; 20] mm après carbonatation

A.3. Cinétique d'absorption d'eau des granulats recyclés

Evolution de la masse [g] des GR [5 ; 10] au cours du temps [min] (après immersion)																
16.04.15	Traitement	n° échantillon	Masse Ech.	Masse Bas	10	20	30	40	50	60	90	120	150	180	210	240
Non traités	A		49.57	6.11	57.42	57.4	57.48	57.88	57.54	58.14	58.02	59.08	59.18	59.38	59.7	59.27
	B		49.58	7.09	59.48	59.39	59.12	59.52	59.74	58.13	58.84	59.88	60.27	60.2	60.03	60.46
	C		49.65	6.65	60.18	59.22	60.25	58.74	58.18	59.21	59.2	58.69	60.25	60.42	60.03	60.58
CEM I 52.5 E/C = 0.8	4		53.05	7.43	64.75	64.09	65.44	66.06	64.19	64.44	64.46	63.76	65.97	66.24	66.3	65.59
	5		51.66	7.46	63.59	63.96	63.67	64.37	62.4	62.23	62.29	62.92	64.94	63.21	63.46	63.68
	6		53.29	6.3	65.12	65.05	64.57	65.44	63.67	63.56	63.86	64.17	64.92	64.56	64.85	65.63
Hydrofuge A (2e trempage)	1		50.11	7.97	58.96	59.18	59.71	59.81	59.39	59.23	58.98	58.82	59.8	59.38	59.96	60.47
	2		50.13	6.35	57.14	57.8	56.91	57.55	57.12	57.38	56.85	56.99	57.95	58.36	58.96	58.21
	3		49.5	7.07	56.77	56.8	57.16	56.98	56.93	57.15	57.92	57.7	58.6	59.13	58.74	58.9
Hydrofuge B (2e trempage)	4		50.57	6.56	58.44	58.69	58.65	59.1	58.66	58.82	58.77	58.74	59.78	59.33	59.28	59.18
	5		50.18	6.78	58.68	58.79	58.66	59.06	58.95	59.08	58.88	58.78	58.89	59.03	59.16	59.78
	6		50.74	7.43	60.66	59.77	59.51	59.63	59.82	59.91	60.27	59.99	59.66	60.38	60.53	60.02
Hydrofuge C (2e trempage)	7		49.89	8.12	59.47	59.63	59.45	59.37	59.46	59.56	60.16	60.19	60.23	60.58	60.37	60.74
	8		50.09	6.07	57.12	56.74	56.89	57.66	57.38	57.36	57.81	57.74	58.32	59.03	58.89	59.02
	9		49.8	6.76	58.35	58.03	57.97	57.81	58.18	58.66	58.53	58.7	59.24	59.63	60.02	60.36
Chaux E/C = 2	12		52.3	8.09	67.85	67.22	67.68	68.05	67.95	67.33	67.64	66.8	66.73	66.98	67.34	67.58
	13		53.53	7.88	68.19	68.63	68.34	67.89	68.47	68.04	68.14	66.72	66.76	67.59	67.94	68.54
Amidon E/A=2	12		49.89	7.13	59.38	59.36	59.14	59.52	59.84	59.3	58.84	59.88	60.31	60.2	60.09	60.66
	13		49.98	7.49	59.43	59.39	59.47	59.86	59.54	60.14	60.04	61.08	61.17	61.38	61.74	61.25

