

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Vincent BOULAY

Jury : Ammar YAHIA (directeur)
Richard GAGNÉ
Richard MORIN

À ma mère, à mon père

RÉSUMÉ

La réutilisation et la valorisation de débris de démolition sont un enjeu très important pour l'industrie de la construction, particulièrement au Canada où un grand nombre d'infrastructures arrivent à la fin de leur cycle de vie. Bien que les débris de démolition soient déjà utilisés dans la construction de sous fondations de routes, ceux-ci sont très peu utilisés dans la confection de nouveaux bétons. Ce projet de recherche vise à évaluer le potentiel d'utilisation d'un matériau recyclé à base de débris de démolition dans la confection de nouveaux bétons de résistance moyenne destinés à la construction résidentielle. Le matériau recyclé utilisé dans le cadre de cette étude est un matériau de classe MR-2, composé en majorité de résidus de béton concassé.

Cette étude consiste en l'analyse des propriétés des granulats de béton recyclés ainsi que leur impact sur les propriétés des bétons dans lesquels ils sont utilisés en remplacement des granulats naturels. En plus des essais classiques tels que l'analyse granulométrique, la mesure de la masse volumique, de l'absorption et l'essai Los Angeles, la caractérisation des granulats recyclés a permis de mesurer la teneur en mortier résiduel ainsi que la vitesse d'absorption. Les résultats de cette phase ont permis d'adapter la méthode de préparation des bétons confectionnés lors de l'étude paramétrique sur béton. En effet, lors de la confection des bétons, une période de pré-saturation des granulats a été ajoutée au protocole de malaxage afin de minimiser l'impact de la grande porosité des granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais du béton.

Dans le cadre de l'étude paramétrique, des formulations de béton ayant des rapports eau/liant (E/L) de 0,55 et 0,65 ont été préparées à des taux de remplacement des granulats naturel par des granulats recyclés variables. La résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion et le module d'élasticité ainsi que les propriétés de durabilité, notamment, la perméabilité aux ions chlorures, le retrait de séchage, la résistance au gel-dégel et la perméabilité à l'eau ont été évaluées pour les mélanges de bétons confectionnés. Les travaux de cette phase ont permis de quantifier l'impact des différents taux de remplacement sur les propriétés des bétons.

Bien que le remplacement du granulats naturel par un granulats recyclé ait généralement un impact négatif sur certaines propriétés du béton, il est possible de minimiser ou même d'éliminer celui-ci en optimisant le taux de remplacement. En effet, cette étude a démontré qu'un taux de remplacement de 20% ou même de 35% dans certains cas ne cause pas ou très peu d'impacts négatifs sur les propriétés du béton.

Mots-clés : Granulats recyclés, mortier résiduel, béton de ciment, propriétés mécaniques, durabilité, taux de remplacement, interface granulats-pâte.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur Ammar Yahia pour son support tout au long de mes travaux de maîtrise. Son expertise et sa disponibilité ont fait en sorte que ce projet de recherche fût une expérience très enrichissante.

Un remerciement tout particulier à l'équipe technique du laboratoire de béton, Denis Bolduc, Rajko Vojnovic, Ghislaine Luc, Sylvain Roy et Johan Gass. Ce projet de recherche n'aurait pas pu avoir lieu sans leurs conseils et leur aide précieuse. Merci aussi à tous mes collègues, étudiants gradués et stagiaires du groupe béton. La camaraderie et l'entraide présente dans le groupe béton ont rendu cette expérience aussi passionnante que plaisante.

Je tiens aussi à remercier le Groupe Bauval inc. pour le don de matériaux recyclés qui ont été nécessaires au projet.

Finalement merci à ma famille et à mes amis pour leur présence et leurs encouragements durant les deux dernières années.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
CHAPITRE 1 Introduction	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Définition et objectifs du projet de recherche	2
1.3 Plan du document	2
CHAPITRE 2 État de l'art.....	3
2.1 Granulat recyclé : définition	3
2.2 Description du granulat recyclé.....	4
2.3 Propriétés du granulat recyclé	5
2.3.1 <i>Distribution granulométrique</i>	5
2.3.2 <i>Masse volumique</i>	5
2.3.3 <i>Absorption</i>	6
2.3.4 <i>Résistance à l'abrasion</i>	7
2.3.5 <i>Teneur en mortier résiduel</i>	7
2.4 Impact du remplacement du granulat naturel	9
2.5 Propriétés à l'état frais.....	9
2.6 Zone de transition à l'interface granulat/pâte	10
2.7 Propriétés mécaniques	12
2.7.1 <i>Facteurs affectant les propriétés mécaniques</i>	12
(1) <i>Rapport E/C</i>	12
(2) <i>Qualité et teneur en mortier</i>	12
(3) <i>Granulométrie du granulat recyclé</i>	13
(4) <i>Méthode de préparation et teneur en eau du granulat</i>	14
(5) <i>Impact de l'utilisation des ajouts cimentaires</i>	15
(a) <i>Cendres volantes</i>	15
(b) <i>Laitiers</i>	16
(c) <i>Fumée de silice</i>	16
(6) <i>Taux de remplacement</i>	16
2.7.2 <i>Résistance à la compression</i>	17
2.7.3 <i>Résistance à la traction</i>	18
2.7.4 <i>Résistance à la flexion</i>	19
2.7.5 <i>Module d'élasticité</i>	19
2.7.6 <i>Développement des résistances</i>	20
2.7.7 <i>Masse volumique à l'état durci</i>	22
2.7.8 <i>Résistance à l'abrasion du béton</i>	22
2.8 Propriétés liées à la durabilité des bétons recyclés.....	22
2.8.1 <i>Retrait</i>	22
2.8.2 <i>Résistance aux cycles de gel/dégel</i>	23
2.8.3 <i>Carbonatation</i>	24

2.8.4	<i>Pénétration des ions chlore</i>	25
2.8.5	<i>Perméabilité du béton à l'eau</i>	26
2.8.6	<i>Volume de pores</i>	27
2.9	Formulation des bétons contenant des granulats recyclés.....	28
2.9.1	<i>Méthode du mélange en deux étapes</i>	28
2.9.2	<i>Méthode du mortier équivalent</i>	31
2.9.3	<i>Méthode de la pré-saturation et de la compensation d'eau</i>	31
2.9.4	<i>Autre information pertinente à la formulation</i>	32
CHAPITRE 3 Programme expérimental		33
3.1	Définition et objectifs du projet de recherche	33
3.2	Méthodologie	33
3.2.1	<i>Phase 1 : Conditionnement et caractérisation des granulats recyclés</i>	34
3.2.2	<i>Phase 2 : Étude paramétrique sur béton</i>	35
3.3	Matériaux utilisés	35
3.3.1	<i>Ciment et ciment hydraulique composé</i>	35
3.3.2	<i>Sable</i>	36
3.3.3	<i>Gros granulat naturel</i>	37
3.3.4	<i>Granulat recyclé</i>	40
3.3.5	<i>Eau de gâchage</i>	41
3.3.6	<i>Agent entraîneur d'air</i>	41
3.4	Procédure expérimentale	42
3.4.1	<i>Séquence de malaxage</i>	42
3.4.2	<i>Méthodes d'échantillonnage et de mûrissement</i>	42
CHAPITRE 4 Présentation des résultats		43
4.1	Phase 1 – Essais sur granulats	43
4.1.1	<i>Analyse granulométrique</i>	43
4.1.2	<i>Essai de masse volumique et absorption</i>	44
4.1.3	<i>Résistance à l'impact et à l'abrasion</i>	45
4.1.4	<i>Vitesse d'absorption</i>	47
4.1.5	<i>Teneur en mortier résiduel</i>	49
4.2	Phase 2 – Étude paramétrique sur béton	53
4.2.1	<i>Formulations des bétons</i>	54
4.2.2	<i>Essais sur béton frais</i>	56
4.2.3	<i>Résistance à la compression</i>	56
4.2.4	<i>Résistance à la traction</i>	59
4.2.5	<i>Résistance à la flexion</i>	62
4.2.6	<i>Module d'élasticité</i>	65
4.2.7	<i>Retrait de séchage</i>	66
4.2.8	<i>Résistance au gel/dégel</i>	68
4.2.9	<i>Perméabilité aux ions chlorures</i>	70
4.2.10	<i>Perméabilité à l'eau</i>	72
CHAPITRE 5 Analyse des résultats et discussions.....		76
5.1	Résultats des essais de caractérisation des granulats	76
5.1.1	<i>Analyse granulométrique</i>	76
5.1.2	<i>Essais de résistance à l'abrasion Los Angeles</i>	76
5.1.3	<i>Mesure de la masse volumique et absorption</i>	77
5.1.4	<i>Mesure de la vitesse d'absorption</i>	77

5.1.5	<i>Mesure de la teneur en mortier résiduel</i>	78
5.2	Essais sur béton	79
5.2.1	<i>Bétons de rapport E/C de 0,65</i>	80
(1)	<i>Essais sur béton à l'état frais</i>	81
(2)	<i>Résistance à la compression</i>	81
(3)	<i>Résistance à la traction indirecte</i>	82
(4)	<i>Résistance à la flexion</i>	82
(5)	<i>Retrait de séchage</i>	83
(6)	<i>Résumé des performances des mélanges de rapport E/C 0,65</i>	84
5.2.2	<i>Bétons de rapport E/C de 0,55</i>	86
(1)	<i>Essais sur béton à l'état frais</i>	86
(2)	<i>Résistance à la compression</i>	87
(3)	<i>Résistance à la traction indirecte</i>	88
(4)	<i>Résistance à la flexion</i>	89
(5)	<i>Module d'élasticité</i>	90
(6)	<i>Retrait de séchage</i>	91
(7)	<i>Résistance au gel/dégel</i>	92
(8)	<i>Perméabilité aux ions chlore</i>	93
(9)	<i>Perméabilité à l'eau</i>	94
(10)	<i>Résumé des performances des mélanges de rapport E/C 0,55</i>	97
5.2.3	<i>Bétons de rapport E/C de 0,55 à remplacement volumique</i>	99
(1)	<i>Essais sur béton à l'état frais</i>	100
(2)	<i>Résistance à la compression</i>	100
(3)	<i>Résistance à la traction indirecte</i>	101
(4)	<i>Perméabilité aux ions chlore</i>	102
(5)	<i>Résumé des performances des mélanges de rapport E/C 0,55 à remplacement volumique</i>	102
CHAPITRE 6	Conclusions et recommandations.....	103
ANNEXE – DONNÉES	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Illustration de la composition des classes de matériaux recyclés	4
Figure 2: Schématisation d'un granulats recyclés [Tam <i>et al.</i> , 2005]	5
Figure 3: Absorption d'un granulats recyclés en fonction du temps [Ferreira <i>et al.</i> , 2011]	7
Figure 4 : Zone de transition à l'interface granulats/pâte d'un béton recyclés	11
Figure 5 : Zone de transition à l'interface granulats/pâte d'un béton conventionnel [Otsuki <i>et al.</i> , 2003].....	11
Figure 6: Interaction de ces deux effets des granulats recyclés sur la carbonatation en fonction du taux de remplacement [JianZhuang <i>et al.</i> , 2012].....	25
Figure 7: Processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale	28
Figure 8: Observation au MEB d'une fissure du granulats recyclés d'un béton préparé avec la méthode de mélange double [Tam <i>et al.</i> , 2005]	29
Figure 9: Observation au MEB d'une fissure du granulats recyclés d'un béton préparé avec la méthode de mélange normale [Tam <i>et al.</i> , 2005].....	29
Figure 10: Principe de fonctionnement de la méthode de mélange en deux étapes	30
Figure 11: Méthode de malaxage pour la méthode de pré saturation.....	32
Figure 12: Programme expérimental	34
Figure 13: Courbe granulométrique du sable	37
Figure 14: Courbe granulométrique du gros granulats naturel 10-20 mm.....	38
Figure 15: courbe granulométrique gros granulats naturel 5-14 mm.....	39
Figure 16: Courbe granulométrique de la combinaison de gros granulats de béton.....	39
Figure 17: Courbe granulométrique des matériaux de classe MR-2 et MR-1	44
Figure 18: MR-2 après essai Los Angeles.....	46
Figure 19: Comparaison entre mesure de vitesse d'absorption remuée et non remuée	48
Figure 20: Comparaison de la vitesse d'absorption du MR-2 avec un granulats naturel	49
Figure 21: MR-2 après méthode de gel/dégel	52
Figure 22: Résistances à la compression des mélanges de rapport E/C de 0,65	57
Figure 23: Résistances à la compression des mélanges de rapport E/C de 0,55	58
Figure 24: Résistances à la compression des mélanges de rapport E/C de 0,55 (remplacement volumique).....	59
Figure 25: Résistances à la traction des mélanges de rapport E/C de 0,65	60
Figure 26: Résistances à la traction des mélanges de rapport E/C de 0,55	61
Figure 27: Résistances à la traction des mélanges de rapport E/C de 0,55 (remplacement volumique).....	62
Figure 28: Résistances à la flexion des mélanges de rapport E/C de 0,65	63
Figure 29: Résistances à la flexion des mélanges de rapport E/C de 0,55	64
Figure 30: Module d'élasticité des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55.....	66
Figure 31: Retrait de séchage des mélanges ayant un rapport E/C de 0,65.....	67
Figure 32: Retrait de séchage des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55.....	68
Figure 33: Facteur de durabilité des mélanges ayant un rapport E/C de 50%.....	70
Figure 34: Perméabilité aux ions chlorure de mélanges ayant un rapport E/C de 0,55	71
Figure 35: Perméabilité aux ions chlorure de mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 (remplacement volumique).....	72
Figure 36: Éprouvette de béton pour essai de perméabilité à l'eau	73

Figure 37: Montage expérimental de l'essai de perméabilité à l'eau	74
Figure 38: Éprouvette de béton R-0,65-50% suite à l'essai Brésilien	85
Figure 39: Prisme de béton R-0,65-50% suite à l'essai de résistance à la flexion	85
Figure 40: Résultats perméabilité à l'eau (20% 05-05-2013 #1).....	96
Figure 41: Résultats perméabilité à l'eau (20% 10-06-2013 #1).....	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition des classes de matériaux recyclés selon Transport Québec	3
Tableau 2: Composition chimique et propriétés physiques du ciment GU et du GUbFSF	36
Tableau 3: Granulométrie du sable.....	37
Tableau 4: Distribution granulométrique et propriété des gros granulats	38
Tableau 5: Composition et classification matériaux recyclés (INSPEC SOL, 2011)	40
Tableau 6: Caractéristiques complémentaires pour matériaux recyclés (INSPEC SOL, 2011)	40
Tableau 7: Analyse granulométrique sur matériaux recyclés (INSPEC SOL, 2011).....	41
Tableau 8: Séquence de malaxage.....	42
Tableau 9: Granulométrie du matériau de classe MR-2 après tamisage	43
Tableau 10 : Essai de masse volumique et absorption sur MR-2.....	45
Tableau 11: Proportions des mélanges de rapport E/C de 0,65.....	54
Tableau 12: Proportions des mélanges de rapport E/C de 0,55.....	55
Tableau 13: Proportions des mélanges de rapport E/C de 0,55 comparant le remplacement massique et volumique	56
Tableau 14: Perméabilité à l'eau des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55.....	75

CHAPITRE 1 Introduction

1.1 Mise en contexte et problématique

Le béton est le matériau de construction le plus communément utilisé dans la construction de structures de génie civil. Ces structures de génie civil ayant une durée de vie limitée et la disposition des rebus de démolition et de réparation des structures de génie civil représente un défi considérable. Au Canada, cet enjeu est particulièrement important, car une grande quantité de structures en béton construites lors des années 50 et 60 arrivent à la fin de leurs cycles de vie. La grande quantité de rebus de démolition générée par la réparation ou la reconstruction de ces structures devra être enfouis ou réutilisé dans lors de la prochaine décennie. La récupération et la réutilisation de ces matériaux sont donc un aspect très important de la gestion de ceux-ci, surtout lorsqu'on considère que la réglementation concernant les sites d'enfouissement est de plus en plus sévère et restrictive. Entre 2004 et 2008 on note une augmentation de 1,8 million de tonnes à 2,718 millions de tonnes de matériaux recyclés (asphalte, béton, brique et pierre) pour le Québec [Recy-Québec, 2008].

Un autre enjeu important auquel est confrontée l'industrie de la construction est la diminution des sources de granulats naturels près des grands centres urbains. Les granulats représentant en général 60 à 80% de la composition du béton de très grandes quantités sont donc nécessaires lors de la construction d'ouvrages de génie civil. La situation actuelle fait en sorte que les granulats utilisés pour la préparation de béton dans les grands centres urbains sont souvent transportés sur de plus longues distances, ce qui engendre des coûts élevés. Dans ce contexte, l'utilisation de granulats recyclés devient une alternative incontournable, tant au niveau économique qu'environnemental.

1.2 Définition et objectifs du projet de recherche

Le présent projet a comme objectif principal d'évaluer le potentiel d'utilisation des granulats recyclés dans des bétons de résistance moyenne destinés à la construction résidentielle. Il s'agit d'évaluer l'impact de différents taux de remplacement des granulats naturels par un granulats recyclés sur les propriétés du béton durci. Les bétons destinés à la construction résidentielle ont été ciblés dans le cadre de cette étude puisque ceux-ci représentent un grand volume des bétons confectionnés dans l'industrie de la construction et donc un grand potentiel de valorisation des granulats recyclés. Un autre aspect important de cette décision est que les granulats recyclés semblent avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques du béton, celui-ci est minime pour les bétons de rapport eau/liants élevés [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. Les bétons résidentiels, pouvant avoir des rapports E/L jusqu'à 0,7 selon la norme CSA A23.1 permettraient possiblement d'utiliser des grandes quantités de granulats recyclés tout en minimisant l'impact négatif de ceux-ci. Ce projet de maîtrise a été réalisé au laboratoire de matériaux de la faculté de génie civil de l'Université de Sherbrooke, sous la supervision du professeur Ammar Yahia.

1.3 Organisation du mémoire

Le document se divise en cinq sections. Le chapitre suivant présente une revue de l'état de l'art sur les granulats recyclés et leur utilisation dans le béton. Le troisième chapitre présente le programme expérimental, les matériaux ainsi que les essais effectués pour chaque phase du projet. Le chapitre 4 présente, par la suite, les résultats obtenus dans les deux phases du projet. Le chapitre 5 consiste en une analyse des résultats présentés précédemment ainsi qu'une discussion. Finalement, les conclusions et recommandations du projet sont énoncées avant de terminer avec l'annexe et les références.

CHAPITRE 2 État de l’art

2.1 Granulat recyclé : définition

Dans le cadre de cette revue de littérature, il est nécessaire de bien définir le terme « granulat recyclé ». On entend par « granulat recyclé », un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Le terme « granulat recyclé » peut aussi être utilisé pour décrire un granulat provenant du retour de béton. Il y a, cependant, peu d’information disponible à ce sujet dans la littérature. Les granulats recyclés dont traite cette revue de littérature sont donc des granulats recyclés de démolition. Le terme granulats est utilisé dans ce document pour décrire la fraction grossière (5 mm à 20 mm) des granulats incorporés aux mélanges de béton puisque l’étude se concentre sur celle-ci.

Les matériaux granulaires ciblés par cette étude sont des granulats recyclés de type MR-1 et MR-2 selon la norme BNQ 2590-600/2002 qui présente la classification et les caractéristiques des matériaux recyclés [NQ 2590-600/2002].

Ces granulats sont composés majoritairement de résidus provenant du concassage du béton de ciment et peuvent contenir une faible teneur en enrobé bitumineux. Les classes de matériaux recyclés MR-1 et MR-2 sont aussi celles dont l’utilisation est permise par la norme BNQ 2621-600 et, sous certaines conditions, par la Ville de Montréal en tant que remblais de sous-fondation [Ville de Montréal, Service des infrastructures, 2008]. Le Tableau 1, tirée du bulletin d’information technique émis par la Direction du laboratoire des chaussées de Transports Québec, indique les proportions de béton de ciment (b.c.), d’enrobé bitumineux (béton bitumineux, b.b.) et de granulats naturels (g.c.) à respecter pour chaque classe de granulats recyclés.