Teneur en eau [%]	n° échantillon	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min	t = 40 min	t = 50 min	t = 60 min	t = 90 min	t = 120 min	t = 150 min	t = 180 min	t = 210 min	t = 240 min	t = 1440 min
Non traités	A	3.51	3.47	3.63	4.44	3.75	4.96	4.72	6.86	7.06	7.46	8.11	7.24	8.38
	B	5.67	5.49	4.94	5.75	6.19	2.94	4.38	6.47	7.26	7.12	6.78	7.64	7.36
	C	7.81	5.88	7.96	4.91	3.79	5.86	5.84	4.81	7.96	8.30	7.51	8.62	8.37
CEM I 52.5 E/C = 0.8	4	8.05	6.80	9.35	10.52	6.99	7.46	7.50	6.18	10.35	10.86	10.97	9.63	11.16
	5	8.65	9.37	8.81	10.16	6.35	6.02	6.14	7.36	11.27	7.92	8.40	8.83	9.35
	6	10.38	10.25	9.35	10.98	7.66	7.45	8.01	8.59	10.00	9.33	9.87	11.33	10.92
Hydrofuge A (2e trempage)	1	1.76	2.20	3.25	3.45	2.61	2.29	1.80	1.48	3.43	2.59	3.75	4.77	4.63
	2	1.32	2.63	0.86	2.13	1.28	1.80	0.74	1.02	2.93	3.75	4.95	3.45	4.75
	3	0.40	0.46	1.19	0.83	0.73	1.17	2.73	2.28	4.10	5.17	4.38	4.71	4.93
Hydrofuge B (2e trempage)	4	2.59	3.08	3.01	3.90	3.03	3.34	3.24	3.18	5.24	4.35	4.25	4.05	4.35
	5	3.43	3.65	3.39	4.18	3.97	4.22	3.83	3.63	3.85	4.13	4.38	5.62	4.58
	6	4.91	3.15	2.64	2.88	3.25	3.43	4.14	3.59	2.94	4.36	4.65	3.65	5.18
Hydrofuge C (2e trempage)	7	2.93	3.25	2.89	2.73	2.91	3.11	4.31	4.37	4.45	5.15	4.73	5.47	5.35
	8	1.92	1.16	1.46	2.99	2.44	2.40	3.29	3.15	4.31	5.73	5.45	5.71	5.65
	9	3.59	2.95	2.83	2.51	3.25	4.22	3.96	4.30	5.38	6.16	6.95	7.63	7.83
Chaux E/C = 2	12	14.26	13.06	13.94	14.65	14.46	13.27	13.86	12.26	12.12	12.60	13.29	13.75	13.46
	13	12.67	13.49	12.95	12.11	13.19	12.39	12.57	9.92	9.99	11.54	12.20	13.32	13.88
Amidon E/A=2	12	4.73	4.69	4.25	5.01	5.65	4.57	3.65	5.73	6.59	6.37	6.15	7.30	7.76
	13	3.92	3.84	4.00	4.78	4.14	5.34	5.14	7.22	7.40	7.82	8.54	7.56	8.56

Tableau 48 – Cinétique d'absorption d'eau des GR [5 ; 10] mm

Evolution de la masse [g] des GR [10 ; 20] au cours du temps [min] (après immersion)															
Traitement	n° échantillon	Masse Ech.	Masse Bas	10	20	30	40	50	60	90	120	150	180	210	240
Non traités	A	49.73	4.66	55.47	55.93	55.64	55.67	55.73	55.74	55.71	55.83	56.26	55.93	56.29	56.76
	B	49.90	4.87	56.31	56.58	56.61	56.43	56.29	56.45	57.13	57.38	57.15	57.22	57.42	57.50
	C	49.99	4.68	56.41	56.65	56.59	56.63	56.37	56.41	56.03	56.47	56.79	56.80	56.74	56.92
CEM I 52.5 E/C = 0.8	10	52.09	4.01	57.93	58.42	58.31	58.33	57.58	57.68	58.43	58.45	59.21	58.77	58.93	59.42
	11	52.25	3.99	58.03	58.32	58.33	58.26	57.60	57.62	58.47	58.50	59.18	58.73	59.29	59.36
	12	51.47	4.09	56.55	56.71	56.78	57.56	56.85	56.84	57.16	57.74	58.88	58.83	58.70	59.18
50 % CEM I 52.5 / 50% CV E/C = 0.8	4	50.75	4.09	58.03	58.32	58.51	57.26	57.58	57.62	58.43	57.50	58.21	57.73	58.23	58.36
	5	51.75	4.42	58.96	60.08	58.78	58.84	58.79	58.86	57.74	58.01	58.08	58.17	58.27	58.44
	6	51.81	4.72	60.42	60.92	60.01	60.55	60.29	60.37	60.64	60.43	60.51	60.49	60.36	60.07
Hydrofuge A (2e trempage)	1	49.83	4.18	54.12	54.46	54.62	54.22	54.37	54.55	54.64	54.72	54.80	54.83	54.89	55.03
	2	50.18	3.43	54.51	54.42	54.64	55.08	54.38	54.42	54.22	54.34	54.73	54.56	54.96	55.04
	3	49.77	5.34	55.14	55.21	55.19	55.55	55.80	55.93	55.30	55.77	55.87	55.89	55.86	55.97
Hydrofuge B (2e trempage)	4	50.50	4.40	56.59	56.69	56.81	56.52	56.82	56.87	57.10	56.73	56.91	56.81	56.92	57.05
	5	50.35	4.82	55.46	55.54	55.58	55.80	56.15	55.92	55.86	55.95	56.02	56.01	56.32	56.42
	6	50.43	5.06	55.86	55.61	55.60	55.60	55.72	56.07	55.92	56.02	55.91	55.96	56.28	56.54
Hydrofuge C (2e trempage)	7	50.46	4.26	55.88	55.99	55.55	55.38	55.82	56.02	55.92	55.96	55.61	55.88	56.32	56.95
	8	50.48	4.53	55.61	55.91	56.39	55.82	55.80	55.87	55.63	55.78	56.09	56.56	56.73	57.08
	9	49.72	4.59	54.97	54.83	54.87	55.06	55.07	55.14	54.82	55.08	54.85	55.10	55.34	55.89
Chaux E/C = 2	11	52.60	4.25	61.68	60.59	60.58	60.31	60.32	60.48	60.41	60.47	62.27	60.98	61.23	61.78
	12	52.13	4.48	59.91	60.08	59.33	60.05	60.40	60.51	60.29	60.33	59.72	60.17	60.37	60.58
	13	51.66	4.48	58.01	58.74	57.95	57.44	58.35	58.23	57.34	58.21	58.32	58.31	58.47	58.64
Amidon E/A=2	12	50.31	5.39	59.91	59.98	59.33	60.05	60.32	60.52	60.27	60.33	59.76	60.97	60.87	60.78
	13	50.15	6.35	61.68	60.59	60.58	60.31	60.32	60.48	60.41	60.47	62.27	60.98	61.23	61.78

Annexes - A.3. Cinétique d'absorption d'eau des granulats recyclés

Teneur en eau [%]	n° échantillon	t = 10 min	t = 20 min	t = 30 min	t = 40 min	t = 50 min	t = 60 min	t = 90 min	t = 120 min	t = 150 min	t = 180 min	t = 210 min	t = 240 min	t = 1440 min
Non traités	A	2.17	3.10	2.51	2.57	2.69	2.71	2.65	2.90	3.76	3.10	3.82	4.77	5.01
	B	3.09	3.63	3.69	3.33	3.05	3.37	4.73	5.23	4.77	4.91	5.31	5.47	6.27
	C	3.48	3.96	3.84	3.92	3.40	3.48	2.72	3.60	4.24	4.26	4.14	4.50	5.40
CEM I 52.5 E/C = 0.8	10	3.51	4.45	4.24	4.28	2.84	3.03	4.47	4.51	5.97	5.13	5.43	6.37	7.78
	11	3.43	3.98	4.00	3.87	2.60	2.64	4.27	4.33	5.63	4.77	5.84	5.97	7.66
	12	1.92	2.23	2.37	3.89	2.51	2.49	3.11	4.24	6.45	6.35	6.10	7.03	4.16
50 % CEM I 52.5 / 50% CV E/C = 0.8	4	6.29	6.86	7.23	4.77	5.40	5.48	7.07	5.24	6.64	5.69	6.68	6.94	7.90
	5	5.39	7.56	5.04	5.16	5.06	5.20	3.03	3.56	3.69	3.86	4.06	4.39	6.71
	6	7.51	8.47	6.72	7.76	7.26	7.41	7.93	7.53	7.68	7.64	7.39	6.83	8.76
Hydrofuge A (2e trempage)	1	0.22	0.90	1.22	0.42	0.72	1.08	1.26	1.42	1.59	1.65	1.77	2.05	2.41
	2	1.79	1.61	2.05	2.93	1.53	1.61	1.22	1.45	2.23	1.89	2.69	2.85	4.74
	3	0.06	0.20	0.16	0.88	1.39	1.65	0.38	1.33	1.53	1.57	1.51	1.73	2.07
Hydrofuge B (2e trempage)	4	3.35	3.54	3.78	3.21	3.80	3.90	4.36	3.62	3.98	3.78	4.00	4.26	4.77
	5	0.58	0.73	0.81	1.25	1.95	1.49	1.37	1.55	1.69	1.67	2.28	2.48	3.79
	6	0.73	0.24	0.22	0.22	0.46	1.15	0.85	1.05	0.83	0.93	1.57	2.08	3.05
Hydrofuge C (2e trempage)	7	2.30	2.52	1.64	1.31	2.18	2.58	2.38	2.46	1.76	2.30	3.17	4.42	5.51
	8	1.19	1.78	2.73	1.60	1.56	1.70	1.23	1.53	2.14	3.07	3.41	4.10	6.14
	9	1.33	1.05	1.13	1.51	1.53	1.67	1.03	1.55	1.09	1.59	2.07	3.18	4.89
Chaux E/C = 2	11	9.18	7.11	7.09	6.58	6.60	6.90	6.77	6.88	10.30	7.85	8.33	9.37	11.43
	12	6.33	6.66	5.22	6.60	7.27	7.48	7.06	7.14	5.97	6.83	7.21	7.62	9.96
	13	3.62	5.03	3.50	2.52	4.28	4.05	2.32	4.01	4.22	4.20	4.51	4.84	6.45
Amidon E/A=2	12	8.37	8.51	7.22	8.65	9.18	9.58	9.08	9.20	8.07	10.48	10.28	10.10	10.55
	13	10.33	8.16	8.14	7.60	7.62	7.94	7.80	7.92	11.51	8.93	9.43	10.53	11.96