Tableau 1: Composition des classes de matériaux recyclés selon NQ 2590-600
[NQ 2590-600/2002]

Classes	MR-1	MR-2	MR-3	MR-4	MR-5	MR-6	MR-7
% b.c.	≤ 50 %	> 50 %	≤ 30 %	> 30 %	< 65 %	< 50 %	< 15 %
% b.b.	≤ 15 %	≤ 15 %	15 - 35 %	15 - 35 %	35 - 50 %	50 - 85 %	> 85 %
% g.c.	≥ 35 %	< 50 %	35 - 85 %	< 55 %	< 65 %	< 50 %	< 15 %

La Figure 1 illustre la composition des différentes classes de granulats recyclés en fonction de leurs teneurs en enrobé bitumineux, béton de ciment et granulat naturel. Cette figure est aussi tirée du même bulletin d'information technique de Transport Québec.

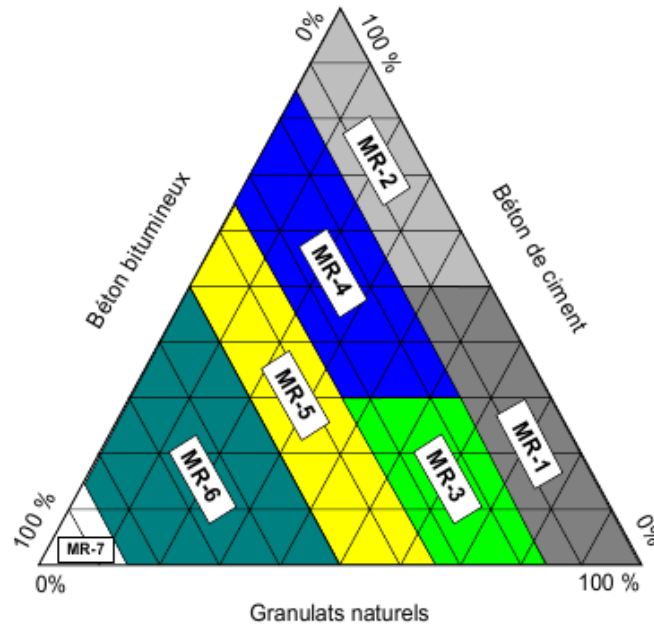


Figure 1: Illustration de la composition des classes de matériaux recyclés
[NQ 2590-600/2002]

2.2 Description du granulat recyclé

Les granulats recyclés sont formés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine [Fathifazl *et al.*, 2009]. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [Etxeberria *et al.*, 2007]. La teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat recyclé. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La configuration du granulat recyclé est illustrée sur la Figure 2.

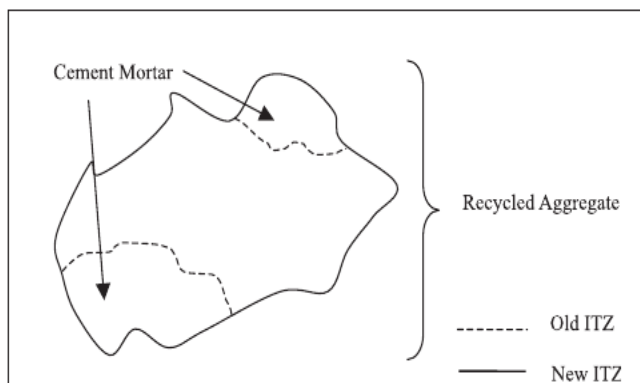


Figure 2: Schématisation d'un granulat recyclé [Tam *et al.*, 2005]

2.3 Propriétés du granulat recyclé

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

2.3.1 Distribution granulométrique

Les granulats recyclés ont souvent plus de particules fines que les granulats naturels [Chakradhara Rao *et al.*, 2011]. Cependant, on ne peut pas généraliser cette caractéristique puisqu'elle varie beaucoup en fonction du type de granulat recyclé utilisé et du type de granulat naturel auquel on le compare.

2.3.2 Masse volumique

La densité relative du granulat recyclé est moins grande que celle du granulat naturel [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; de Juan et Gutierrez, 2009; Fathifazl *et al.*, 2009; Padmini *et al.*, 2009; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. La littérature à ce sujet indique que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m³) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m³). La masse volumique plus faible du granulat recyclé est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle du granulat original et diminue par conséquent la masse volumique totale du granulat recyclé [Chakradhara Rao *et al.*, 2011].

Cette réduction en densité est fonction de la teneur en mortier résiduel [de Juan et Gutierrez, 2009].

2.3.3 Absorption

Les études réalisées sur les granulats recyclés ont relevé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grande pour les granulats recyclés que les granulats naturels [Butler *et al.*, 2011; Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Fathifazl *et al.*, 2009; Levy et Helene, 2004; Malesev *et al.*, 2010; Padmini *et al.*, 2009; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001; Tarn *et al.*, 2008]. Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre le granulat recyclé et le granulat naturel [Padmini *et al.*, 2009]. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour un granulat naturel celles-ci sont souvent en deçà de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [Tarn *et al.*, 2008].

La mesure de l'absorption d'un granulat recyclé est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci. Comme l'absorption du granulat est due en grande partie au mortier résiduel, une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier résiduel [Tam *et al.*, 2005] et par le fait même, un impact plus important sur les propriétés du béton préparé avec ce granulat. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption du granulat recyclé est beaucoup plus grande que celle du granulat naturel, la quantité d'eau que celui-ci contient à l'état saturé est largement supérieure. Une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport E/L.

Une autre problématique peut se présenter lors de l'utilisation du granulat recyclé asséché. Comme une plus grande absorption se fait dans les 30 premières minutes pour un granulat recyclé [Malesev *et al.*, 2010], l'utilisation de ce granulat à l'état sec peut affecter négativement les propriétés rhéologiques du béton frais. Étant donné que les granulats secs absorbent une partie, de l'eau présente dans le béton frais, il peut être nécessaire d'ajouter jusqu'à 10 % de l'eau totale pour obtenir le même affaissement. Ceci peut affecter négativement les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton [Malesev *et al.*, 2010].

La Figure 3 présente l'absorption d'un granulat recyclé durant les 30 premières minutes.

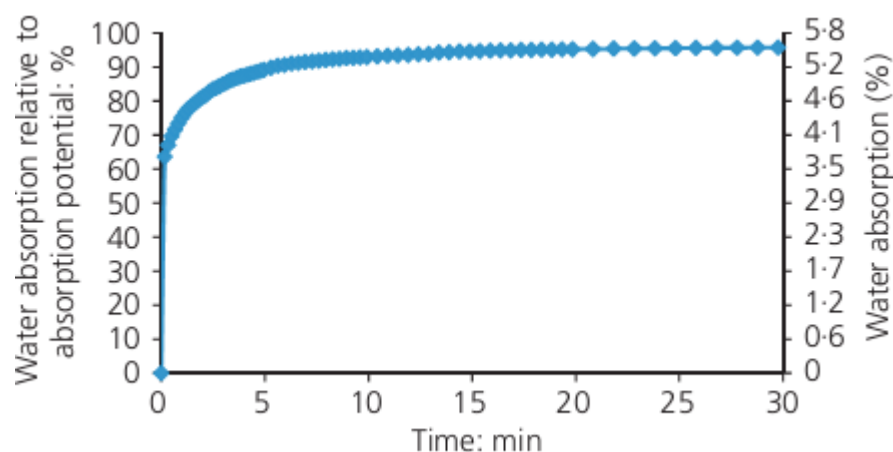


Figure 3: Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [Ferreira *et al.*, 2011]

Ce graphique démontre que la plus grande partie d'eau absorbée par le granulat se fait dans les 30 premières minutes comme l'a avancé Malesev [Malesev *et al.*, 2010]. On remarque aussi une absorption très élevée même après seulement 5 minutes (89,2 %). La vitesse de cette absorption diminue significativement par la suite. Il est donc estimé que 90 % du potentiel d'absorption du granulat s'effectue lors des 5 premières minutes [Ferreira *et al.*, 2011].

2.3.4 Résistance à l'abrasion

Lors de l'essai de résistance à l'abrasion Los Angeles, tout le mortier résiduel lié au granulat d'origine se détache de celui-ci sous l'effet de l'abrasion [de Juan et Gutierrez, 2009]. On observe ainsi une grande perte de masse pour le granulat recyclé ce qui explique des coefficients Los Angeles plus élevés que ceux généralement relevés pour des granulats naturels [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009; Padmini *et al.*, 2009; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001; Tabsh et Abdelfatah, 2009]. La résistance à l'abrasion est donc directement reliée à la résistance à la teneur en mortier résiduel [de Juan et Gutierrez, 2009].

2.3.5 Teneur en mortier résiduel

La teneur en mortier résiduel est le facteur le plus important pour déterminer la qualité d'un granulat recyclé puisque ses autres propriétés sont liées étroitement à celle-ci. Cette valeur peut varier beaucoup selon le granulat et la méthode utilisée pour la mesurer (20 % à 55 %

[Butler *et al.*, 2011] et 25 à 70 % [de Juan et Gutierrez, 2009]). Comme les autres propriétés du granulat sont directement liées à la teneur en mortier résiduel, il est important de mesurer celle-ci précisément. Trois techniques sont proposées dans la littérature : la méthode de la dissolution dans l'acide nitrique, la méthode du gel/dégel et la méthode de l'expansion thermique [Butler *et al.*, 2011].

La méthode de la dissolution dans l'acide nitrique consiste à plonger le granulat recyclé dans une solution diluée d'acide nitrique. On chauffe, par la suite, la solution pendant deux heures pour permettre au mortier de se dissoudre. Cependant, cette technique n'est pas adaptée aux granulats recyclés d'origine calcaire [Butler *et al.*, 2011]. La sensibilité de ceux-ci à l'acide utilisé peut faire en sorte que le granulat d'origine se désagrège en plus du mortier, faussant les résultats.

La méthode du gel/dégel consiste à plonger le granulat dans une solution de sulfate de sodium et de lui faire subir 5 cycles journaliers de gel/dégel. Cette méthode a été adaptée par Abbas [Abbas *et al.*, 2008] à partir des essais «Standart Test Method for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate» ASTM C88-05 et «Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing», ASTM C666-03. Ces cycles sont formés d'une période de 16 heures à -17°C et d'une autre période de 8 heures dans un four à 80°C [Fathifazl *et al.*, 2009]. Cette méthode utilise une combinaison d'attaque chimique et de contraintes mécaniques induites par le gel pour détacher le mortier du granulat originel.

La méthode de l'expansion thermique consiste à appliquer un gradient de température élevée au granulat afin de rendre le mortier résiduel friable. Pour ce faire, le granulat est saturé d'eau et chauffé dans un four à 500°C pendant 2 heures. Suite à l'application de la température, on plonge le granulat rapidement dans l'eau froide pour le fragiliser.

Ces méthodes ont pour but de détacher le mortier résiduel du granulat original afin de déterminer la perte de masse associée à l'élimination du mortier résiduel. La méthode de l'expansion thermique semble être la plus efficace pour détacher le mortier du granulat [Butler *et al.*, 2011]. En effet, selon cette étude, près de 100% du mortier résiduel est détaché

du granulat recyclé en utilisant cette technique. La méthode du gel/dégel est moins efficace puisqu'elle ne détache que 80 à 90% du mortier résiduel. La méthode de la dissolution dans l'acide nitrique est la moins efficace des 3 méthodes, bien qu'il y ait une certaine perte de masse, il reste beaucoup de mortier attaché au granulat [Butler *et al.*, 2011]. La méthode de l'expansion thermique a aussi l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre que la méthode de gel/dégel [de Juan et Gutierrez, 2009].

2.4 Impact du remplacement du granulat naturel

Plusieurs propriétés du béton sont affectées par le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé. L'effet sur les propriétés du béton de ce remplacement dépend de plusieurs facteurs et peut être complexe à évaluer. En effet, les études effectuées sur les propriétés des bétons recyclés varient beaucoup tant au niveau des variables évaluées, de la formulation des mélanges, du type de liant utilisé ainsi que du type de granulats recyclés. Les facteurs affectant les propriétés du béton recyclé sont notamment : les types de liants utilisés, la source des granulats recyclés, le taux de remplacement, le rapport eau/ciment ou eau/liant et la teneur en eau des granulats [Rao *et al.*, 2007].

2.5 Propriétés à l'état frais

Il apparaît généralement que l'utilisation de granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton contenant un granulat naturel pour un même rapport E/C [Butler *et al.*, 2011; Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009]. Cette baisse de l'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, selon Butler, on observe aussi une augmentation de 3,1 à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation de granulats recyclés, pour garantir un affaissement égal. Ceci peut être dû au fait que les granulats recyclés ont une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton [Butler *et al.*, 2011].

La grande absorption des granulats recyclés peut affecter la maniabilité ainsi que le rapport E/C effectif des bétons incorporant ceux-ci puisque les granulats non saturés peuvent absorber l'eau du mélange lors du malaxage [Butler *et al.*, 2011]. Il reste donc moins d'eau libre

pouvant servir à lubrifier les composantes du béton, diminuant par le fait même son affaissement.

Il est, cependant, possible d'atteindre le même affaissement après un certain temps si l'on ajoute l'eau nécessaire à remplir la porosité du granulat recyclé selon Malesev [Malesev *et al.*, 2010]. Cet auteur rapporte que, pour un béton de rapport E/C de 0,5, l'affaissement reste sensiblement le même si les granulats sont à l'état saturé et surface sèche (SSS), peu importe le type de granulats. Il est aussi possible d'obtenir le même affaissement en faisant varier le rapport E/C du béton. Dans le cas de rapport E/C élevé (0,7 dans le cas de l'étude de Sagoe-Crentsil), on observe le même affaissement pour le béton témoin et le béton contenant les granulats recyclés [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001].

La masse volumique à l'état frais est plus faible pour béton avec les granulats recyclés. Cela serait dû à la plus grande proportion de « mortier total » dans le béton avec granulats recyclés que le béton avec granulats naturels [Fathifazl *et al.*, 2009]. La teneur en air entraînée ne semble pas être affectée par l'utilisation d'un granulat recyclé [Malesev *et al.*, 2010; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001].

2.6 Zone de transition à l'interface granulat/pâte

Le béton est un système en trois phases comprenant le granulat grossier, la matrice de mortier contenant le granulat fin et la zone de transition à l'interface granulat-pâte [Tam *et al.*, 2005]. Bien que la zone de transition à l'interface granulat-pâte soit relativement étroite, elle occupe une proportion relativement grande du volume de la pâte de ciment. Pour une zone de transition de 40 μm d'épaisseur, ce volume se situe entre 20 % et 40 % du volume de la matrice cimentaire [Tam *et al.*, 2005].

Cette zone de transition a beaucoup d'influence sur les propriétés du béton. La zone de transition est généralement le maillon faible et la source de faiblesse pour le béton [Mehta et Monterio, 1986]. Pour cette raison, la zone de transition est généralement la raison pour laquelle il y a rupture du béton à des contraintes inférieures à la résistance individuelle de ses deux composantes (matrice de mortier et granulat grossier).

La zone de transition à l'interface granulat-pâte sert de lien entre la matrice de mortier et le gros granulat. Ce lien entre les deux composantes majeures a un impact critique sur les propriétés mécaniques du béton [Tam *et al.*, 2005]. Même lorsque la résistance de ces deux composantes est élevée, la résistance du béton peut être basse à cause de défauts dans le lien entre les granulats et la pâte (par exemple : vides et microfissures dans la zone de transition), qui ne permettent pas de transférer les efforts [Mehta et Monterio, 1986]. Il est donc pertinent de considérer l'interface granulat-pâte lorsqu'on évalue la résistance mécanique et la durabilité du béton.

La particularité des bétons recyclés est que ceux-ci ont deux zones de transition distinctes, contrairement aux bétons conventionnels qui n'ont qu'une zone de transition. La première zone de transition est à l'interface granulat d'origine-mortier résiduel et la seconde est à l'interface mortier résiduel-nouveau mortier [Otsuki *et al.*, 2003]. Les Figure 4 et Figure 5 ci-dessous illustrent bien cette différence :

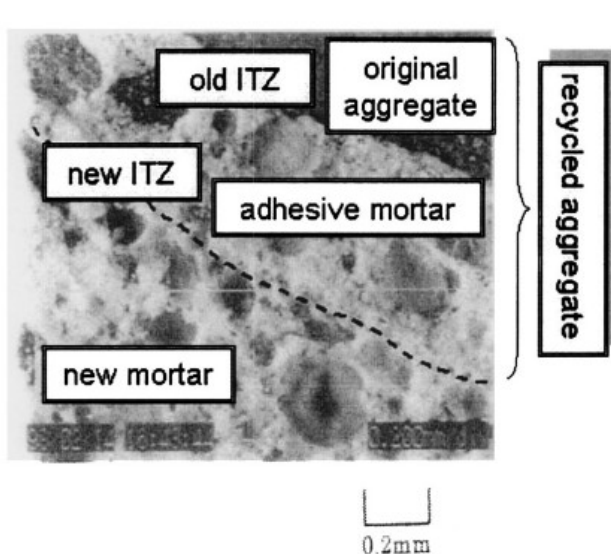


Figure 4 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton recyclé
[Otsuki *et al.*, 2003]

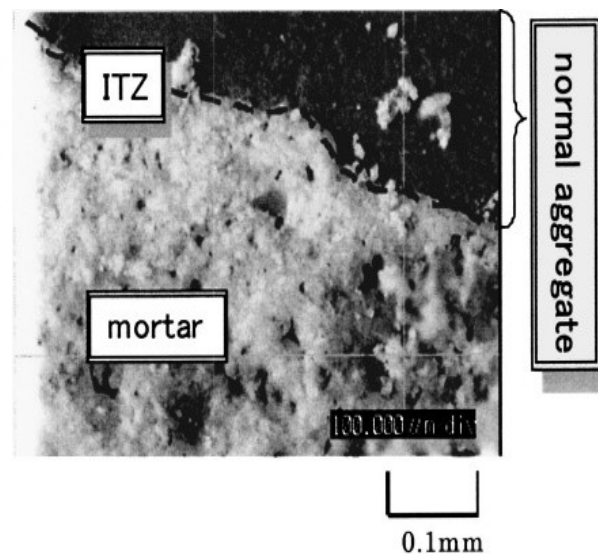


Figure 5 : Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton conventionnel
[Otsuki *et al.*, 2003]

La microdureté Vickers de la nouvelle zone de transition augmente lorsque le rapport E/L diminue pour les bétons incorporant des granulats recyclés ainsi que pour les bétons contenant des granulats naturels. La microdureté Vickers de la vieille zone de transition est quant à elle contrôlée par la qualité du mortier résiduel. La quantité de mortier attaché au granulat recyclé

ne semble pas avoir d'impact sur la microdureté Vickers de la vieille zone de transition [Otsuki *et al.*, 2003].

2.7 Propriétés mécaniques

2.7.1 Facteurs affectant les propriétés mécaniques

(1) Rapport E/C

Le rapport E/C est un des facteurs de formulation les plus importants pour les bétons en général. Il existe une grande corrélation entre le rapport E/C et la résistance finale du béton. Il semble que l'impact négatif du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé augmente quand le rapport E/C diminue. La perte de résistance causée par l'utilisation d'un granulat recyclé est fonction de la résistance finale du béton et par le fait même de son rapport E/C. À cet effet, il est recommandé d'utiliser des granulats recyclés dans les bétons à résistance « moyenne » (20 à 40 MPa) puisque l'obtention de résistance plus élevée nécessite un apport en ciment plus grand et, par le fait même, des coûts plus élevés [Etxeberria *et al.*, 2007]. Une étude de Sagoe-Crentsil montre que la résistance à 28 jours est la même pour le béton à granulat recyclé que pour le béton témoin pour un rapport E/C élevé (0,7) [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. D'autres études réalisées avec des rapports E/C inférieurs à 0,7 ont trouvé une baisse des résistances de 10 % [de Oliveira et Vazquez, 1996; Rahal, 2007] ou même plus [Etxeberria *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2011] dans les bétons incorporants des granulats recyclés par rapport aux bétons témoins.

Il est aussi intéressant de noter que pour un rapport E/C total constant et lorsque le granulat recyclé n'est pas pré-saturé lors de la formulation, il est possible que la grande absorption des granulats recyclés diminue le rapport E/C effectif et, par conséquent, compense pour l'impact négatif des granulats recyclés sur la résistance à la compression [Lopez-Gayarre *et al.*, 2009]. Ceci peut cependant avoir un effet négatif sur l'affaissement.

(2) Qualité et teneur en mortier

La qualité du mortier résiduel attaché au granulat recyclé a un impact important sur la résistance du béton formulé avec celui-ci. L'impact de la qualité du mortier résiduel sur la

résistance à la compression du béton vient du fait que la qualité du mortier contrôle la microdureté Vickers de la vieille interface granulat-pâte. Or, il a été démontré que plus la microdureté Vickers de la vieille interface augmente, plus la résistance à la compression du béton augmente [Otsuki *et al.*, 2003]. Ceci est généralement vrai pour les bétons ayant un rapport E/C relativement faible puisque dans ce cas, la vieille interface est moins résistante que la nouvelle interface formée entre le gros granulat et le mortier. Pour des rapports E/C plus élevé (0,55 dans le cas de l'étude de Otsuki), l'impact de la qualité du mortier résiduel diminue puisque pour ces rapports E/C la nouvelle interface est plus faible que la vieille interface. La qualité du mortier résiduel a donc peu d'impact dans un béton proportionné avec un rapport E/C plus élevé car c'est la nouvelle interface qui contrôle la résistance.

Des observations similaires ont été relevées par Peng [Gai-Fei Peng *et al.*, 2013] qui a observé que pour un granulat recyclé provenant d'un béton à faible rapport E/C (0,255) les résistances mécaniques étaient contrôlées par les défauts dans le granulat original alors que dans le cas de granulats provenant de bétons à rapport E/C plus élevés (0,586), le mortier résiduel contrôle les résistances mécaniques obtenues.

Comme mentionnées précédemment, la qualité et la teneur en mortier résiduel ont un grand impact sur plusieurs propriétés du granulat recyclé, dont l'absorption. Une comparaison a été effectuée par Yang, H-K entre des bétons utilisant deux types de granulats recyclés dont la différence majeure est leurs absorptions. Il a observé que les bétons incorporant le granulat ayant une absorption plus faible (1,9 %) ont une résistance à la compression similaire au béton témoin. L'utilisation du granulat ayant une plus grande absorption (6,2 %), affecte par contre négativement la résistance à la compression du béton. On a observé des résistances de 20 à 40% inférieures des bétons utilisant ces granulats par rapport au béton témoin pour un rapport E/C de 0,5 [Yang *et al.*, 2008].

(3) *Granulométrie du granulat recyclé*

On observe une diminution de la résistance du béton variant entre 10 à 35% en fonction de la grosseur des granulats recyclés. Plus la taille maximale de ces granulats est petite plus grande

est la réduction de résistance observée [Padmini *et al.*, 2009]. Il peut donc être nécessaire de diminuer le rapport E/C pour maintenir la même résistance à la compression.

(4) *Méthode de préparation et teneur en eau du granulat*

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

Par exemple, Butler a observé une augmentation des résistances à la compression de 28% et 8% par rapport au granulat naturel pour des bétons de 30 et 50 MPa respectivement en utilisant des granulats pré saturés pendant 24 heures [Butler *et al.*, 2011]. Il obtient donc d'excellents résultats avec un granulat saturé à 100% alors que d'autres chercheurs conseillent une saturation de 90% du granulat [Etxeberria *et al.*, 2007; Ferreira *et al.*, 2011]. Selon ces chercheurs, un granulat saturé à 100% a plus de chance de causer des saignements et, par le fait même, une diminution des propriétés du béton. De Oliveira et Vazquez ont quant à eux observé qu'il n'y avait pas de variation significative entre les bétons utilisant des granulats recyclés à des teneurs en eau variables pour un béton de rapport E/C de 0,5 [de Oliveira et Vazquez, 1996].

Une des méthodes de formulation de bétons à granulats recyclés est la « méthode du mélange en deux étapes » [Tam *et al.*, 2006; Tam et Tam, 2007; Tam *et al.*, 2005; Tam *et al.*, 2007]. Cette méthode a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton en améliorant la qualité de l'interface granulat/pâte. Une autre méthode de formulation du béton recyclé est la « méthode du mortier équivalent » [Fathifazl *et al.*, 2009; Fathifazl *et al.*, 2010]. Cette méthode cherche à diminuer l'apport en ciment au béton en considérant le mortier résiduel attaché au granulat recyclé comme faisant partie du « mortier total » du béton. Ces

deux méthodes et leurs impacts sur les propriétés du béton sont discutés plus en détail dans la section « Formulation des bétons contenant des granulats recyclés » du présent rapport.

(5) *Impact de l'utilisation des ajouts cimentaires*

Les ajouts cimentaires sont des sous-produits de différentes industries qui sont utilisés en supplément ou en remplacement partiel du ciment. Ces ajouts cimentaires peuvent servir à améliorer certaines propriétés des bétons [Kosmatka, Steven H. et autres, 2004]. Dans le cadre de cette revue de littérature, l'impact de l'utilisation de 3 types d'ajouts cimentaires dans les bétons recyclés sera présenté. Il s'agit des cendres volantes, des laitiers et de la fumée de silice.

(a) *Cendres volantes*

Le remplacement d'une fraction du ciment par des cendres volantes cause une diminution de la résistance à 28 jours. Il y a par contre un développement de gain plus grand de 28 à 90 jours dû à l'effet pouzzolanique des cendres volantes [Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008]. Il est par contre à noter que dans certain cas, l'utilisation de cendres volantes ne permet pas d'obtenir des résistances équivalentes avant un âge avancé. Dans le cas de l'étude de Kou, [Kou et Poon, 2012], seul un mélange utilisant des cendres volantes a présenté des résistances supérieures aux mélanges équivalents utilisant un ciment conventionnel, et ce, seulement à 90 jours.

Il est possible de réduire l'impact négatif des granulats recyclés sur la résistance à la compression et le module d'élasticité en ajoutant des cendres volantes au mélange (réduction du rapport E/L) [Kou *et al.*, 2008; Kou et Poon, 2006]. Un remplacement massique de 25% du ciment par des cendres volantes permet d'obtenir une meilleure résistance à la pénétration des ions chlore et de diminuer la perméabilité du béton recyclé [Kou et Poon, 2006]. Selon Kou, [Kou et Poon, 2012], les cendres volantes contribuent aussi à diminuer le retrait de séchage dans les bétons utilisant un granulat recyclé. L'auteur explique cette observation par un « effet de dilution » causé par la présence des cendres volantes.

(b) *Laitiers*

Le remplacement de 35% du ciment dans le béton recyclé par un laitier de haut fourneau cause une légère augmentation de la résistance à long terme. Un meilleur gain de résistance entre 7 et 28 jours a aussi été observé pour le béton contenant du laitier [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. Le remplacement de 65% du ciment par un laitier de haut fourneau permet de compenser la perte de résistance à la compression due à l'utilisation de granulats recyclés. La résistance en tension du béton recyclé contenant le laitier reste, par contre, moins grande que le béton témoin [Ann *et al.*, 2008]. Le remplacement de 65% du ciment par le laitier améliore la résistance à la pénétration des ions chlore du béton [Ann *et al.*, 2008].

(c) *Fumée de silice*

L'ajout de 8% de fumée de silice est bénéfique pour la résistance à la compression et à la traction du béton recyclé. La résistance à la compression du béton recyclé contenant la fumée de silice était similaire à celle des bétons conventionnels contenant cet ajout cimentaire [Gonzalez-Fonteboa et Martinez-Abella, 2008]. L'ajout de fumée de silice ne semble par contre pas avoir d'impact sur le module d'élasticité du béton recyclé [Gonzalez-Fonteboa et Martinez-Abella, 2008]. L'utilisation de la fumée de silice dans le cadre de la « méthode du mélange en deux étapes » permet d'obtenir une interface granulat-pâte plus dense et en remplissant les pores et les fissures du granulat recyclé avec la fumée de silice [Tam et Tam, 2008]. Cette amélioration permet d'obtenir des résistances à la compression plus élevées et une meilleure durabilité.

(6) *Taux de remplacement*

Le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé a un impact très important sur les propriétés du béton recyclé. Bien que l'impact pour un taux de remplacement de 100% varie beaucoup en fonction des mélanges et des études, il est clair que l'impact sur les propriétés du béton est fonction du taux de remplacement. L'impact du remplacement de 50% des granulats naturel sera donc presque toujours moindre que lors du remplacement de 100% de ceux-ci.

Bien qu'un taux de remplacement de 100% du granulat naturel ait dans la plupart des cas un impact négatif sur la résistance à la compression et certaines autres propriétés du béton, il semble exister un taux de remplacement pour lequel l'utilisation de granulats recyclés n'a pas d'impact négatif observable. Pour ce taux de remplacement, il n'y a pas d'impact significatif lors du remplacement d'une portion du granulat naturel par un granulat recyclé. La valeur de ce taux de remplacement varie, par contre, beaucoup d'étude en étude en fonction des formules de mélanges et des paramètres analysés. Les valeurs de remplacement généralement proposées dans la littérature se situent entre 20 et 50% [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Corinaldesi, 2010; Etxeberria *et al.*, 2007; Rao *et al.*, 2007; Tam *et al.*, 2006; Tam *et al.*, 2007].

2.7.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un béton est un des paramètres fondamentaux employés pour évaluer la qualité d'un béton. La résistance à la compression est souvent considérée comme la propriété la plus importante du béton pour plusieurs raisons [Fathifazl, 2007] :

- La résistance à la compression est généralement un bon indicateur de la qualité du béton, car elle est directement reliée aux propriétés de la pâte de ciment hydratée.
- La résistance à la compression est un élément essentiel de la conception structural et est généralement requise pour assurer la conformité.
- Plusieurs autres propriétés du béton, telle la résistance en tension, à la flexion et le module d'élasticité, sont directement reliés à la résistance à la compression.

Cette propriété est aussi la plus étudiée dans le cas des bétons incorporant des granulats recyclés. On définit celle-ci comme la contrainte maximale que peut subir une éprouvette de béton avant sa rupture. L'impact du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé sur la résistance à la compression du béton est, comme pour les autres propriétés du béton, fonction du taux de remplacement.

Il est généralement reconnu que pour une formulation traditionnelle du béton et un taux de remplacement de 100 % du granulat naturel, on observe une diminution de la résistance à la compression. Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10 % de la résistance à 28

jours du béton dans ce cas [de Oliveira et Vazquez, 1996; Rahal, 2007]. Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Par exemple, selon les résultats de Etxeberria, la résistance à 28 jours serait de 20 à 25% plus faible [Etxeberria *et al.*, 2007], de 33% et 23% selon Topcu [Topcu et Sengel, 2004], de 22% selon Kou [Kou *et al.*, 2011], de 20 à 30% selon Martinez-Lage [Martinez-Lage *et al.*, 2012] alors que selon Sagoe-Cretnsil la résistance à 28 jours serait la même que pour le béton témoin [Sagoe-Cretnsil *et al.*, 2001]. Il est, cependant, à noter que dans le cas de l'étude de Sagoe-Cretnsil, un rapport E/C très élevé (0,7) a été utilisé. Ces résultats divers peuvent être expliqués par le fait que le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés.

2.7.3 Résistance à la traction

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer la qualité des bétons. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction indirecte aussi appelée essai brésilien ou par fendage. Bien que les bétons ne sont généralement pas conçus pour résister à la traction directe, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe [Fathifazl, 2007]. Il semble généralement que la baisse de résistance associée au remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé dans le béton soit de 10% [Kou *et al.*, 2011], 10 à 15% dans le cas de Tabsh et Abdelfatah [Tabsh et Abdelfatah, 2009].

Comme plusieurs autres propriétés du béton, on observe que la résistance à la traction du béton diminue lorsque le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé augmente [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008; Rao *et al.*, 2007]. Yang a aussi trouvé qu'en plus de varier en fonction du taux de remplacement du granulat naturel, la résistance à la traction diminue quand la porosité augmente. Dans cette étude, l'impact du remplacement de deux granulats recyclés à porosité différentes a été évalué. Il a été observé que la résistance à la traction était moins grande pour le béton utilisant un granulat recyclé très poreux que pour un granulat recyclé peu poreux [Yang *et al.*, 2008]. Selon, Abd Elhakram [Abd Elhakam *et al.*, 2012], le remplacement d'un granulat naturel par un granulat

recyclé aurait un plus grand impact négatif sur la résistance à la traction des bétons recyclés que sur la résistance à la compression.

2.7.4 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est une mesure de la résistance à la déformation du béton. Celle-ci est mesurée en chargeant une poutre simple de béton aux deux tiers. Selon Chakradhara [Chakradhara Rao *et al.*, 2011], la résistance à la flexion semble peu affectée par le taux de remplacement. En effet, on observe une variation minime dans la résistance à la flexion du béton témoin et du béton ayant un taux de remplacement de 100%. Selon, de Oliveira et Vasquez, une perte de résistance à la flexion de l'ordre de 10% est associée au remplacement du granulats naturel dans un béton de rapport E/C de 0,5. De moins bons résultats ont été observés pour un béton utilisant des granulats saturés par rapport aux granulats secs et aux granulats à 90% de saturation [de Oliveira et Vasquez, 1996]. Finalement, une perte de résistance à la flexion de 13% par rapport au béton témoin a été observée par Topcu [Topcu et Sengel, 2004].

2.7.5 Module d'élasticité

Le module d'élasticité ou module de Young est normalement représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte/déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée [Abbas, 2007]. La plupart des études effectuées sur ce sujet rapportent que le module d'élasticité diminue lorsque le taux de remplacement du granulats vierge par un granulats recyclés augmente [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Kou *et al.*, 2007; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009; Malesev *et al.*, 2010; Martinez-Lage *et al.*, 2012]. Pour un taux de remplacement du granulats de 100%, on observe des chutes variant de 28 % du module d'élasticité [Kou *et al.*, 2007], de 35% [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Rao *et al.*, 2007] de 30 à 40% [Martinez-Lage *et al.*, 2012] et de 44% [Baofan, 2013]. L'impact sur le module d'élasticité est donc moins grand pour un taux de remplacement plus bas. L'impact d'un bas taux de remplacement sur le module d'élasticité n'est pas la même pour toutes les études sur le sujet. Selon Lopez-Gayarre, il n'y a pas d'impact sur le module d'élasticité pour un taux de remplacement inférieur à 50% alors que selon Corinaldesi, la différence avec le béton témoin est de 15%

pour un taux de remplacement de 30% [Corinaldesi, 2010]. Une étude de Rahal présente par contre des résultats divergents. Selon cette étude [Rahal, 2007], on observe une perte de seulement 3% au niveau du module d'élasticité pour un béton recyclé de rapport E/C de 0,55 et de résistance entre 25 et 30 MPa. Finalement, selon Yang et al; le module d'élasticité diminue lorsque l'absorption du granulat recyclé utilisé augmente [Yang *et al.*, 2008].

2.7.6 Développement des résistances

En plus d'une différence au niveau de la résistance à 28 jours de béton incorporant des granulats recyclés, plusieurs chercheurs ont observé des différences au niveau du développement de la résistance de celui-ci par rapport au béton contenant des granulats naturels [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Corinaldesi et Moriconi, 2009; Etxeberria *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2011; Rahal, 2007; Rao *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2008]. Il n'y a, par contre, pas de consensus par rapport au mécanisme de gain de résistance des bétons recyclés et des résultats contradictoires sont présentés dans la littérature.

Certains chercheurs ont observé que les bétons ayant de hauts taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé ont des résistances à très jeune âge plus élevées que les bétons témoins [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Etxeberria *et al.*, 2007]. Selon Etxeberria, le mortier résiduel et l'angularité plus grande des granulats recyclés augmentent l'adhésion et l'imbrication entre le mortier et le granulat recyclé et, par le fait même, la résistance à très jeune âge. Selon ces mêmes auteurs [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Etxeberria *et al.*, 2007], il semble que le gain de résistance après 28 jours soit négligeable pour les bétons ayant un haut taux de remplacement du granulat naturel, alors que les bétons témoins ou ayant un bas taux de remplacement montrent une augmentation d'environ 10 % de résistance entre 28 et 90 jours [Chakradhara Rao *et al.*, 2011].

D'autres chercheurs ont observé le phénomène opposé [Baofan, 2013; Rahal, 2007; Rao *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2008]. Selon certains chercheurs, on observe un gain de résistance avant 28 jours plus lents du béton contenant des granulats recyclés par rapport au béton témoin. Ce gain de résistance serait, par contre, plus rapide que pour le béton témoin à long terme. L'étude effectuée par Rahal montre que les bétons témoins développe une plus grande partie

de leur résistance à 28 jours dans les 7 premiers jours par rapport au béton à granulats recyclés. Les bétons à granulats recyclés ont, par la suite, un gain de résistance plus rapide que les bétons témoins. Par exemple, les bétons à granulats recyclés ont en moyenne une résistance à 56 jours 7% plus élevée que leur résistance à 28 jours alors que cette différence est de 4% pour le béton à granulats témoin [Rahal, 2007]. Cet aspect a aussi été relevé dans l'étude de Yang qui a observé des résistances à la compression relatives à 1 et 3 jours plus basses pour les bétons à granulats recyclés que le béton témoin. Il a aussi observé que ces résistances relatives sont plus élevées pour le béton à granulats recyclés à 56 et 91 jours. Ce gain de résistance à long terme peut être expliqué par une hydratation du ciment non hydraté présent dans le mortier résiduel et par la présence d'eau absorbée dans le granulats qui aiderait à la cure interne du béton [Yang *et al.*, 2008]. Une autre explication pour le meilleur gain de résistance à long terme serait le fait que, comme les granulats recyclés ont une absorption élevée, il servirait de source interne d'eau et ainsi permettraient une meilleure hydratation à long terme [Baofan, 2013].

Selon une étude de Corinaldesi et Moriconi, le gain de résistance du béton contenant des granulats recyclés ralenti après 14 jours par rapport au béton témoin [Corinaldesi et Moriconi, 2009]. Ceci serait dû au fait que le granulats recyclés a des propriétés mécaniques plus faibles que le granulats naturel et son remplacement à un impact plus grand quand le nouveau mortier gagne en résistance. Le granulats recyclés représenterait donc un chemin préférentiel pour la rupture des échantillons de béton.

Une autre étude intéressante sur ce sujet est effectuée par Kou et al [S. Kou *et al.*, 2011]. Cette étude a évalué la résistance à la compression et à la traction d'échantillons de béton recyclés après 5 ans. Les résultats obtenus à 28 jours indiquent que la résistance à la compression et à la traction du béton recyclés sont respectivement 21,7% et 10% plus faible que le béton témoin. Il est intéressant de constater qu'après 5 ans cet écart diminue à 6,3% pour la résistance à la compression et est même inversé pour la résistance à la traction, l'échantillon de béton recyclés étant plus résistant. Selon l'auteur, ce gain plus grand en résistance à long terme pourrait être dû à la présence des granulats recyclés qui, suite à une hydratation continue, améliore la liaison entre la pâte et le vieux granulats recyclés.