Tableau 49 – Cinétique d'absorption d'eau des GR [10 ; 20] mm

Annexes - A.3. Cinétique d'absorption d'eau des granulats recyclés

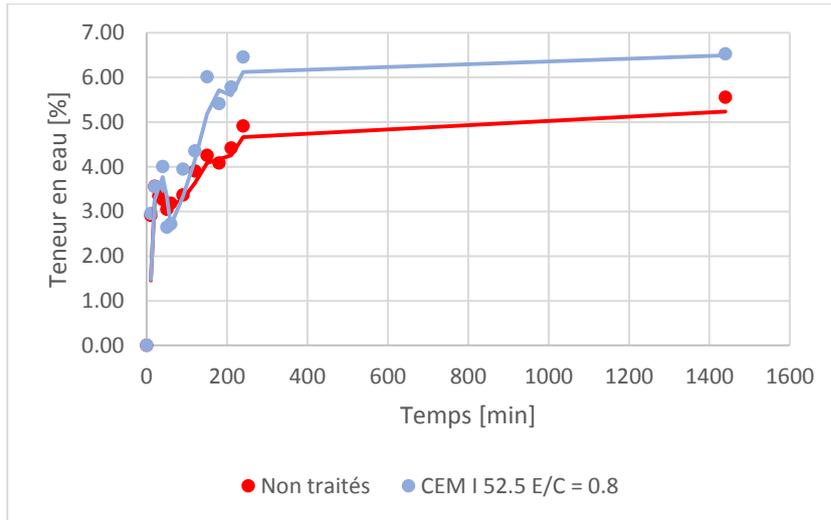


Figure 93 – Cinétique d'absorption d'eau des GR [10 ; 20] mm - CEM I 52.5

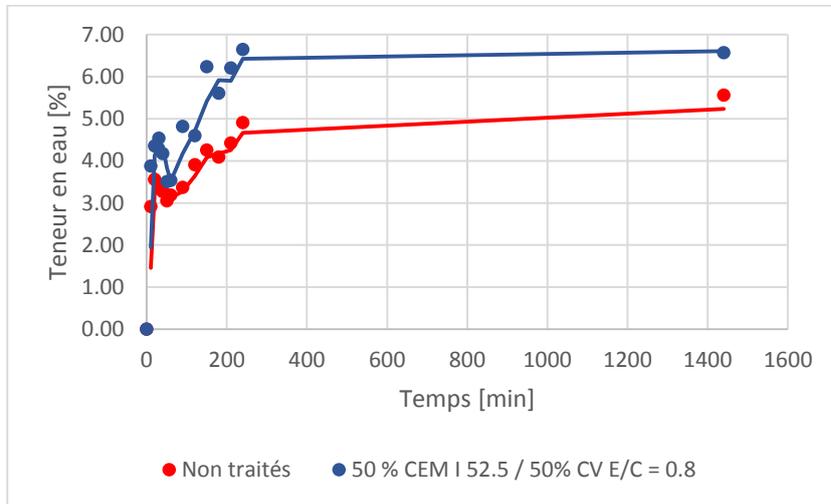


Figure 94 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [10 ; 20] mm - 50 % CEM I 52.5 / 50 % CV

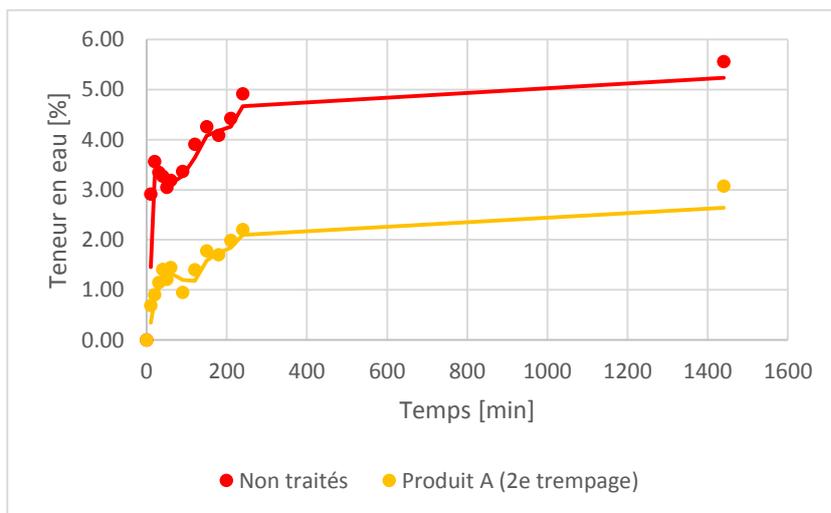


Figure 95 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [10 ; 20] mm - Hydrofuge A (2e trempage)

Annexes - A.3. Cinétique d'absorption d'eau des granulats recyclés

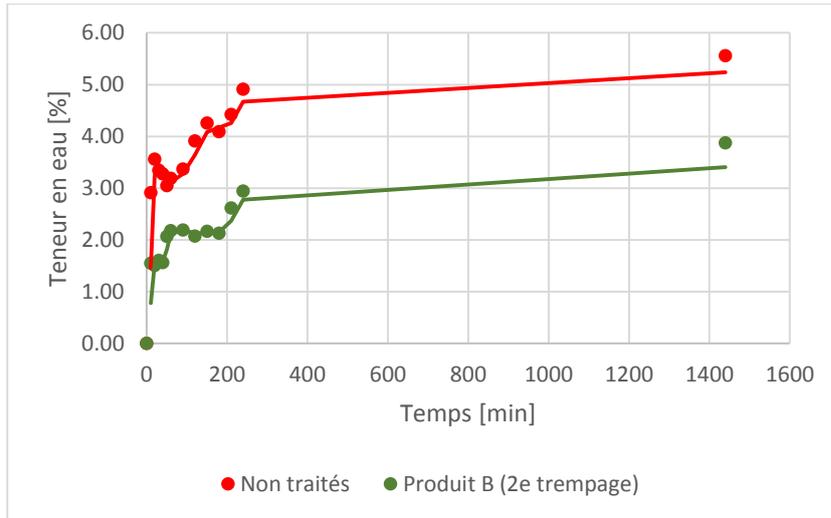
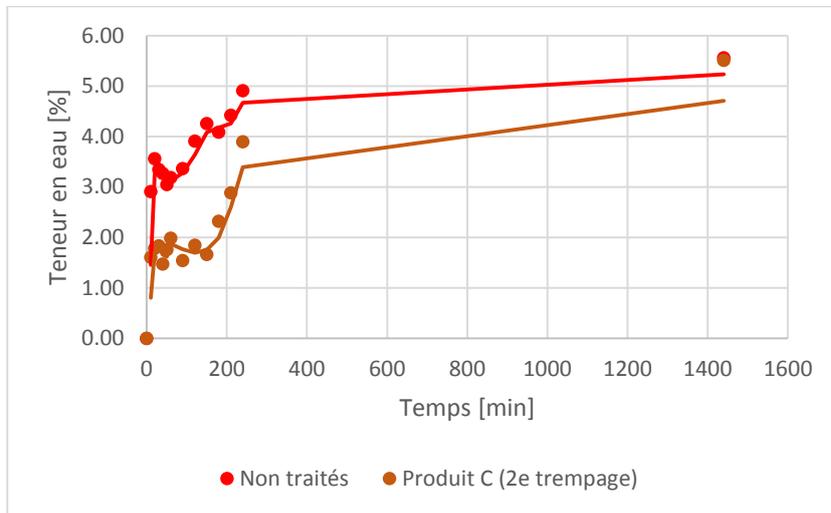


Figure 96 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [10 ; 20] mm - Hydrofuge B (2e trempage)



Annexes - A.3. Cinétique d'absorption d'eau des granulats recyclés



Figure 99 - Cinétique d'absorption d'eau des GR [10 ; 20] mm – Amidon

A.4. Propriétés des composants des bétons

GR [2;7.1] non traités		
29.04.15	Essai de classification des gravillons recyclés selon leur composition (Norme EN 933-11)	
Identification de l'échantillon :	Déchets provenant de la société Tradecowall	
Laboratoire :	ULg	
Echantillon 1		
Masse de la prise d'essai [g]	460.41	
	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	23.86	5.18
Céramiques	6.28	1.36
Béton, mortier, granulats naturels	429.41	93.27
Bois	0.07	0.02
Particules fines	0.79	0.17
Total	460.41	100.00
Echantillon 2		
Masse de la prise d'essai [g]	462.09	
	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	18.43	3.99
Céramiques	9.87	2.14
Béton, mortier, granulats naturels	433.31	93.77
Bois	0.16	0.03
Particules fines	0.32	0.07
Total	462.09	100.00
Echantillon 3		
Masse de la prise d'essai [g]	462.18	
	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	26.03	5.63
Céramiques	7.02	1.52
Béton, mortier, granulats naturels	428.41	92.69
Bois	0	0.00
Particules fines	0.72	0.16
Total	462.18	100.00
Moyenne des échantillons		
Masse de la prise d'essai [g]	461.56	
Types de matériaux	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	22.77	4.93
Céramiques	7.72	1.67
Béton, mortier, granulats naturels	430.38	93.24
Bois	0.08	0.02
Particules fines	0.61	0.13
Total	460.95	100.00