2.7.7 Masse volumique à l'état durci

La densité du béton diminue en fonction du taux de remplacement [Chakradhara Rao *et al.*, 2011]. Cette baisse de densité est due en grande partie à la densité plus faible et à la plus grande porosité des granulats recyclés. Selon Fathifazl, cette baisse de masse volumique serait due à la plus grande teneur en mortier total (mortier résiduel + nouveau mortier) dans le béton avec granulat recyclé que le béton avec granulat naturel [Fathifazl *et al.*, 2009].

2.7.8 Résistance à l'abrasion du béton

Il semble que la résistance à l'abrasion des bétons recyclés soit légèrement plus faible que les bétons traditionnels. Selon Sangoe-Crentsil, cette diminution serait de l'ordre de 10% [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. Il y a, cependant, peu d'information disponible à ce sujet, des études supplémentaires seraient nécessaires pour statuer sur l'impact des granulats recyclés sur la résistance à l'abrasion du béton.

2.8 Propriétés liées à la durabilité des bétons recyclés

2.8.1 Retrait

Le retrait est une mesure du changement volumétrique du béton. Le béton se dilate avec l'accroissement de la teneur en eau et se contracte avec la perte d'humidité [Kosmatka, Steven H. et autres, 2004]. La contraction normalement observée lors du séchage est appelée retrait de séchage. Ce changement de volume peut causer de la fissuration. C'est un aspect important de la durabilité du béton.

Le retrait de séchage augmente avec le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé [Guo et Wang, 2012; Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008; Li, 2008; Malesev *et al.*, 2010; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001; Tam et Tam, 2007]. Le plus grand retrait causé par les granulats recyclés est particulièrement évident à jeune âge [Guo et Wang, 2012]. Il ne semble pas y avoir de différence significative entre 0 et 20% de remplacement [Tam et Tam, 2007]. Le retrait augmente de manière significative pour un taux de remplacement du granulat vierge par un granulat recyclé supérieur à 50% [Malesev *et al.*, 2010]. Deux facteurs sont responsables du plus grand retrait observé pour les granulats recyclés, soit la présence de

mortier résiduel et l'eau supplémentaire ajoutée pour remplir la porosité du granulat [Li, 2008].

Comme la déformation des échantillons de béton peut être influencée par l'absorption du granulat, l'utilisation d'un granulat recyclé causera généralement un plus grand retrait et fluage [Tam et Tam, 2007]. Ces plus grandes déformations peuvent être expliquées principalement par le fait que le granulat recyclé entrave moins le potentiel de déformation de la pâte de ciment [Tam et Tam, 2007]. De plus, le vieux mortier attaché aux granulats recyclés continue à subir un retrait dans le temps [Guo et Wang, 2012].

2.8.2 Résistance aux cycles de gel/dégel

La résistance aux cycles de gel/dégel est une caractéristique importante pour les bétons extérieurs dans un environnement nordique. Elle est liée à plusieurs autres propriétés du béton, notamment sa porosité, sa perméabilité et la structure de ses pores [Kosmatka, Steven H. et autres, 2004]. On étudie cette propriété en mesurant la perte de masse du béton après un nombre de cycles de gel/dégel selon les spécifications de la norme ASTM C666. Il existe peu d'études évaluant la résistance au gel/dégel des bétons à granulats recyclés. Les études sur ce sujet semblent par contre montrer que les bétons à granulats recyclés performant bien en ce qui a trait au gel/dégel.

Selon Li, la teneur en granulat recyclé n'a pratiquement aucun impact sur la résistance au gel/dégel du béton [Li, 2008], alors que selon Richardson, les bétons contenant des granulats recyclés sont plus résistants aux cycles de gel/dégel que les bétons témoins [Richardson *et al.*, 2011]. Le béton contenant des granulats recyclés est beaucoup plus durable que le béton témoin (différence de 68% au niveau de la perte de masse observée). Selon l'auteur, une partie de cette différence peut être expliquée par une variation de la qualité du granulat recyclé et par le fait qu'une méthode de cure différente a été utilisée pour le béton contenant des granulats recyclés [Richardson *et al.*, 2011].

Selon Gokce et al, les bétons incorporants des granulats recyclés provenant de béton contenant de l'air entraîné sont résistants aux cycles de gel/dégel, même légèrement supérieur

au béton témoin [Gokce *et al.*, 2011]. Les bétons utilisant des granulats recyclés ne contenant pas d'air entraîné présentent, par contre, de mauvaises performances, même si la teneur en air du nouveau béton est acceptable.

La teneur en eau des granulats recyclés est particulièrement importante pour la résistance aux cycles de gel/dégel. Les granulats secs et saturés présentent de moins bonnes performances que les granulats semi-saturés (90%) [de Oliveira et Vazquez, 1996]. Selon De Oliveira, la meilleure performance du béton utilisant les granulats semi-saturés peut s'expliquer par le fait que l'interface granulat/pâte est plus résistante et dense dans ces conditions.

2.8.3 Carbonatation

Le béton durci réagit avec le gaz carbonique de l'air causant un certain retrait. Cette réaction appelée carbonatation ne détruit pas le béton, mais peut réduire le pH du béton, rendant celui-ci plus susceptible à des phénomènes comme la corrosion de barres d'armature [Kosmatka, Steven H. et autres, 2004]. Il est donc pertinent de considérer la carbonatation lorsqu'on évalue la durabilité d'un béton.

Il ne semble pas y avoir de consensus dans la littérature par rapport à la résistance à la carbonatation des bétons contenant des granulats recyclés. Selon Sagoe-Crentsil, l'utilisation de granulat recyclé a peu d'impact significatif sur la résistance à la carbonatation du béton [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. Le peu d'impact de l'utilisation de granulats recyclés observé dans cette étude peut être causé par le fait que le béton analysé dans cette étude a un rapport E/C très élevé.

Selon Li et al., la résistance à la carbonatation diminue avec l'augmentation du taux de remplacement [Li, 2008]. Selon Levy et Helene, la profondeur de carbonatation diminue avec le remplacement du granulat naturel pour un granulat recyclé à résistance à la compression constante [Levy et Helene, 2004]. Cette diminution est, par contre, plus grande pour des taux de remplacement de 20% et 50% que pour un taux de remplacement de 100% [Levy et Helene, 2004]. La meilleure performance des bétons contenant des granulats recyclés peut être expliquée par le fait que ceux-ci ont un contenu en ciment plus élevé. Finalement, selon

Xiao [JianZhuang *et al.*, 2012], les granulats recyclés ont deux effets principaux sur la carbonatation du béton. En premier lieu, la grande porosité des granulats recyclés fait en sorte que le béton dans lequel ils sont utilisés est plus poreux, ce qui entraîne une réduction de la résistance à la carbonatation du béton. D'un autre côté, les granulats recyclés peuvent avoir une plus grande teneur en liant grâce au mortier résiduel. Ceci fait en sorte que le béton a une plus grande réserve d'alcalis, ce qui entraîne une plus grande résistance à la carbonatation [JianZhuang *et al.*, 2012]. L'auteur trouve donc que lorsque le taux de remplacement est inférieur à 70% la profondeur de carbonatation augmente avec le taux de remplacement. Cette tendance s'inverse, par contre, pour des taux de remplacement supérieurs à 70%. La Figure 6 illustre l'interaction de ces deux effets des granulats recyclés sur la carbonatation en fonction du taux de remplacement.

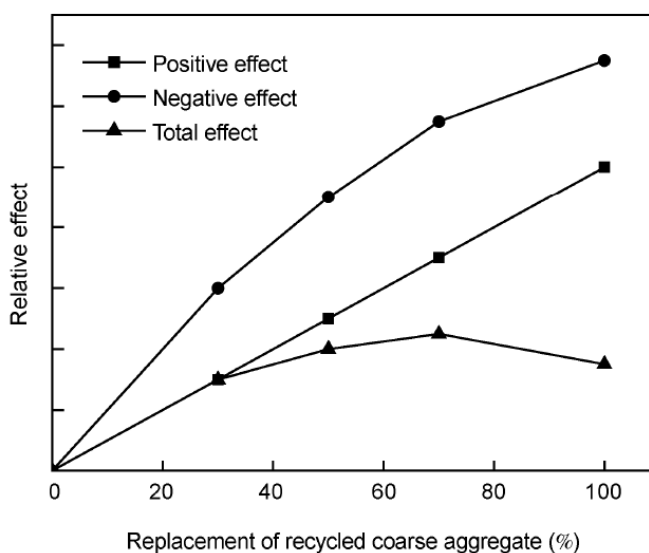


Figure 6: Interaction de ces deux effets des granulats recyclés sur la carbonatation en fonction du taux de remplacement [JianZhuang *et al.*, 2012]

2.8.4 Pénétration des ions chlore

La résistance à la pénétration des ions chlore est une propriété importante du béton en ce qui a trait à la durabilité. En effet, la présence d'ions chlore dans le béton peut causer la dépassement des barres d'armature [Kosmatka, Steven H. et autres, 2004]. Une bonne résistance à la pénétration des ions chlore peut donc augmenter beaucoup la durée de vie de l'ouvrage en béton.

La profondeur de pénétration augmente avec l'augmentation du taux de remplacement [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008; Kou et Poon, 2006; Tam et Tam, 2007]. Pour un taux de remplacement de 100%, la différence de profondeur de pénétration est de 0,7 mm (14%) [Chakradhara Rao *et al.*, 2011]. Cette augmentation de la pénétration des ions chlore peut être due à la porosité plus grande des granulats recyclés [Kou *et al.*, 2008]. Il ne semble pas y avoir de différence significative au niveau de la pénétration des ions chlore pour un taux de remplacement de 0 et 20% [Tam et Tam, 2007]. La pénétration des ions chlore augmente avec le rapport E/C. Pour un même rapport E/C, elle est légèrement plus élevée dans le béton à granulats recyclés possiblement à cause de la perméabilité plus grande des granulats recyclés [Otsuki *et al.*, 2003]. L'utilisation de cendres volantes comme ajout cimentaire permet, par contre, d'augmenter la résistance à la pénétration des ions chlore du béton [Kou *et al.*, 2007].

2.8.5 Perméabilité du béton à l'eau

La perméabilité du béton se définit comme la capacité d'un fluide à passer à travers un solide poreux tel que le béton. Comme la perméabilité du béton détermine la facilité avec laquelle le béton peut devenir saturé avec de l'eau, la perméabilité a un impact important sur plusieurs propriétés liées à la durabilité du béton, telles que la résistance au gel/dégel et la résistance à la pénétration des ions chlorures [Tam et Tam, 2007].

La perméabilité à l'eau du béton augmente avec le taux de remplacement du granulats naturels [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Kenai et Debieb, 2011; Levy et Helene, 2004; Malesev *et al.*, 2010; Tam et Tam, 2007]. Cette augmentation est possiblement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés qui est beaucoup plus grande que les granulats naturels. Cette augmentation n'a, cependant, pas été observée pour un taux de remplacement de 20% [Tam et Tam, 2007] [Levy et Helene, 2004; Tam et Tam, 2007]. Une légère diminution de la perméabilité a été observée dans le cas de l'étude de Levy et Helene, celle-ci possiblement dû au changement de la granulométrie causée par l'ajout de 20% de granulats recyclés. Selon l'auteur, le mélange de granulats dans le béton à 20% de remplacement aurait un meilleur facteur de compaction. Le remplacement du granulats naturels par un granulats recyclés ne semble pas avoir d'impact significatif pour un béton à haut rapport E/C (0,7) [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001].

2.8.6 *Volume de pores*

Le volume de pores et la distribution de ceux-ci ont un impact important sur la durabilité du béton, notamment sur sa résistance au gel/dégel. Selon certains auteurs, le volume de pore augmente en fonction du taux de remplacement [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Kou et Poon, 2006; Levy et Helene, 2004]. La porosité totale et le volume moyen des pores augmentent avec le taux de remplacement [Kou et Poon, 2006]. Cette augmentation n'a pas été observée pour un taux de remplacement de 20% [Levy et Helene, 2004]. La légère diminution observée dans ce cas peut être due au changement de la granulométrie par rapport au béton témoin. Le béton à 20% de taux de remplacement aurait un meilleur facteur de compaction.

Des résultats divergeant sont, par contre, observés dans l'étude récente de Kou et al [Kou *et al.*, 2011]. Dans ce cas, les bétons à granulats recyclés et naturels ont une porosité similaire à 28 jours. La porosité du béton à granulats recyclés diminue, par contre, davantage entre 28 jours et 5 ans que le béton à granulats naturels [Kou *et al.*, 2011].

2.9 Formulation des bétons contenant des granulats recyclés

recyclés

Plusieurs méthodes de formulation et de préparation alternative du béton sont proposées dans la littérature pour améliorer la performance du béton contenant des granulats recyclés. Parmi les méthodes les plus citées sont la « méthode du mélange en deux étapes » [Tam *et al.*, 2006; Tam et Tam, 2007; Tam *et al.*, 2005; Tam *et al.*, 2007] et la « méthode du mortier équivalent » [Fathifazl *et al.*, 2009; Fathifazl *et al.*, 2010]. L'effet de la présaturation du granulat par rapport à simplement la compensation de l'eau absorbée sera aussi discuté dans cette section.

2.9.1 Méthode du mélange en deux étapes

La méthode du mélange en deux étapes consiste à incorporer l'eau dans le mélange en deux étapes, dans le but de permettre aux particules de liant de bien s'adhérer à la surface du granulat recyclé. La Figure 7 illustre la différence entre la méthode du mélange en deux étapes par rapport à la méthode traditionnelle.

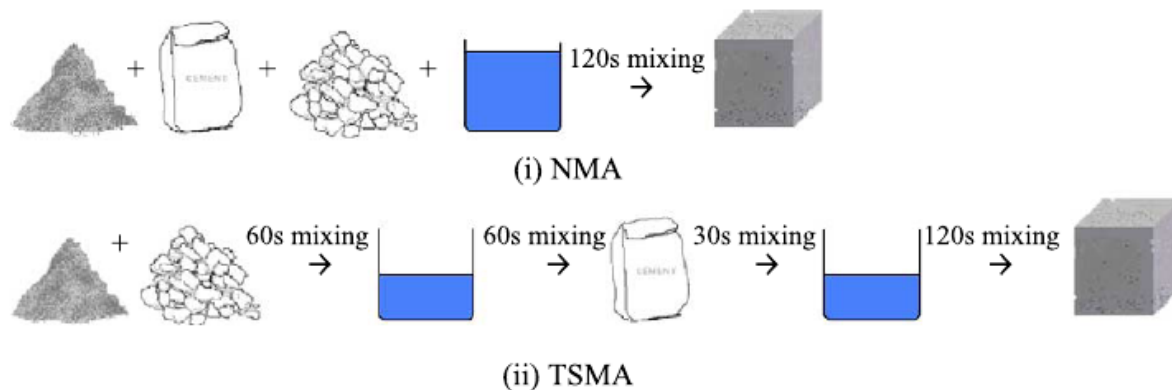


Figure 7: Processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale

L'amélioration des propriétés du béton provient du fait que cette technique permet de créer une couche de pâte de ciment de faible rapport E/C à la surface du granulat recyclé. Cela permet de remplir les pores et les fissures présents en surface du granulat lors du malaxage et, par le fait même, d'améliorer la qualité de l'interface pâte-granulat [Tam et Tam, 2007]. Comme il est possible de le constater sur la Figure 8 et la Figure 9, deux images prises au

microscope électronique à balayage, l'utilisation de la méthode de mélange double permet de remplir les fissures présentes dans le granulat recyclé alors que celles-ci ne sont pas remplies pour une méthode normale de mélange [Tam *et al.*, 2005].

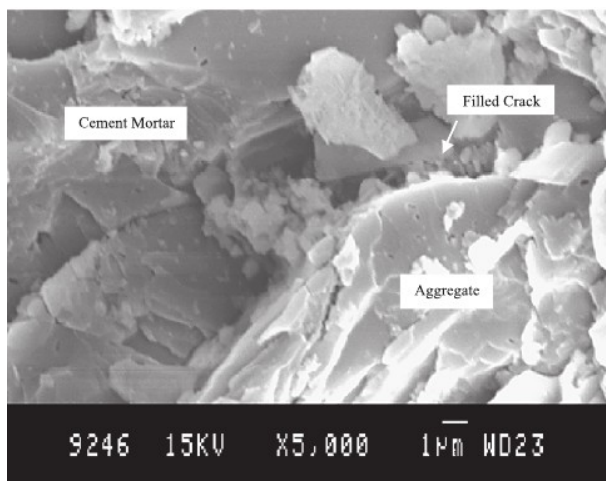


Figure 8: Observation au MEB d'une fissure du granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange double [Tam *et al.*, 2005]

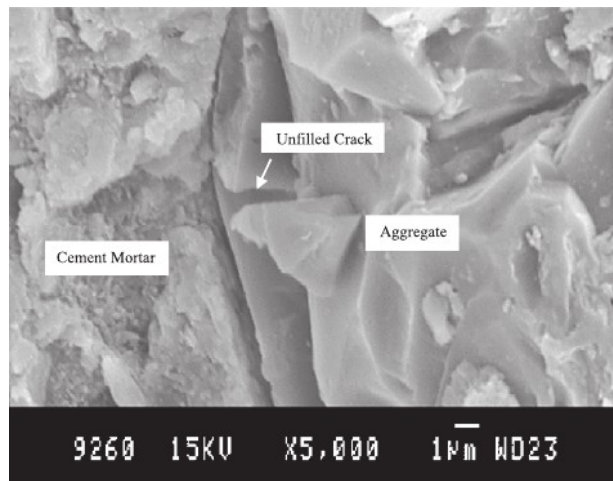


Figure 9: Observation au MEB d'une fissure du granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange normale [Tam *et al.*, 2005]

Comme mentionnée précédemment, la dureté de la nouvelle interface formée entre le granulat naturel et la pâte est contrôlée par le rapport E/C de la pâte. L'obtention d'une couche de pâte ayant un rapport E/C effectif plus bas permet de rendre la nouvelle interface plus résistante et par le fait même améliorer les propriétés mécaniques du béton [Tam *et al.*, 2005]. Cette technique fonctionne, par contre mieux, pour les bétons à haut rapport E/C puisque dans le cas des bétons à faible rapport E/C c'est la vieille interface entre le granulat original et le mortier résiduel qui contrôle [Otsuki *et al.*, 2003]. La Figure 10 présente le principe de fonctionnement de la méthode de mélange en deux étapes.

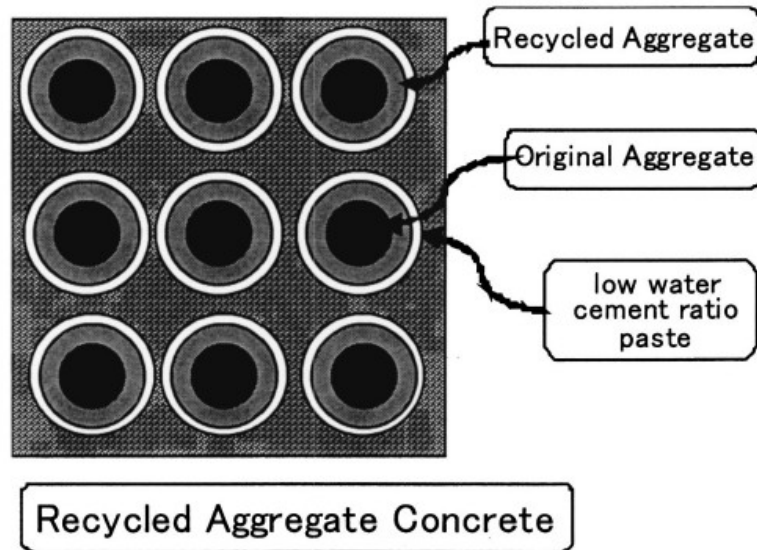


Figure 10: Principe de fonctionnement de la méthode de mélange en deux étapes
 [Otsuki *et al.*, 2003]

Il a été conclu que cette méthode améliore les propriétés mécaniques des bétons à granulats recyclés [Tam *et al.*, 2005]. Il a été notamment possible d'observer un gain de résistance à la compression de 21% (à 28 jours pour un taux de remplacement de 20%) par rapport au béton préparé selon la méthode normale [Tam *et al.*, 2005]. Il existe des taux de remplacement du granulat naturel où l'amélioration des propriétés mécaniques est plus grande en utilisant cette méthode. Ceux-ci se situent entre 25% et 40% ainsi qu'entre 50 et 70% bien que l'amélioration observée dans ce cas soit un peu moins grande que pour la zone de 25% à 40% [Tam *et al.*, 2007].

La méthode du mélange en deux étapes permet de réduire l'augmentation des déformations du béton dû à l'utilisation de granulats recyclés (46% pour le fluage et 68% pour le retrait à 14 jours pour un taux de remplacement de 100%) [Tam et Tam, 2007]. Il est aussi possible d'améliorer la performance du béton en ce qui a trait à la perméabilité à l'eau (35% d'amélioration à 126 jours pour un taux de remplacement de 100%) ainsi que la perméabilité aux ions chlore (30% d'amélioration à 126 jours pour un taux de remplacement de 100%) [Tam et Tam, 2007].

2.9.2 Méthode du mortier équivalent

La méthode du mortier équivalent consiste à considérer le granulat recyclé comme un matériau à deux phases distinctes lors de la formulation, le granulat originel et le mortier résiduel. Cette méthode cherche à formuler un béton ayant la même teneur en mortier total (mortier résiduel et nouveau mortier) que le béton conventionnel [Fathifazl *et al.*, 2009]. Ce calcul nécessite, par contre, une mesure précise de la teneur en mortier résiduel du granulat recyclé. Cette méthode de formulation permet de diminuer la quantité de nouvelle pâte ajoutée au béton et donc, par le fait même, la quantité de granulat fin et de ciment nécessaire au mélange. Selon l'auteur [Fathifazl *et al.*, 2009], il semble que l'utilisation de cette méthode permet d'obtenir de meilleurs résultats en ce qui a trait aux propriétés à l'état frais et au module d'élasticité tout en maintenant une résistance à la compression comparable aux bétons recyclés formulés avec d'autres méthodes. Il est, par contre, à noter qu'en plus de changer la méthode de formulation, le taux de remplacement varie entre les essais. L'amélioration des propriétés du béton formulé avec la méthode du mortier équivalent pourrait donc être en partie due au changement du taux de remplacement. Cette méthode est donc intéressante puisqu'elle permet potentiellement de réaliser un béton plus économique, mais la variation de deux facteurs importants rend les résultats de cette étude plus complexe à évaluer.

2.9.3 Méthode de la pré-saturation et de la compensation d'eau

Une étude a été menée pour évaluer l'impact de la pré-saturation des granulats recyclés sur les propriétés du béton [Ferreira *et al.*, 2011]. Pour cette étude, la méthode de compensation de l'eau a été comparée à la méthode de pré-saturation. Dans les deux cas, une quantité d'eau égale à la différence entre l'absorption et la teneur en eau des granulats recyclés a été ajoutée. La seule différence est dans le fait que l'eau a été mise en contact avec les granulats pendant 5 minutes dans le cas de la méthode de la pré-saturation. Les résultats de cette étude montrent que les bétons pour lesquels la méthode de pré saturation a été utilisée ont un comportement légèrement moins bon à l'état solide et à l'état frais que les bétons pour lesquels il y a eu seulement une compensation de l'eau absorbée [Ferreira *et al.*, 2011]. L'auteur explique cette différence par un « effet de clouage ». Cet « effet de clouage » serait dû au fait que lorsqu'il n'y a pas pré saturation, des particules de ciments pénètrent dans les pores de granulats recyclés. Ces particules de ciments améliorant la qualité de l'interface granulat-pâte lors de

leurs hydratations et, par le fait même, les propriétés mécaniques du béton. La Figure 11 illustre la séquence de malaxage pour la méthode de pré-saturation.

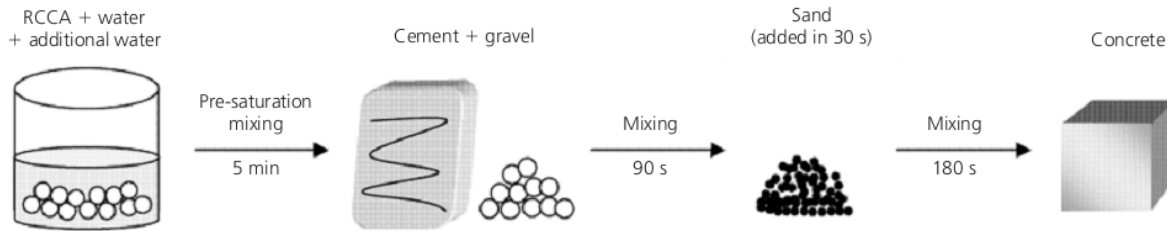


Figure 2. Mixing procedure

Figure 11: Méthode de malaxage pour la méthode de pré saturation

2.9.4 Autre information pertinente à la formulation

Comme les granulats recyclés ont une très grande absorption, il faut que ceux-ci soient humides lors de leur utilisation pour préparer du béton [Etxeberria *et al.*, 2007]. Si le granulat n'est pas humide, celui-ci peut absorber l'eau du mélange, affectant ainsi négativement la maniabilité du béton et le contrôle du rapport E/C effectif. Un bon niveau de saturation de 80% est proposé [Etxeberria *et al.*, 2007]. Cette teneur en eau permet de réduire l'absorption de l'eau du mélange par les granulats tout en réduisant le risque de saignement associé au granulat saturé [Ferreira *et al.*, 2011]. Ce saignement peut affecter négativement plusieurs propriétés du béton puisqu'il diminue la qualité de l'interface pâte-granulat.

CHAPITRE 3 Programme expérimental

3.1 Définition et objectifs du projet de recherche

L'objectif général du projet est d'évaluer la possibilité de remplacer les granulats naturels utilisés dans les bétons d'usage résidentiel par des granulats recyclés. Plus spécifiquement, il s'agit d'évaluer l'effet du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons destinés à la construction résidentielle tel que décrits dans la section 8 de la norme CSA A23.1-14.

En plus de l'objectif principal, deux objectifs secondaires sont visés dans le cadre de ce projet. Le premier objectif secondaire est l'identification du taux de remplacement optimal des granulats naturels par des granulats recyclés pour ce type de bétons ainsi que le matériau recyclé présenté à la section 3.3. Cette étude sert aussi à générer des données sur l'utilisation de matériaux recyclés disponibles au Québec dans la confection de nouveaux bétons. Ces données peuvent éventuellement être utilisées dans le but de créer une norme encadrant l'utilisation des granulats recyclés dans les nouveaux bétons.

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation des granulats recyclés dans le béton de résistance moyenne, le projet est divisé en deux phases. La première phase est consacrée à la caractérisation du matériau recyclé. Cette phase consiste à définir les propriétés du matériau recyclé et à obtenir l'information qui permet d'adapter la méthode de préparation du béton aux granulats recyclés. La deuxième phase consiste à formuler des bétons ayant des taux de remplacement du granulat naturel variables et évaluer l'impact de ceux-ci. Les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité de ces mélanges sont évaluées dans cette phase.

3.2 Méthodologie

Le projet de recherche se divise en deux phases distinctes, le conditionnement et la caractérisation des granulats recyclés ainsi que l'étude paramétrique sur béton. Le détail de la méthodologie est présenté à la Figure 12.

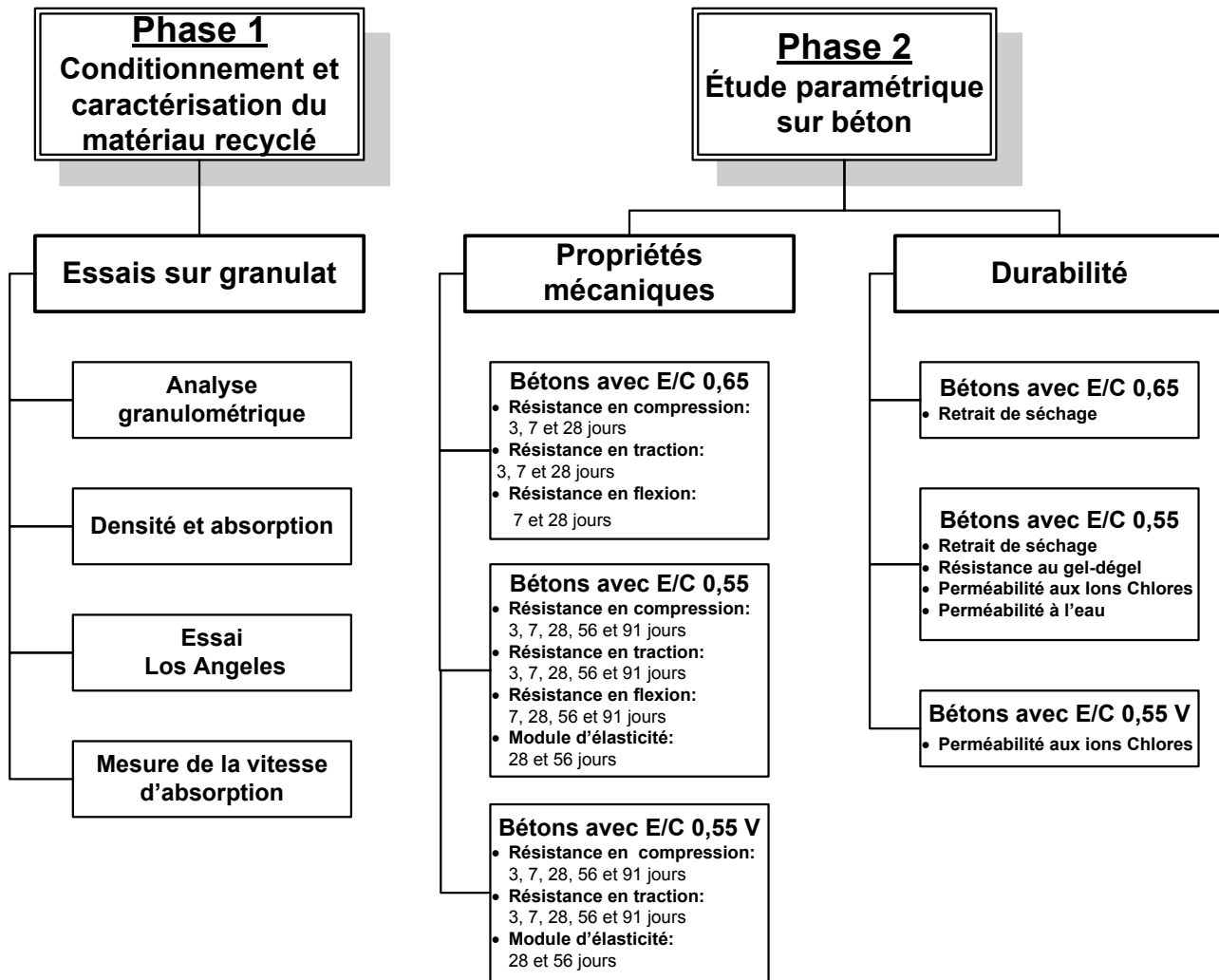


Figure 12: Programme expérimental

3.2.1 Phase 1 : Conditionnement et caractérisation des granulats recyclés

La première phase d'essai consiste en la caractérisation détaillée du matériau recyclé utilisé dans le cadre de cette étude. Cette phase a pour but d'identifier les propriétés des granulats recyclés. Les essais effectués dans le cadre de cette phase comprennent plusieurs essais normalisés sur granulats (analyse granulométrique, la masse volumique et de l'absorption ainsi que l'essai de résistance à l'abrasion Los Angeles) en plus de méthodes d'essais tirés de la littérature (teneur en mortier résiduel d'un granulat recyclé et vitesse d'absorption d'un gros granulat).

3.2.2 Phase 2 : Étude paramétrique sur béton

La deuxième phase d'essai consiste en une étude paramétrique sur béton. Dans le cadre de cette phase, des mélanges de béton ont été confectionnés dans le but d'évaluer l'impact de plusieurs paramètres sur les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Les essais effectués lors de cette phase sont les essais sur béton frais (affaissement, teneur en air et masse volumique), les essais visant à évaluer les propriétés mécaniques du béton durci (résistance à la compression, résistance à la traction indirecte, résistance à la flexion et module d'élasticité) en plus des essais visant à mesurer la durabilité du béton durci (retrait de séchage, perméabilité aux ions chlorures, résistance au gel/dégel et perméabilité à l'eau)

3.3 Matériaux utilisés

3.3.1 Ciment Portland et ciment hydraulique composé

Le ciment utilisé dans le cadre de cette étude est un ciment Portland de type GU. Bien que la majorité des mélanges étudiés sont proportionnés avec ce ciment, un mélange incorporant un ciment ternaire a aussi été préparé dans le cadre du programme expérimental. Ce liant ternaire de type GUbFSF aussi appelé GUb-F/SF selon la norme CSA A3000 est composé d'un ciment GU auquel est ajoutés 20% de cendres volantes de type F et 5% de fumée de silice. La composition chimique et les caractéristiques physiques des ciments sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2: Composition chimique et propriétés physiques du ciment GU et du GUbFSF

Composition chimique (%)		
Type de liant:	Ciment GU	GUbFSF
SiO₂	20,7	31,1
Al₂O₃	4.4	8.8
Fe₂O₃	2.6	5.3
CaO	62.8	45.9
MgO	2.1	1.2
SO₃	3.4	3
Alcalis équivalents*	0.8	1.1
PAF	2.41	2.5
Propriétés physiques		
Densité relative	3,14	-
Surface spécifique Blaine (m²/kg)	390	450
Composition de Bogue (%)		
C₃S	56	-
C₂S	17	-
C₃A	7,2	-
C₄AF	7,9	-
*Na ₂ O équivalent = 0,658 K ₂ O + Na ₂ O		

3.3.2 Sable

Le sable utilisé dans la fabrication des bétons étudiés provient du site de Demix à Sherbrooke. Celui-ci a une masse volumique SSS de 2,66, une absorption de 0,99% et un module de finesse de 2,69. L'essai de masse volumique et absorption a été effectué selon la norme CSA A-23.2-6A. Sa granulométrie est présentée dans le Tableau 3 et illustrée à la Figure 13. Les analyses granulométriques ont été exécutées selon les normes CSA A-23.1 et CSA A-23.2-2A.

Tableau 3: Granulométrie du sable

Ouverture des tamis (mm)	% Passant	
	Sable	Fuseau Normalisé
10	100	100-100
5	99	95-100
2,5	85	80-100
1,25	67	50-90
0,630	47	25-65
0,315	24	10-35
0,160	8	2-10
0,080	3	0-3

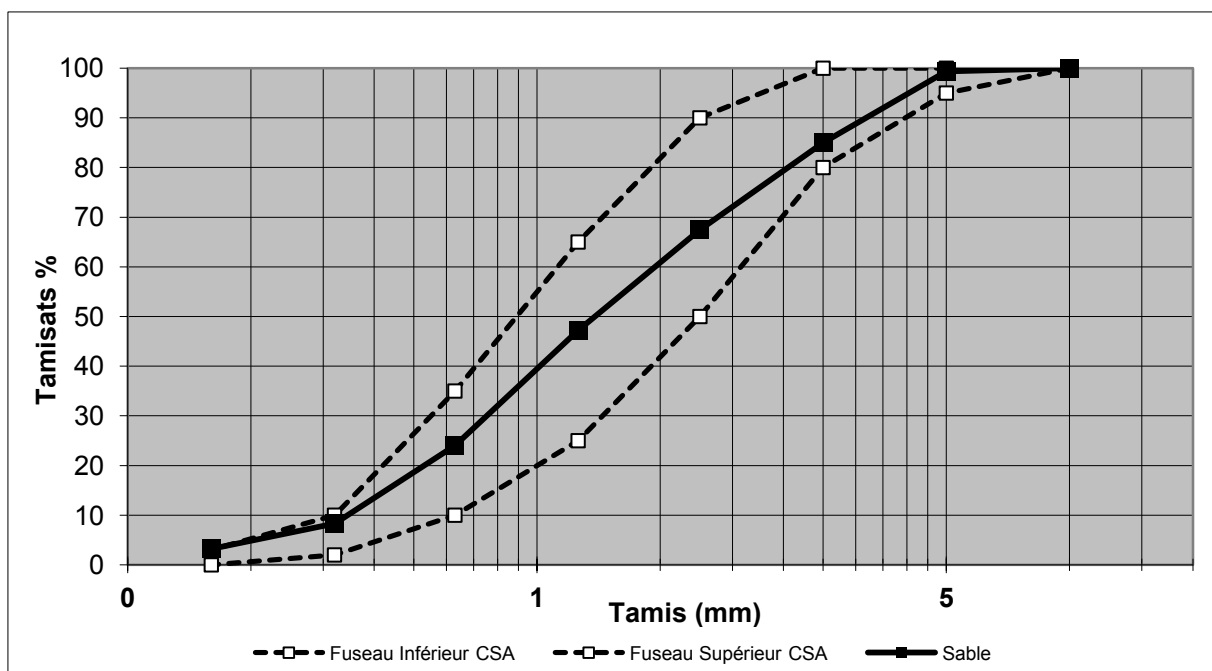


Figure 13: Courbe granulométrique du sable

3.3.3 Gros granulat naturel

Les gros granulats proviennent de la carrière de St-Dominique. Des granulats 5-14 mm et 10-20 mm ont été utilisés. Afin de respecter les exigences de la norme CSA pour la courbe granulométrique d'un gros granulat de béton de grosseur nominale 5-20 mm, une combinaison de 70% d'un granulat 5-14 mm et 30% d'un granulat 10-20mm a été utilisée.

Les distributions granulométriques ainsi que les propriétés des granulats sont présentées sans le Tableau 4. Les distributions granulométriques des granulats individuels et de la combinaison utilisée sont illustrées sur les Figure 14, Figure 15 et Figure 16.