GR [6.3;14] non traités		
29.04.15	Essai de classification des gravillons recyclés selon leur composition (Norme EN 933-11)	
Identification de l'échantillon :	Déchets provenant de la société Tradecowall	
Laboratoire :	ULg	
Echantillon 1		
Masse de la prise d'essai [g]	474.76	
	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	41.57	8.76
Céramiques	12.42	2.62
Béton, mortier, granulats naturels	420.25	88.52
Bois	0.41	0.09
Particules fines	0.11	0.02
Total	474.76	100.00
Echantillon 2		
Masse de la prise d'essai [g]	472.33	
	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	39.26	8.31
Céramiques	10.07	2.13
Béton, mortier, granulats naturels	422.21	89.39
Bois	0.73	0.15
Particules fines	0.06	0.01
Total	472.33	100.00
Echantillon 3		
Masse de la prise d'essai [g]	477.43	
	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	44.13	9.24
Céramiques	16.12	3.38
Béton, mortier, granulats naturels	416.86	87.31
Bois	0.15	0.03
Particules fines	0.17	0.04
Total	477.43	100.00
Moyenne des échantillons		
Masse de la prise d'essai [g]	474.84	
Types de matériaux	Masse [g]	Pourcentage [%]
Matériaux bitumineux	41.65	8.77
Céramiques	12.87	2.71
Béton, mortier, granulats naturels	419.77	88.40
Bois	0.43	0.09
Particules fines	0.11	0.02
Total	474.84	100.00

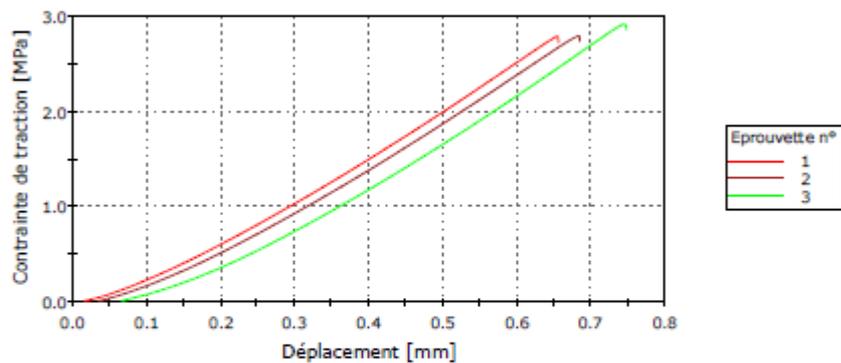
A.5. Propriétés des bétons

mardi 26 mai 2015

TFE Thomas Rt.is_tens

No Rapport	TFE thomas
Nom de l'essai	Traction directe
Norme	NBN B15 - 211 (1974)
Vitesse	0,05 MPa/s
Opérateur	ADA
Température	22,1 °C
Humidité	46,1 %
Cellule	200 kN

Eprouvette 1 à 3



	N°	Charge rupture [N]	Contr. rupture [N/mm ²]	Déf. Charge rupt. [%]	Diamètre moyen [mm]	Hauteur [mm]	Rupture de X surface sup [mm]	Rupture à X surface sup [mm]
1	T1 GN	14099	2,8	0,81	80,2	79,0	0	7
2	T2 GN	14100	2,8	0,81	80,2	80,0	0	5
3	T3 GN	14729	2,9	0,86	80,2	79,0	0	6
Moyenne		14309	2,8	0,82	80,2	79,3		
E-type		363,3	0,1	0,0	0,0	0,6		

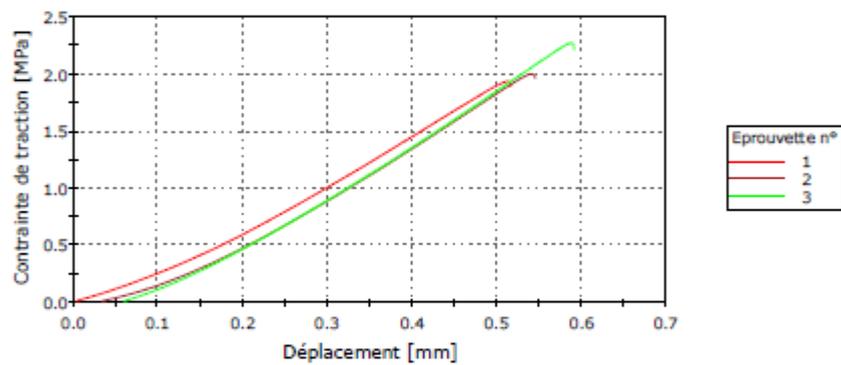
Laboratoire des Matériaux de Construction - ULg

mardi 26 mai 2015

TFE Thomas Rt GR.is_tens

No Rapport	TFE thomas Rt GR
Nom de l'essai	Traction directe
Norme	NBN B15 - 211 (1974)
Vitesse	0,05 MPa/s
Opérateur	ADA
Température	22,1 °C
Humidité	46,1 %
Cellule	200 kN

Eprouvette 1 à 3



	N°	Charge rupture [N]	Contr. rupture [N/mm ²]	Déf. Charge rupt. [%]	Diamètre moyen [mm]	Hauteur [mm]	Rupture de X surface sup [mm]	Rupture à X surface sup [mm]
1	T1 GR	9755	1,9	0,64	80,1	80,0	0	11
2	T2 GR	10087	2,0	0,64	80,2	79,0	0	7
3	T3 GR	11445	2,3	0,66	80,2	80,0	16	25
Moyenne		10429	2,1	0,65	80,2	79,7		
E-type		895,4	0,2	0,0	0,0	0,6		

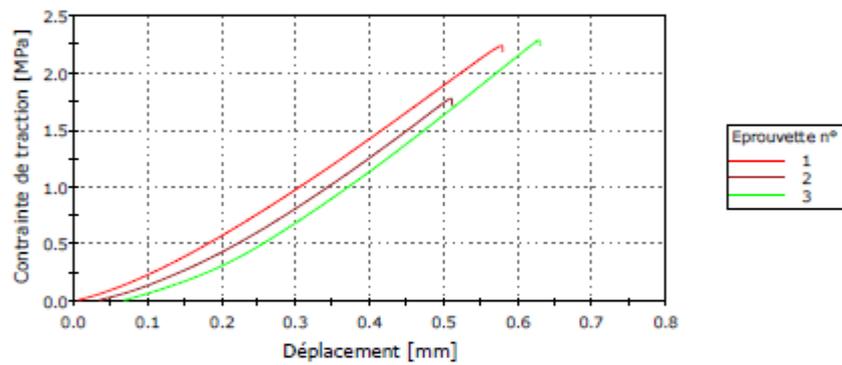
Laboratoire des Matériaux de Construction - ULg

mardi 26 mai 2015

TFE Thomas Rt GR+M.is_tens

No Rapport	TFE thomas Rt GR+M
Nom de l'essai	Traction directe
Norme	NBN B15 - 211 (1974)
Vitesse	0,05 MPa/s
Opérateur	ADA
Température	22,1 °C
Humidité	46,1 %
Cellule	200 kN

Eprouvette 1 à 3



	N°	Charge rupture [N]	Contr. rupture [N/mm ²]	Déf. Charge rupt. [%]	Diamètre moyen [mm]	Hauteur [mm]	Rupture de X surface sup [mm]	Rupture à X surface sup [mm]
1	T1 GR+M	11287	2,2	0,71	80,2	80,0	16	30
2	T2 GR+M	8964	1,8	0,60	80,2	79,0	15	35
3	T3 GR+M	11524	2,3	0,70	80,2	80,0	31	45
Moyenne		10592	2,1	0,67	80,2	79,7		
E-type		1414,3	0,3	0,1	0,0	0,6		

Laboratoire des Matériaux de Construction - ULg

A.6. Fiche des données de sécurité de l'hydrofuge A

REVISION DATE: 20/12/06 Issue No 2



The Chemical Company

SAFETY DATA SHEET

1 IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/PREPARATION AND COMPANY/UNDERTAKING

PRODUCT NAME [REDACTED]
 PRODUCT NO. 190864
 SUPPLIER BASF Construction Chemicals (UK) Ltd
 Albany House
 Swinton Hall Road
 Swinton Manchester M27 4DT
 (+44) 161 794 7411
 (+44) 161 727 8647

2 COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

COMPOSITION COMMENTS

This product is classified as containing no hazardous ingredients according to the EC Directives.

3 HAZARDS IDENTIFICATION

Not regarded as a health or environmental hazard under current legislation.

4 FIRST-AID MEASURES

INHALATION

Move the exposed person to fresh air at once. Provide fresh air, warmth and rest, preferably in a comfortable upright sitting position. Get medical attention if any discomfort continues.