Tableau 4: Distribution granulométrique et propriété des gros granulats

Ouverture des tamis (mm)	% Passant			
	10-20 mm	5-14 mm	Combinaison	Fuseau 5-20 mm
28	100	100	100	100-100
20	93	100	98	85-100
14	15	94	70	60-90
10	1	56	39	25-60
5	0	7	5	0-10
2,5	0	2	1	0-5
Densité SSS	2,76	2,74	2,75	-
Absorption	0,49	0,63	0,59	-

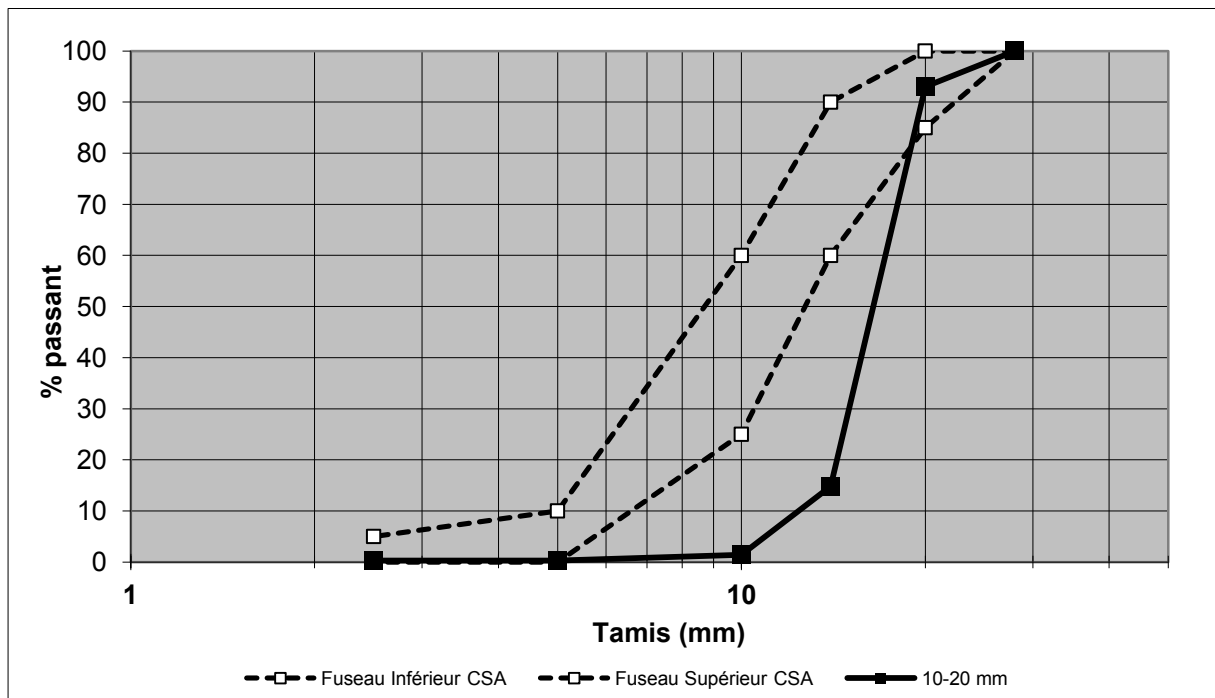


Figure 14: Courbe granulométrique du gros granulat naturel 10-20 mm

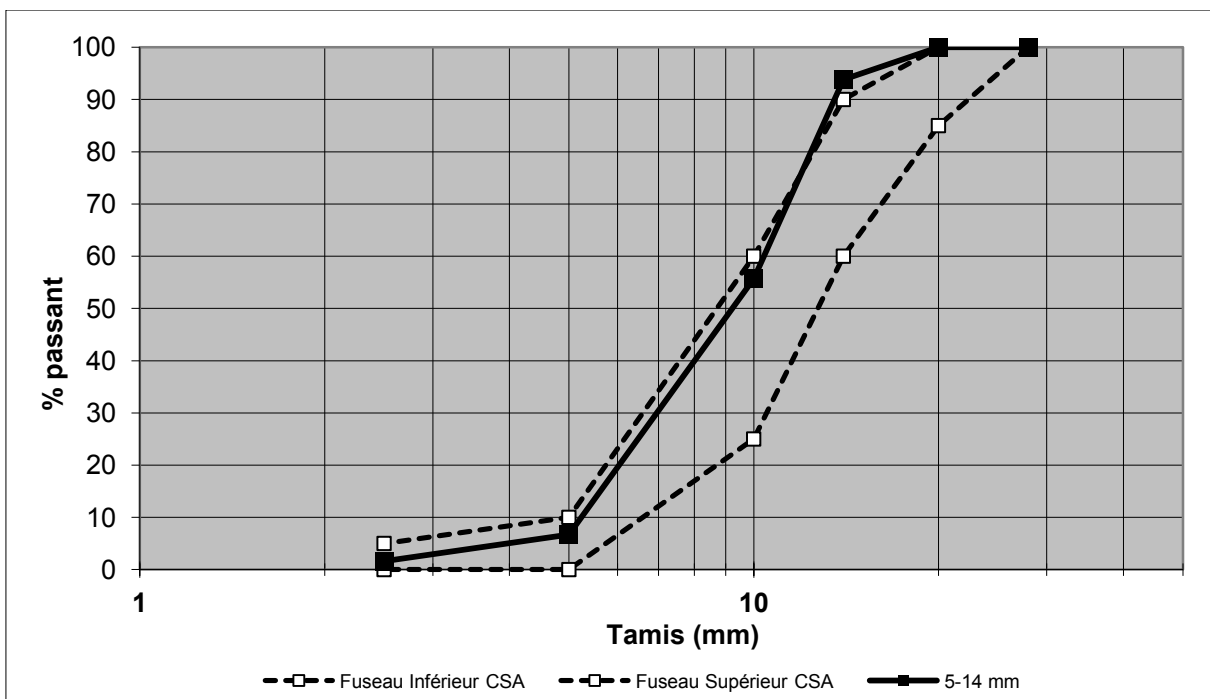


Figure 15: courbe granulométrique gros granulat naturel 5-14 mm

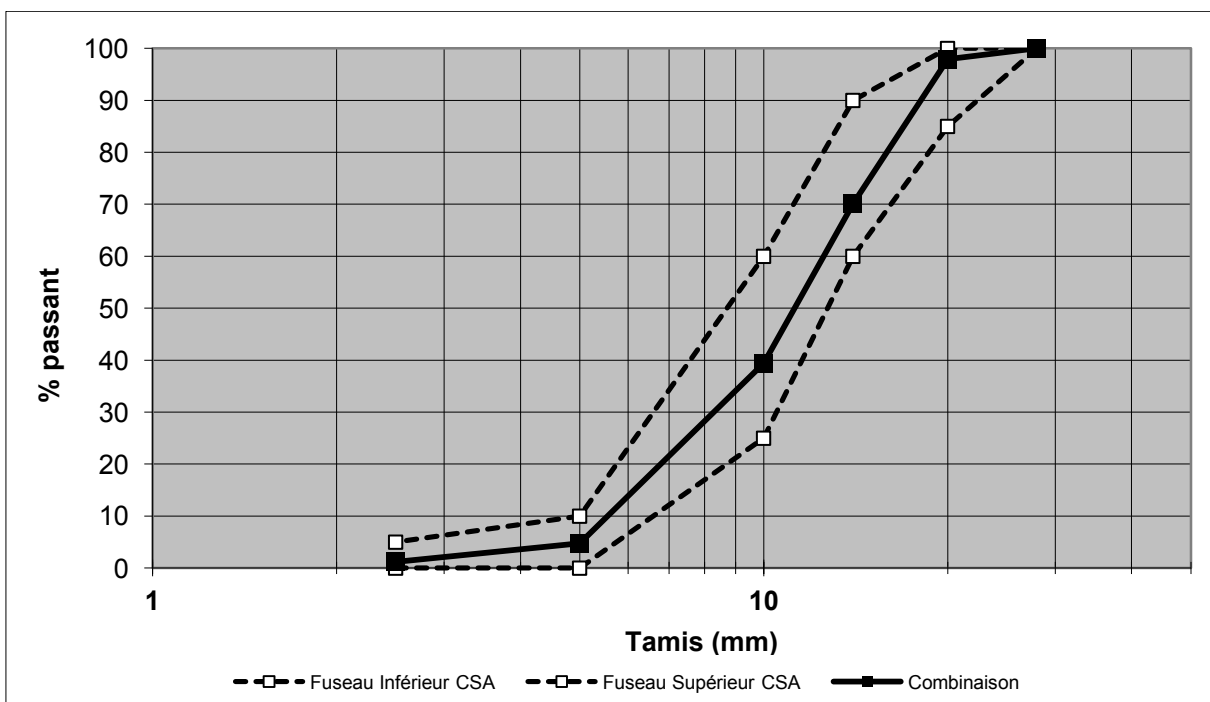


Figure 16: Courbe granulométrique de la combinaison de gros granulat de béton

Bien que certaines autres combinaisons de granulats naturels respectent les exigences de la norme CSA, cette combinaison a été choisie parce que sa courbe granulométrique est la plus rapprochée de celle du matériau recyclé tamisé. On cherche ainsi à éliminer l'impact de la variation de la courbe granulométrie entre les combinaisons de granulats utilisés pour les différents mélanges de béton. Les analyses granulométriques ont été effectuées selon les normes CSA A23.1 et CSA A-23.2-2A. Les masses volumiques et absorptions ont été faites selon la norme CSA A23.2-12A.

3.3.4 Granulat recyclé

Le matériau granulaire recyclé utilisé pour cette étude est un matériau recyclé de classe MR-2. Celui-ci provient d'un centre de récupération de résidus de démolition située. Sa composition ainsi que certaines caractéristiques physiques de celui-ci ont été fournies par le producteur C.M.M Inc. Les tableaux ci-dessous sont tirés d'un rapport de caractérisation du matériau granulaire recyclé effectué par Inspec-Sol Inc [INSPEC SOL, 2011].

Tableau 5: Composition et classification matériaux recyclés [INSPEC SOL, 2011]

Constituants	Échantillon				Classification selon exigence 6VM-20
	G-0437	G-0438	G-0439	G-0440	
Résidus de béton (BC)	74 %	72 %	77 %	74 %	MR-2
Résidus d'enrobés (EB)	4 %	5 %	7 %	5 %	
Granulats naturels (GN)	22 %	23 %	16 %	21 %	

Tableau 6: Caractéristiques complémentaires pour matériaux recyclés [INSPEC SOL, 2011]

Constituants	Exigences du devis 6VM-20 et 6VM-9	Résultats des essais			
		G-0437	G-0438	G-0439	G-0440
Impuretés (%)	< 1%	0.1	0.0	0.0	0.2
Indice colorimétrique	≤ 3	1	N/A	1.0	N/A
Chlorure hydrosoluble (%)	≤ 0,1%	0.0099	N/A	0.01	N/A
Sulfate hydrosoluble (%)	≤ 0,6%*	0.21	N/A	0.19	N/A
OPM	N/A	1964	1992	2002	1964
CBR	≥ 60	65%	67%	74%	61%
Teneur en bitume	≤ 1,25%	0.61	0.62	0.6	0.6
Fragmentation	100 %	N/A	100	N/A	100

Tableau 7: Analyse granulométrique sur matériaux recyclés [INSPEC SOL, 2011]

Paramètres	Résultats					
	Tamis no (mm)	% passant exigé (MG-31,5)	Échantillon			
G-0437			G-0438	G-0439	G-0630	
Granulométrie	112	100	100	100	100	100
	56	100	100	100	100	100
	40	100	97	97	95	94
	31.5	90-100	93	95	94	90
	14	60-90	75	76	77	71
	5	30-60	44	47	48	43
	1,25	15-40	28	29	28	26
	0,315	5-20	15	16	15	14
	0,080	2-8	7.9	7.9	7.7	7.4

Cette analyse montre que le matériau recyclé est composé, en moyenne, de 75% de résidus de béton de ciment, 20% de granulats naturels et 5% de résidus d'enrobés bitumineux. Cette composition correspond à la classe de matériau recyclé MR-2 selon les exigences de la norme BNQ 2560-600. On constate aussi que sa teneur en impureté est inférieure à 1%. Le matériau tel que reçu a une granulométrie très étalée. Un conditionnement est donc nécessaire pour obtenir une granulométrie respectant les exigences de la norme CSA pour un gros granulats de béton. Les autres caractéristiques de ce matériau sont présentées dans le chapitre 4.1 où la caractérisation et le conditionnement du matériau recyclé sont présentés.

3.3.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée provient du réseau d'eau potable de la ville de Sherbrooke.

3.3.6 Agent entraîneur d'air

Le seul adjuvant utilisé dans le cadre de cette étude est l'agent entraîneur d'air (AEA) AIREX-L produit par Euclid Chemical. Celui-ci a une masse volumique relative à 25°C de 1,007 et un extrait sec de 5,0%.

3.4 Procédure expérimentale

3.4.1 Séquence de malaxage

Le malaxeur utilisé pour la préparation des mélanges étudiés est un Monarch à axe de rotation vertical d'une capacité de 100L. La séquence de malaxage utilisée pour la confection des bétons est présentée au Tableau 8.

Tableau 8: Séquence de malaxage

	Description des étapes	Temps (min)
1	Mettre le sable dans le malaxeur et malaxer 1 minute.	
2	Corriger la quantité d'eau et de sable.	
3	Ajouter les granulats au malaxeur et malaxer durant 1 minute pour assurer l'homogénéisation.	
4	Ajouter la moitié de l'eau et malaxer 5 minutes pour assurer une pré-saturation partielle du granulat.	
5	Ajouter l'AEA et malaxer 45 secondes. Arrêter le malaxeur.	
6	Ajouter le liant et malaxer 3 minutes.	T = 0:00
7	Après les premières 30 secondes de malaxage, ajouter lentement l'autre moitié de l'eau.	T = 0:30
8	Arrêter le malaxeur durant 2 minutes.	T = 3:00
9	Reprendre le malaxage entre 5 et 8 minutes.	T = 5:00
10	Arrêter le malaxeur et faire les essais sur béton à l'état frais.	T = 8:00
11	Malaxer 1 minute.	T = 14:00
12	Échantillonner	T = 15:00

3.4.2 Méthodes d'échantillonnage et de mûrissement

Les gâchées d'essais ont été préparés selon les procédures décrites à la norme CSA A23.2-2C pour la confection des mélanges de béton en laboratoire. L'échantillonnage du béton, la préparation et la cure des éprouvettes et la cure de celles-ci ont été effectués selon les normes CSA A23.2-1C et CSA A23.2-3C.

CHAPITRE 4 Présentation des résultats

4.1 Phase 1 – Essais sur granulats

Dans le cadre de la deuxième phase d’essai sur béton, le matériau recyclé utilisé dans le cadre de cette étude est soumis aux essais de caractérisation. Cette phase a pour but d’identifier les propriétés particulières des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Les essais normalisés effectués dans le cadre de cette phase sont: l’analyse granulométrique, la masse volumique, l’absorption et la résistance à l’abrasion Los Angeles ainsi que des méthodes d’essais tirés de la littérature notamment : la mesure de la teneur en mortier résiduel d’un granulats recyclé et de la vitesse d’absorption d’un gros granulats.

4.1.1 Analyse granulométrique

L’analyse granulométrique a été effectuée selon la norme CSA A23.2-2A pour un gros granulats de béton. Celle-ci a été exécutée suite au tamisage du matériau recyclé sur le tamis 2,5 mm. Le matériau obtenu suite au tamisage du MR-2 sur le tamis 2,5 mm et sur lequel les essais sont effectués est appelé « MR-2 tamisé » dans la suite de ce document. Le Tableau 9 et la Figure 17 présentent les résultats obtenus lors des 5 analyses granulométriques effectuées sur celui-ci.

Tableau 9: Granulométrie du matériau de classe MR-2 après tamisage

Tamis (mm)	% Passant					Fuseau normalisé	
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	min	max
28	100	100	100	100	100	100	100
20	89,2	90,3	87,6	86,6	89,2	85	100
14	65,2	67,3	62,9	65,6	69,6	50	90
10	42,0	43,7	40,0	41,9	45,2	25	60
5	9,1	11,6	9,2	12,2	11,7	0	10
2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	5

Le MR-2 tamisé respecte généralement les exigences de la norme CSA A-23.1-09 pour un gros granulats de béton du groupe 1 ayant une dimension nominale de 20-5 mm. Il est à noter que certains échantillons soumis à l’essai ont des pourcentages passant au tamis 5 mm

légèrement trop élevés et ne sont pas conformes aux exigences de la norme CSA pour un gros granulat à béton. En moyenne, le pourcentage passant au tamis 5 mm est de 11% alors que la limite permise est de 10%. Ce pourcentage passant légèrement trop élevé est cependant généralement considéré comme étant tolérable. La Figure 17 présente les courbes granulométriques du matériau MR-2 ainsi que du mélange de granulat correspondant à la limite supérieure de la classe de matériau recyclé MR-1 (teneur en résidus de béton de 50%).

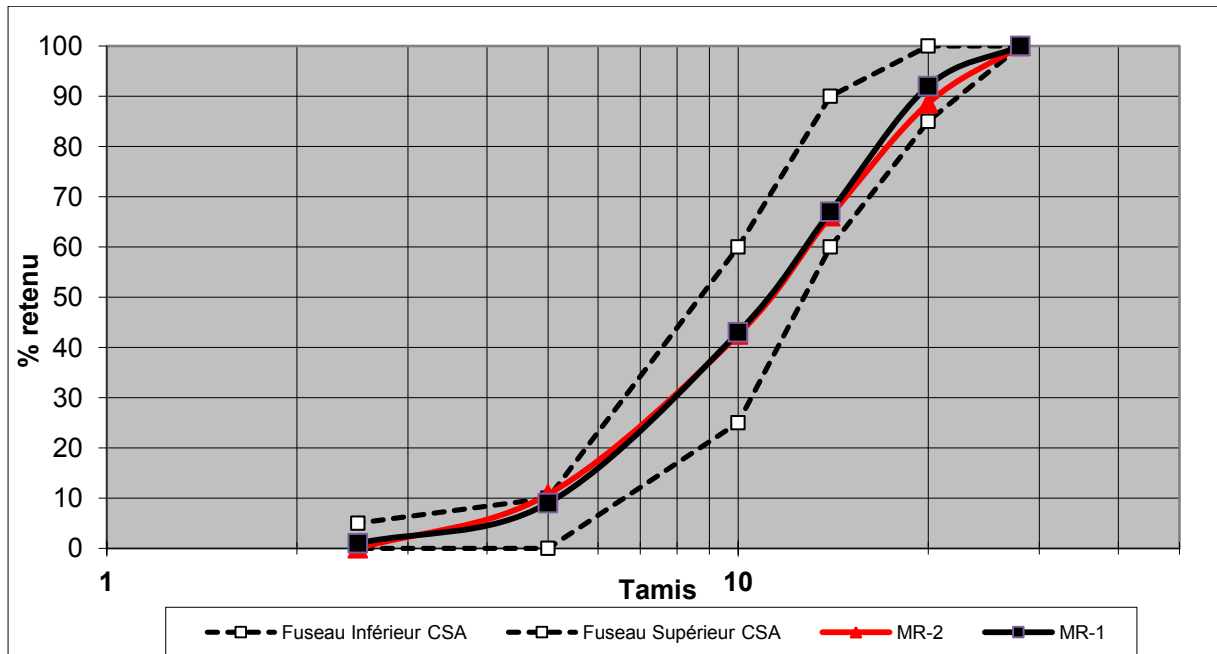


Figure 17: Courbe granulométrique des matériaux de classe MR-2 et MR-1

Bien qu'en moyenne le MR-2 présente une non-conformité au tamis 5 mm, le mélange de granulat formant le MR-1 est conforme aux exigences de la norme CSA A-23 pour un gros granulat de béton. En général, les deux courbes granulométriques sont comparables

4.1.2 Essai de masse volumique et absorption

L'essai de masse volumique et absorption selon la norme CSA A23.2-12A a été effectué sur le matériau de classe MR-2. Des échantillons de 5 kg ont été prélevés dans le but d'effectuer cet essai. Leur masse sèche dans l'air, saturé surface sèche et saturée dans l'eau ont été évaluées. Les résultats sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Essai de masse volumique et absorption sur MR-2

	Éch. 1	Éch. 2	Éch. 3	Éch. 4	Moyenne
Densité brute	2,35	2,30	2,35	2,30	2,30
Densité SSS	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
Densité Apparente	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Absorption	5,54	6,02	5,34	5,89	5,70

En général, ces résultats sont comparables avec ceux présentés dans la littérature. Les granulats formés de résidus de béton ont généralement une masse volumique plus faible et une absorption beaucoup plus élevées que les granulats naturels. La littérature à ce sujet indique que la masse volumique relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m³) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m³) [Chakradhara Rao *et al.*, 2011], en moyenne 2,67 pour les granulats d'origine calcaire généralement utilisés au Québec. Les valeurs d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour un granulats naturel celles-ci sont souvent inférieures à 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [Tarn *et al.*, 2008]. Les granulats naturels ayant une absorption supérieure à 1% sont, cependant, très rares au Québec.

4.1.3 Résistance à l'impact et à l'abrasion

L'essai de résistance à l'impact et à l'abrasion a été effectué selon la norme CSA A23.2-16A. La résistance à l'abrasion de deux fuseaux granulométriques distincts du matériau recyclé MR-2 a été évaluée. Les fuseaux évalués sont les granulométries B et C selon la norme CSA A23.2-16A. L'échantillon correspondant à la granulométrie B doit être composé de 2500 ± 10g de particules passant le tamis 20 mm et retenues au tamis 14 mm ainsi que 2500 ± 10g de particules passant le tamis 14 mm et retenu au tamis 10 mm. La granulométrie C doit être composée de 5000 ± 10 g de particules passant le tamis 10 mm et retenu au tamis 5 mm. La différence entre la masse initiale et la masse finale est exprimée comme un pourcentage de la masse initiale de l'échantillon et représente la perte due à l'abrasion.