INGESTION

DO NOT INDUCE VOMITING! NEVER MAKE AN UNCONSCIOUS PERSON VOMIT OR DRINK FLUIDS! Rinse mouth thoroughly. Promptly get affected person to drink large volumes of water to dilute the swallowed chemical. Obtain medical advice. Provide rest, warmth and fresh air.

SKIN CONTACT

Remove affected person from source of contamination. Wash skin with soap and water. Get medical attention if irritation develops.

EYE CONTACT

Make sure to remove any contact lenses from the eyes before rinsing. Promptly wash eyes with plenty of water while lifting the eye lids. Continue to rinse for at least 15 minutes. Get medical attention if any discomfort continues.

5 FIRE-FIGHTING MEASURES

EXTINGUISHING MEDIA

This product is not flammable. Use fire-extinguishing media appropriate for surrounding materials.

6 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

ENVIRONMENTAL PRECAUTIONS

Avoid subsoil penetration. Prevent product from entering drains. Do not contaminate surface water.

SPILL CLEAN UP METHODS

Stop leak if possible without risk. Wear necessary protective equipment. Absorb in vermiculite, dry sand or earth and place into containers. Flush with plenty of water to clean spillage area. Do not contaminate water sources or sewer.

7 HANDLING AND STORAGE

USAGE PRECAUTIONS

Avoid spilling, skin and eye contact. Observe good industrial safety and hygiene practice.

STORAGE PRECAUTIONS

Keep in original container. Protect against Freezing Store Between 5 and 30 Degrees C

8 EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

Annexes - A.6. Fiche des données de sécurité de l'hydrofuge A

REVISION DATE: 20/12/06 Issue No 2

Name	Std	LT - ppm	LT - mg/m3	ST - ppm	ST - mg/m3
		N/A		N/A	

PROTECTIVE EQUIPMENT



ENGINEERING MEASURES

No particular ventilation requirements.

HAND PROTECTION

Use suitable protective gloves if risk of skin contact.

EYE PROTECTION

If risk of splashing, wear safety goggles or face shield.

OTHER PROTECTION

Wear appropriate clothing to prevent any possibility of skin contact.

HYGIENE MEASURES

DO NOT SMOKE IN WORK AREA! Wash at the end of each work shift and before eating, smoking and using the toilet. Wash promptly if skin becomes wet or contaminated. Promptly remove any clothing that becomes contaminated. When using do not eat, drink or smoke.

9 PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

APPEARANCE	Liquid	
COLOUR	Milky white emulsion	
ODOUR	Mild (or faint).	
SOLUBILITY	Miscible with water.	
MELTING POINT (°C)	0	AUTO IGNITION TEMPERATURE (* N/A C)
FLAMMABILITY LIMIT - LOWER(%)	N/A	

10 STABILITY AND REACTIVITY

STABILITY

Stable under normal temperature conditions.

CONDITIONS TO AVOID

Avoid excessive heat for prolonged periods of time.

HAZARDOUS DECOMPOSITION PRODUCTS

None other than those associated with the packaging

11 TOXICOLOGICAL INFORMATION

TOXIC DOSE 1 - LD 50 N/A

GENERAL INFORMATION

Not irritating

HEALTH WARNINGS

No specific health warnings noted.

Other Health Effects

May cause sensitisation to susceptible persons

12 ECOLOGICAL INFORMATION

ECOTOXICITY

No Data

13 DISPOSAL CONSIDERATIONS

DISPOSAL METHODS

Dispose of waste and residues in accordance with local authority requirements.

14 TRANSPORT INFORMATION

Annexes - A.6. Fiche des données de sécurité de l'hydrofuge A

REVISION DATE: 20/12/06 Issue No 2

ROAD TRANSPORT NOTES Product not classified as dangerous goods under any transport regulations
RAIL TRANSPORT NOTES Product not classified as dangerous goods under any transport regulation
AIR TRANSPORT NOTES Product not classified as dangerous goods under any transport regulations

15 REGULATORY INFORMATION

RISK PHRASES

NC Not classified.

SAFETY PHRASES

NC Not classified.

EU DIRECTIVES

System of specific information relating to Dangerous Preparations, 2001/68/EEC.

APPROVED CODE OF PRACTICE

Classification and Labeling of Substances and Preparations Dangerous for Supply.

GUIDANCE NOTES

Workplace Exposure Limits: EH40. Introduction to Local Exhaust Ventilation HS(G)37. CHIP for everyone HSG(108).

16 OTHER INFORMATION

REVISION DATE 20/12/06
REV. NO./REPL. SDS GENERATED Issue 2
SDS NO. SDS0420