Le pourcentage de perte due à l'abrasion du fuseau 10-20 mm est de 31,8% alors que celui du fuseau 5-10 mm est de 26,6%. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus pour certains

granulats naturels (pertes de masse de l'ordre de 30% pour des calcaires des basses terres du St-Laurent) mais sont, cependant, plus élevés que la perte de masse observée pour le granulat naturel de référence (calcaire dolomitique St-Dominique) utilisé dans le cadre de cette étude. La combinaison de granulats naturels utilisée dans le cadre de cette étude a une perte de masse de l'ordre de 15% suite à l'essai Los Angeles. Cette plus grande perte de masse peut être causée par la présence du mortier résiduel qui se détache en grande partie lors de l'essai.



Figure 18: MR-2 après essai Los Angeles

La Figure 18 présente le matériau MR-2 tamisé (à droite) ainsi que le tamisât suite à l'essai (à gauche) Los Angeles. Le tamisât apparaît composé en grande partie de mortier résiduel désagrégé alors qu'on voit que le matériau retenu a une apparence très similaire à un granulat naturel. Cette observation porte à croire que la majorité du mortier résiduel a été détachée du granulat original lors de l'essai de résistance en abrasion.

Les pertes de masse mesurées suite à l'essai Los Angeles sont, cependant, inférieures à la valeur limite de 50% prescrite par la norme CSA A23 4.2.3.1. Une explication possible de la différence de perte à l'abrasion entre les deux fuseaux granulométriques est que les plus grosses particules ont une plus grande teneur en mortier résiduel et, par le fait même, une plus grande perte de masse due à l'abrasion.

4.1.4 *Vitesse d'absorption*

L'évaluation de la vitesse d'absorption d'un granulat grossier est réalisée selon une procédure d'essai proposé par Ferreira [Ferreira *et al.*, 2011]. Cet essai est inspiré de l'essai de mesure de l'absorption des granulats naturels. Il consiste à évaluer la variation de masse sous l'eau d'un granulat séché. La mesure de la variation de la masse permet de suivre l'évolution de l'absorption relative et, par conséquent, la vitesse d'absorption. Cet essai a été effectué sur le matériau recyclé de classe MR-2 ainsi que sur le même granulat naturel utilisé dans de la confection de béton en laboratoire.

La procédure d'essai consiste à laver le matériau sur un tamis 5 mm. Celui-ci est, par la suite, séché jusqu'à masse constante, un échantillon de 1,5 kg est ensuite prélevé. L'échantillon est placé dans un panier d'acier qui est attaché sous une balance. Les mesures commencent aussitôt que le granulat sec entre en contact avec l'eau. Une mesure de la masse des granulats sous l'eau est prise chaque 30 secondes durant les 5 premières minutes et chaque minute jusqu'à 30 minutes.

Suite aux premières mesures de vitesse d'absorption, il a été constaté que des bulles d'air s'échappent du matériau lorsque celui-ci est remué sous l'eau. Ces bulles d'air, piégés entre les granulats lors de l'essai semble avoir un impact significatif sur les masses mesurées. Comme cela a un impact important sur les résultats de l'essai, l'essai a été modifié. Une manipulation supplémentaire a été ajoutée pour prévenir ce phénomène. Le matériau doit être remué légèrement avec une tige d'acier entre chaque mesure durant l'essai. Cette technique vise à mieux représenter l'absorption d'eau du granulat qui a lieu dans un malaxeur à béton. La Figure 19 présente une comparaison entre un essai lors duquel le matériau est remué entre les mesures et un essai lors duquel le matériau n'a pas été touché. On y voit que l'absorption du matériau est beaucoup plus basse quand celui-ci n'est pas remué. Dans ce cas, l'absorption relative à 30 minutes du MR-2 non remué (~40%) est la moitié de l'absorption du matériau remué (~80%).

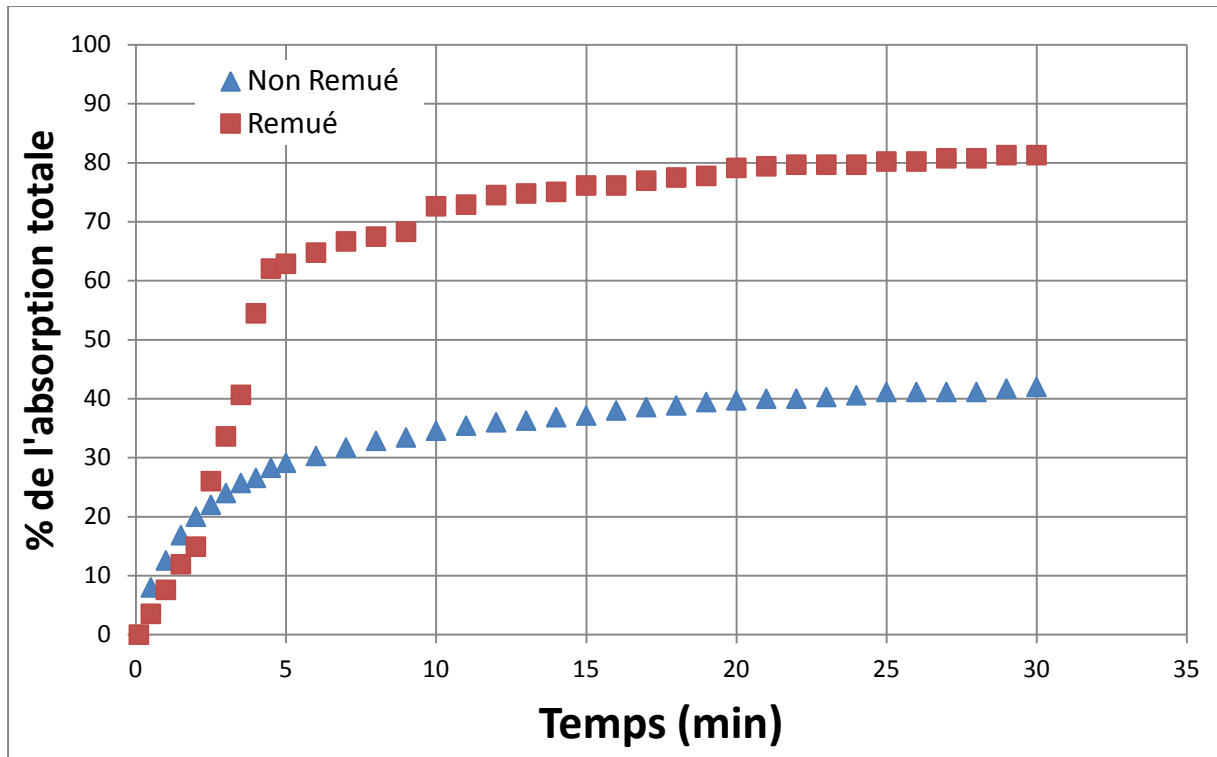


Figure 19: Comparaison entre mesure de vitesse d'absorption remuée et non remuée

La méthode mesurant l'absorption du granulat recyclé remué régulièrement a été choisie puisque cela représente mieux les conditions d'absorption du granulat placé dans un malaxeur lors de la préparation de béton. En moyenne, l'absorption relative du matériau granulaire recyclé est de l'ordre de 65% après 5 minutes et de l'ordre de 85% après 30 minutes en utilisant cette méthode. La vitesse d'absorption du granulat naturel utilisé dans le cadre de cette étude a aussi été mesurée. La Figure 20 présente une comparaison de l'absorption relative dans le temps du granulat naturel et du granulat recyclé.

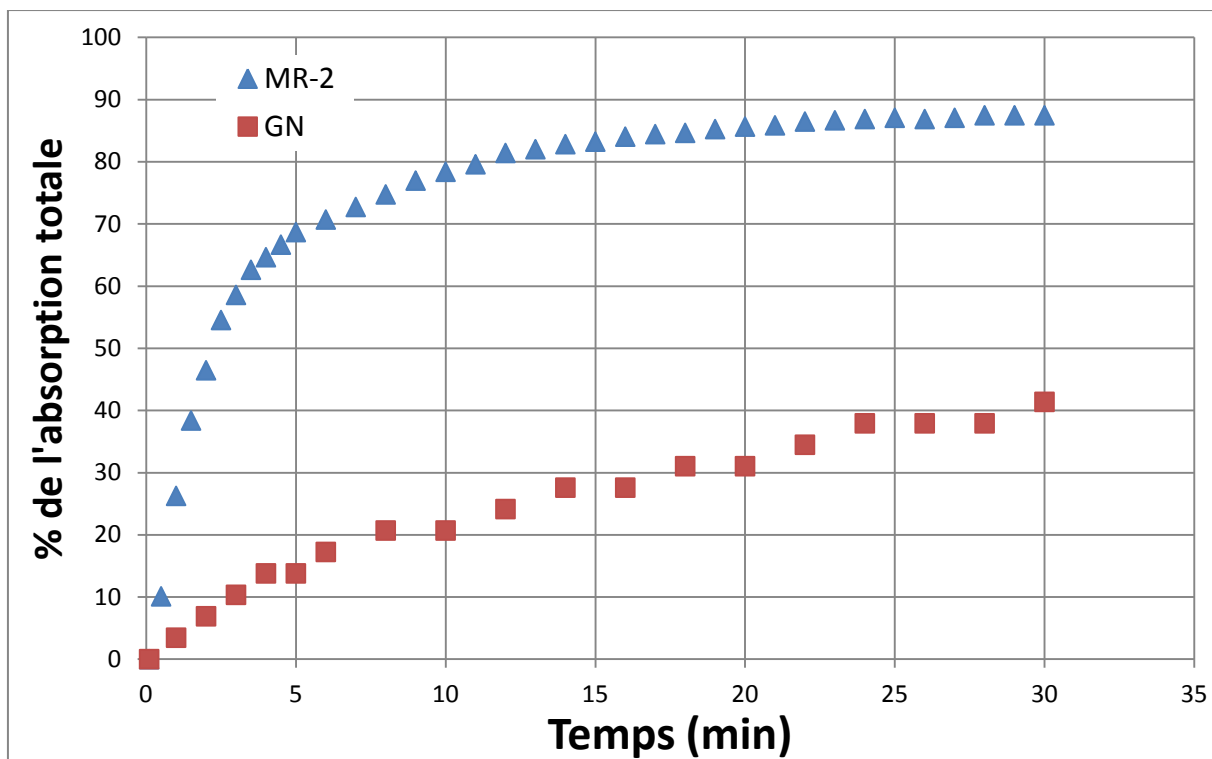


Figure 20: Comparaison de la vitesse d'absorption du MR-2 avec un granulat naturel

On observe que l'absorption du granulat recyclé a lieu beaucoup plus rapidement que l'absorption du granulat naturel. En effet, 87% de l'absorption totale du granulat recyclé a lieu dans les 30 premières minutes alors qu'elle n'est que de 41% pour le granulat naturel.

4.1.5 Teneur en mortier résiduel

Dans le cadre de cette étude, deux méthodes ont été utilisées pour mesurer la teneur en mortier résiduel du matériau recyclé. Les méthodes utilisées sont les deux techniques qui semblent les plus efficaces selon [Butler *et al.*, 2011] soit la méthode de l'expansion thermique et la méthode de gel/dégel. Ces deux méthodes ont pour but de détacher le mortier résiduel du granulat original afin de pouvoir évaluer la masse respective des deux composantes du granulat recyclé.

La méthode de l'expansion thermique consiste à faire subir un choc thermique important au granulat recyclé dans le but de détacher le mortier résiduel attaché à celui-ci. La procédure suivie est décrite ci-dessous :

- Laver le matériau recyclé sur un tamis 5 mm.
- Sécher le matériau dans une étuve à 110°C pendant 24 heures.
- Retirer manuellement les impuretés (bois et enrobé bitumineux) et peser un échantillon de 2000 g.
- Placer l'échantillon dans l'eau 24 heures pour le saturer.
- Drainer l'échantillon et le placer dans un four à 500 °C pendant 2 heures.
- Retirer rapidement l'échantillon du four et plonger celui-ci dans l'eau froide (10 °C).
- Détacher manuellement les morceaux de mortier fragilisés avec un maillet en caoutchouc.
- Séparer les gros morceaux de mortier des granulats originaux.
- Sécher l'échantillon dans une étuve à 110 °C pendant 24 heures.
- Tamiser l'échantillon sur un tamis 5 mm.
- Peser la masse finale.

La méthode basée sur les cycles de gel/dégel consiste à plonger le granulat dans une solution de sulfate de sodium et de le soumettre à 5 cycles de gel/dégel journaliers dans le but de détacher le mortier résiduel attaché à celui-ci. Les granulats ont été soumis à un total de 35 cycles de gel et dégel pendant une semaine. Dans le cadre de cet essai, la teneur en mortier résiduel de deux fuseaux granulométrie a été déterminée. La procédure exacte suivie est décrite ci-dessous :

- Tamiser le matériau recyclé, séparer le fuseau 5-10 mm du fuseau 14-20 mm.
- Sécher le matériau dans une étuve à 110°C pendant 24 heures.
- Retirer manuellement les impuretés (bois et enrobé bitumineux) et peser un échantillon de 2000 g pour le fuseau 14-20 mm et 1000 g pour le fuseau 5-10 mm.
- Plonger l'échantillon dans une solution saturée de sulfate de sodium.
- Placer l'échantillon dans un tombeau en lui faisant subir 5 cycles journaliers de gel-dégel.
- Retirer l'échantillon du tombeau et drainer celui-ci.
- Détacher manuellement les morceaux de mortier fragilisés avec un maillet en caoutchouc.
- Séparer les gros morceaux de mortier des granulats originaux.
- Sécher l'échantillon dans une étuve à 110°C pendant 24 heures.
- Tamiser l'échantillon sur un tamis 5 mm.
- Peser la masse finale.

On calcule la teneur en mortier résiduel avec la formule suivante :

$$\% \text{ mortier résiduel} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100\%$$

On observe une perte de masse de 23,8% du matériau MR-2 en utilisant la méthode de l'expansion thermique. Cette valeur représente en théorie une teneur en mortier résiduel de 23,8%. Il a, cependant, été observé qu'il reste toujours du mortier résiduel attaché au granulat après l'essai suite à l'essai. Selon l'observation visuelle du granulat soumis à l'essai, la méthode de l'expansion thermique ne semble détacher que le deux tiers du mortier attaché à celui-ci. En considérant que l'essai a détaché deux tiers du mortier attaché au granulat, on trouve une teneur en mortier résiduel de l'ordre de 35% pour le granulat recyclé MR-2.

La méthode du gel/dégel semble plus efficace pour détacher le mortier du granulat original. En effet, une perte de masse de 28,3% a été observée lors de cet essai. Dans ce cas, comme dans le cas précédent, le mortier n'est pas totalement détaché du granulat, une observation

visuelle du granulat a, par contre, permis d'observer que la quantité de mortier attaché au granulat après l'essai est moindre que l'utilisation de la méthode d'expansion thermique. Il a été observé visuellement qu'approximativement 75% du mortier a été détaché du granulat en utilisant la méthode du gel/dégel. La Figure 21 présente le matériau MR-2 suite à la méthode du gel/dégel. On y voit à gauche les granulats originaux du granulat recyclé et à droite le mortier résiduel détaché de ceux-ci. La photo présente les deux fractions recueillies après l'essai sur la fraction 14-20mm du MR-2.



Figure 21: MR-2 après méthode de gel/dégel

En considérant que l'essai a détaché 75% (en divisant la perte de masse observée par 0.75) du mortier attaché au granulat, on trouve une teneur en mortier résiduel de l'ordre de 37% pour le granulat recyclé MR-2. Selon les résultats obtenus pour les deux essais, la teneur en mortier résiduel du matériau MR-2 analysé se situe vraisemblablement entre 35% et 40%.

4.2 Phase 2 – Étude paramétrique sur béton

Dans le cadre de la deuxième phase d'essais sur béton, l'impact de plusieurs paramètres a été évalué. Le principal paramètre évalué est la teneur en granulat recyclé de mélanges de béton. En effet, comme l'objectif principal de cette étude est d'évaluer la possibilité d'utiliser des granulats recyclés en remplacement du granulat naturel dans le béton, il est nécessaire de connaître l'impact que ce remplacement a sur les propriétés des bétons. Pour ce faire, cinq taux de remplacement ont été évalués. La teneur en granulat de béton recyclé varie de 0% pour le béton témoin à 75% pour le mélange utilisant seulement le matériau granulaire de classe MR-2 comme gros granulat de béton. Des mélanges ayant un remplacement massique et volumique du granulat naturel par un granulat recyclé ont été évalués.

Les autres paramètres évalués sont la résistance visée pour le béton (lié au rapport E/C utilisé) ainsi que le type de liant. Des mélanges de béton ayant des rapports E/C de 0,65 et 0,55 ont été préparés. Un mélange de rapport E/C de 0,55 et de teneur en résidus de béton de recyclé de 50% a aussi été préparé en utilisant un liant ternaire de type GUbFSF au lieu du ciment GU utilisé pour les autres mélanges.

Pour tous les bétons étudiés, une étape de pré saturation du granulat a été considéré lors du malaxage. Lors de cette étape, la moitié de l'eau du mélange est placé dans le malaxeur avec les granulats pendant 5 minutes. Le but de cette manipulation est de pré saturer partiellement les granulats afin de diminuer l'impact de la grande absorption des granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais du béton. Comme l'absorption du granulat recyclé est beaucoup plus grande que celle du granulat naturel, la quantité d'eau que celui-ci contient à l'état saturé est largement supérieure. La quantité d'eau totale a donc aussi été ajustée pour compenser l'eau absorbée par les granulats lors de cette étape de la préparation du béton. Pour les bétons ayant un rapport E/C de 0,65, cette quantité d'eau correspond à 80% de l'absorption des granulats moins la teneur en eau mesurée des granulats. Cette valeur a été diminuée à 65% pour les bétons de rapport E/C de 0,55 suite aux essais de vitesse d'absorption subséquents qui ont permis de mieux préciser les résultats.

4.2.1 Formulations des bétons

La phase 2 du plan expérimental, les essais sur béton, a eu lieu en trois étapes. Lors de la première étape, des bétons de rapport E/C de 0,65 ont été confectionnés. Cinq taux de remplacement distincts (0%, 20%, 35%, 50% et 75%) ont été évalués dans le cadre de cette étape. Les proportions pour 1 m³ de ces mélanges sont présentées au **Error! Reference source not found**. Les gâchées en laboratoire sont de 100 litres de béton. Ces gâches de bétons représentent des bétons de classe R-3, selon la norme CSA A23.1-09. Le rapport E/C maximal est donc de 0,65 pour ces mélanges. Le mélange a aussi été confectionné en incluant un agent entraîneur d'air pour satisfaire les exigences de la norme CSA A-23.1-09 pour un béton R-2. Les mélanges de béton préparé dans le cadre de ce projet peut donc être utilisé pour confectionner des dalles sur sol non exposées au gel/dégel (béton de classe R-3) ainsi que des fondations résidentielles (béton de classe R-2). La cible d'affaissement est de 80 ± 30 mm, la cible de teneur en air de 4 à 7% et la cible de résistance à la compression de 20 MPa à 28 jours. Lors de la formulation de ces bétons, la masse totale de granulat reste constante. Le détail des propriétés à l'état frais obtenues en laboratoire pour chaque gâchée de béton est présenté en annexe.

Tableau 11: Proportions des mélanges de rapport E/C de 0,65

Identification	Proportions pour 1m ³ (kg)				
	R-0,65-0%	R-0,65-20%	R-0,65-35%	R-0,65-50%	R-0,65-75%
Eau	178				
Ciment	324				
Granulat naturel	1125	825	600	375	0
MR-2	0	300	525	750	1125
Granulat total	1125	1125	1125	1125	1125
Sable	624	592	567	540	495
AEA (mL)	173				
Teneur en Air (%)	4 à 7				
Affaissement (mm)	80 ± 30				

Dans la deuxième étape, des bétons ayant un E/C de 0,55 ont été confectionnés. Les mêmes cinq taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé que lors de l'étape précédente ont été évalués. Un mélange ayant un taux de remplacement de 50% a aussi été confectionné en utilisant un liant ternaire de type GUBFSF au lieu du ciment GU utilisé pour les autres mélanges. Les proportions de ces mélanges sont présentées au Tableau 12.

Lors de cette étape, la résistance visée est de 25 MPa à 28 jours. L'affaissement visé a aussi été légèrement modifié. La cible d'affaissement est passée de 80 mm à 100mm. Ce changement a été effectué pour être plus près des propriétés des bétons résidentiels qui sont mis en place en chantier. Dans ces cas, l'affaissement visé est de 100 mm. La teneur en air visée est restée constante par rapport à l'étape précédente. La teneur en agent entraîneur d'air a par contre dû être ajustée pour obtenir le même entraînement d'air. Lors de la formulation de ces bétons, la masse totale de granulat reste constante.

Tableau 12: Proportions des mélanges de rapport E/C de 0,55

Identification	Proportions pour 1m ³ (kg)					
	R-0,55-0%	R-0,55-20%	R-0,55-35%	R-0,55-50%	R-0,55-75%	R-0,55-50% Ter C3
Eau	178					
Ciment	324					
Granulat naturel	1125	825	600	375	0	375
MR-2	0	300	525	750	1125	750
Granulat total	1125	1125	1125	1125	1125	1125
Sable	624	592	567	540	495	540
AEA (mL)	227					
Teneur en Air (%)	4 à 7					
Affaissement (mm)	100 ± 20					

Étant donné la grande quantité d'essais à effectuer lors de cette étape, deux gâches de 80 litres ont été préparées pour chacun des taux de remplacement évalués. Ces gâches ont été effectuées de manière consécutive avec les mêmes conditions de laboratoire dans le but d'obtenir des mélanges équivalents.

La dernière étape de formulation de béton vise à comparer le remplacement massique du granulat naturel par le granulat recyclé au remplacement volumique de celui-ci. Dans le cadre de cette étape, de nouveaux bétons de rapport E/C de 0,55 ont été confectionnés en utilisant une approche de volume de granulat constant. Ceux-ci sont identifiés par la lettre V pour les différencier des mélanges utilisant un remplacement massique préparé lors de l'étape précédente identifiée par la lettre M. Les proportions de ces mélanges sont présentées au Tableau 13. Le mélange témoin est aussi présenté à titre de comparaison. Ces mélanges ont les mêmes cibles d'affaissement, teneur en air et de résistance à la compression que lors de l'étape précédente.

Tableau 13: Proportions des mélanges de rapport E/C de 0,55 comparant le remplacement massique et volumique

Identification	Proportions pour 1m ³ (kg)				
	R-0,55-0%	R-0,55-20% M	R-0,55-50% M	R-0,55-20% V	R-0,55-50% V
Eau	178				
Ciment	324				
Granulat naturel	1125	825	375	802	348
MR-2	0	300	750	291	696
Granulat total	1125	1125	1125	1093	1044
Sable	624	592	540	624	624
AEA (mL)	227				
Teneur en Air (%)	4 à 7				
Affaissement (mm)	100 ± 20				

4.2.2 Essais sur béton frais

Les essais effectués sur le béton frais sont l'affaissement, la masse volumique et la teneur en air du béton frais. Les essais d'affaissement du béton frais, la mesure de la masse volumique du béton frais ainsi que la teneur en air du béton frais ont été effectués selon les normes CSA A23.2-5C, CSA A23.2-6C et CSA A23.2-4C respectivement.

Dans le cadre de ce projet de recherche, le teneur en air visé lors de la réalisation des mélanges est de 4 à 7%. Ces teneurs en air correspondent aux limites prescrites par la norme CSA A23.1-09 pour un béton de classe R-2.

4.2.3 Résistance à la compression

Les essais des résistances à la compression ont été effectués selon la norme CSA A23.2-9C. Des éprouvettes de béton de 100 mm de diamètre par 200 mm de hauteur ont été utilisées. Les résistances à la compression ont été évaluées à 3, 7 et 28 jours ou 3, 7, 28, 56 et 91 jours selon les mélanges. Pour chaque âge, deux (3 et 7 jours) ou trois (28, 56 et 91 jours) éprouvettes ont été soumises à l'essai de résistance à la compression. Les résultats présentés sont la moyenne des résultats obtenus à cet âge.

Les premiers essais de résistance à la compression ont été effectués sur les bétons ayant un rapport E/C de 0,65. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 22.

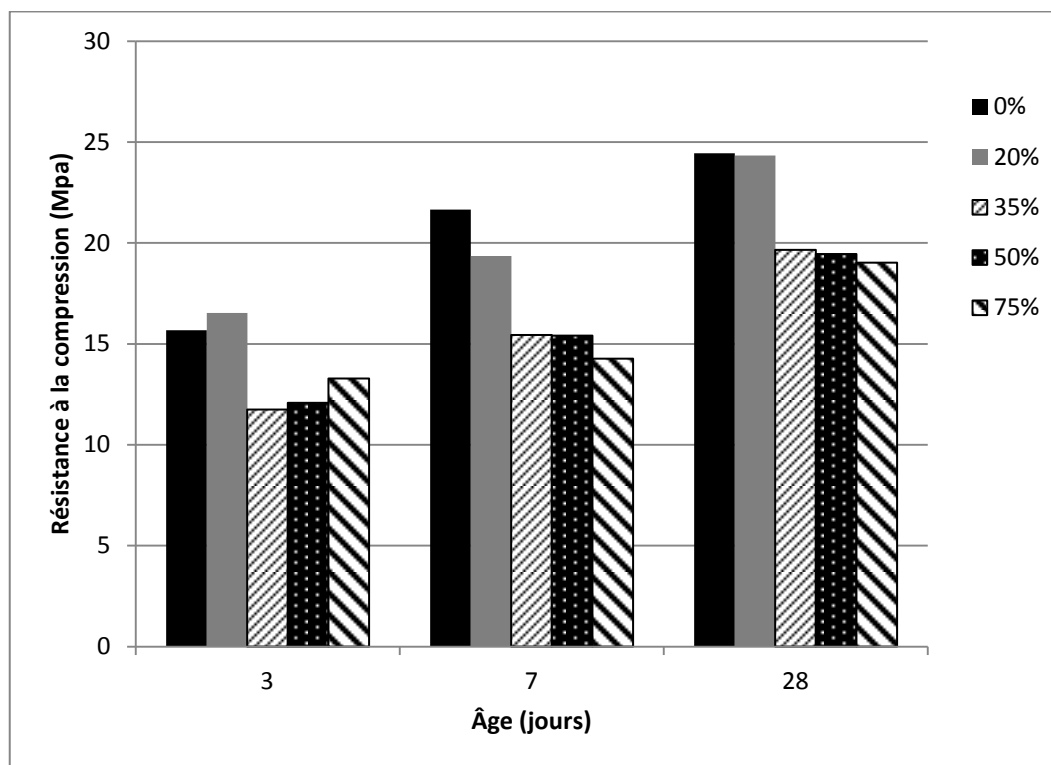


Figure 22: Résistances à la compression des mélanges de rapport E/C de 0,65

Dans le cas de ces mélanges, on obtient des résistances à la compression à 28 jours de l'ordre de 24 MPa (24,5 et 24,3) pour le mélange témoin et le mélange ayant un taux de remplacement de 20%, alors qu'on observe des résistances de l'ordre de 19 MPa (19,7, 19,4 et 19,0) pour les mélanges ayant des taux de remplacement de 35%, 50% et 75%). Cette démarcation semble aussi être présente à 3 et 7 jours.

Les essais de résistance à la compression suivants ont été effectués sur les mélanges ayant un rapport E/C de 0,55. En plus des cinq taux de remplacement, la résistance à la compression d'un mélange préparé avec un liant GUBFSF et ayant un taux de remplacement du granulats naturel par un granulats recyclés de 50% a été évaluée. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 23.

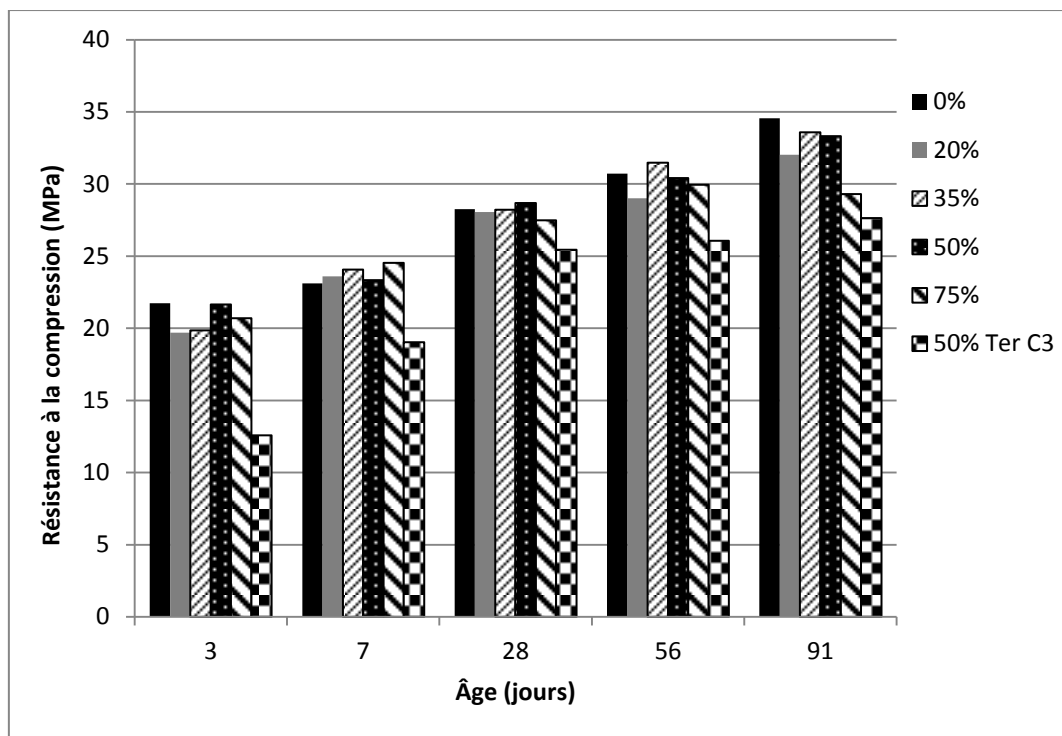


Figure 23: Résistances à la compression des mélanges de rapport E/C de 0,55

Les résistances à la compression à 28 jours de ces mélanges sont de l'ordre de 28 MPa (28,3, 28,1, 28,2 et 28,7 et 27,5) pour les mélanges utilisant un ciment GU, alors qu'on obtient une résistance de 25,5 MPa à 28 jours pour le mélange utilisant le GUbFSF. On constate ici que, pour ces mélanges, le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé semble avoir peu d'impact sur la résistance à la compression. À tous les âges, les résistances à la compression des mélanges utilisant un ciment GU sont similaires. La seule exception est la résistance à la compression à 91 jours du mélange ayant un taux de remplacement de 75% qui est significativement plus basse que la moyenne des mélanges, et même que des résistances obtenues à 56 jours pour ce même mélange. Le mélange préparé avec un liant de type GUbFSF a une résistance inférieure au mélange ayant le même taux de remplacement (50%) confectionné avec un ciment GU à tous les âges. Bien que la différence de résistance entre ces deux mélanges soit moins prononcée après 7 jours, elle reste tout de même significative.

Finalement, des essais de résistance à la compression ont été effectués sur des mélanges ayant rapport E/C de 0,55 et un volume total de granulat constant. Des mélanges ayant des taux de remplacement de 20% et 50% ont été soumis aux essais de résistance à la compression. Les résultats des résistances à la compression de ces mélanges, identifiés 20% V et 50% V, ainsi

que des mélanges ayant les mêmes taux de remplacement étudiés précédemment sont présentés sur la Figure 24.

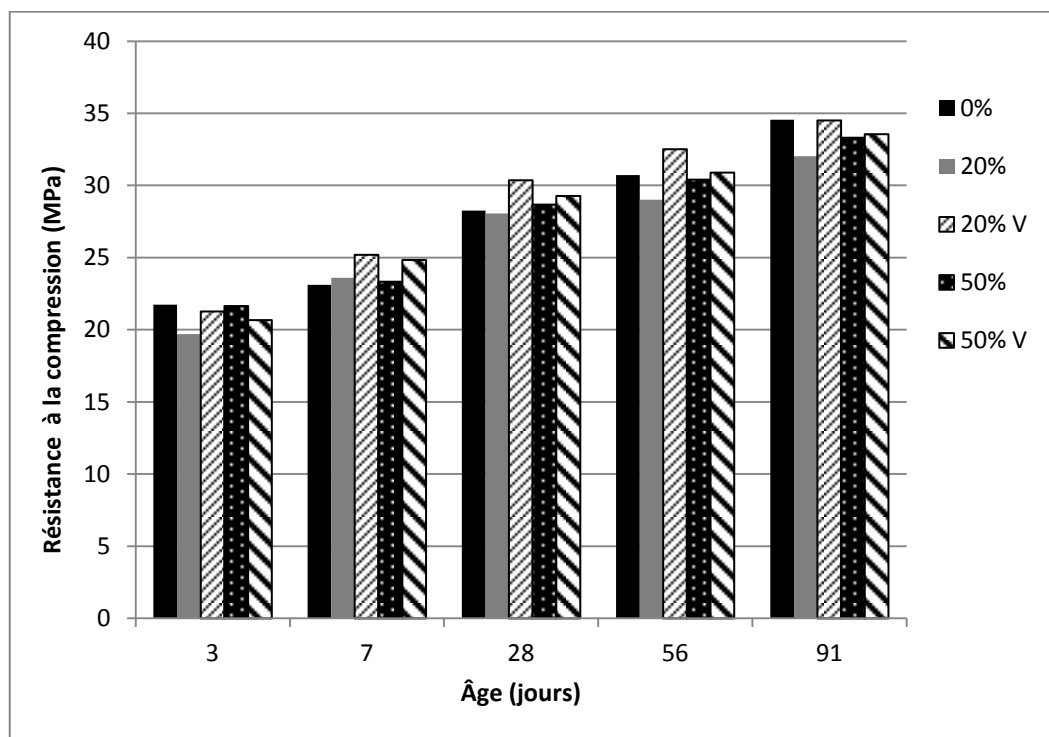


Figure 24: Résistances à la compression des mélanges de rapport E/C de 0,55 (remplacement volumique)

Dans le cas de ces mélanges, on obtient des résistances à la compression à 28 jours de l'ordre de 30 MPa (30,4 et 29,3). Ces résistances sont légèrement plus élevées que les résistances observées pour les mélanges ayant les mêmes taux de remplacement pour lesquels un remplacement massique du granulat naturel a été utilisé. Ces mélanges ont des résistances à la compression à 28 jours de l'ordre de 28 MPa (28,1 et 28,7). Cette tendance semble moins marquée pour les mélanges ayant des taux de remplacement de 50%. La différence de résistance entre les deux mélanges ayant des taux de remplacement de 20% est, par contre, significative.

4.2.4 Résistance à la traction

Les essais des résistances à la traction par fendage (Brésilien) ont été effectués selon la norme CSA A23.2-13C. Des éprouvettes de béton de 100mm de diamètre par 200mm de hauteur ont été utilisées. Les résistances à la traction ont été évaluées à des âges de 3, 7 et 28 jours ou 3, 7,

28, 56 et 91 jours selon les mélanges. Pour chaque âge, deux (3 et 7 jours) ou trois (28, 56 et 91 jours) éprouvettes ont été soumises à l'essai de résistance à la traction indirecte (Brésilien). Les résultats présentés sont la moyenne des résultats obtenus à cet âge. Les premiers essais de résistance à la traction ont été effectués sur les mélanges ayant un rapport E/C de 0,65. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 25.

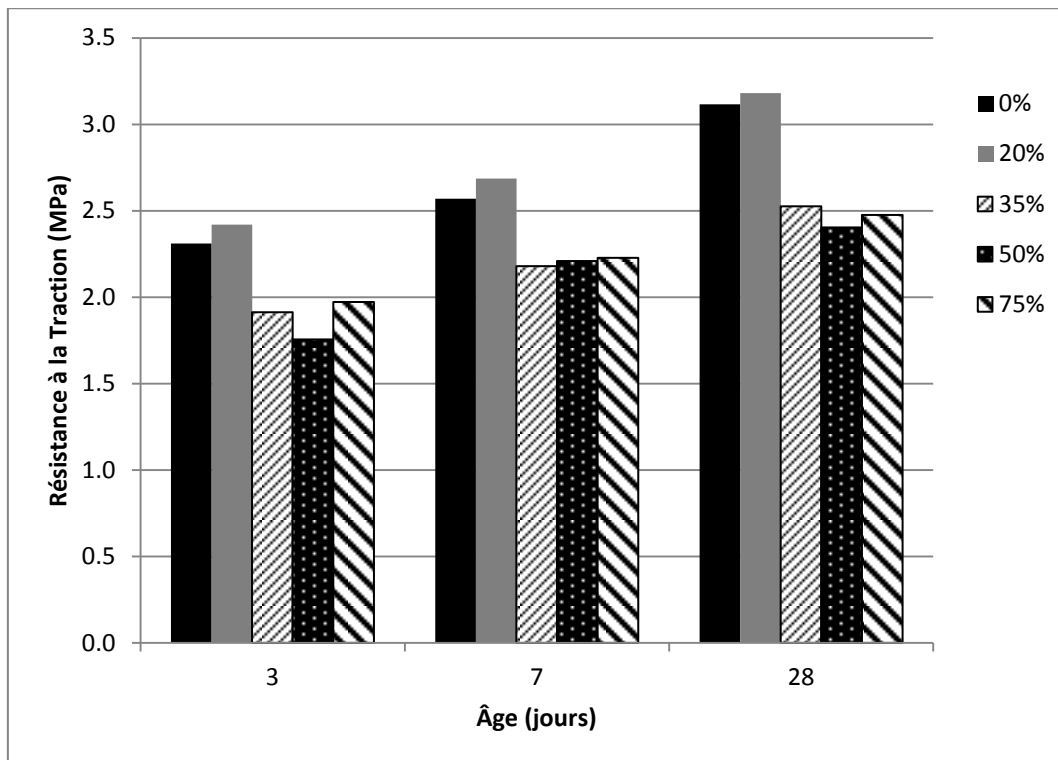


Figure 25: Résistances à la traction des mélanges de rapport E/C de 0,65

Dans le cas de ces mélanges, on obtient des résistances à la traction à 28 jours de 3,1 et 3,2 MPa respectivement pour le mélange témoin et le mélange ayant un taux de remplacement de 20%, alors que pour les mélanges ayant des taux de remplacement de 35%, 50% et 75% on observe des résistances de 2,5, 2,4 et 2,5 MPa sont obtenues. Cette différence marquée au niveau des résistances pour les mélanges ayant un plus haut taux de remplacement est aussi observable aux plus jeunes âges.

Les essais de résistance à la traction suivants ont été effectués sur les mélanges proportionnés avec un rapport E/C de 0,55. En plus des cinq taux de remplacement, la résistance à la traction d'un mélange utilisant un liant GUbFSF et ayant un taux de remplacement du granulat naturel

par un granulat recyclé de 50% a été évalué. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 26.

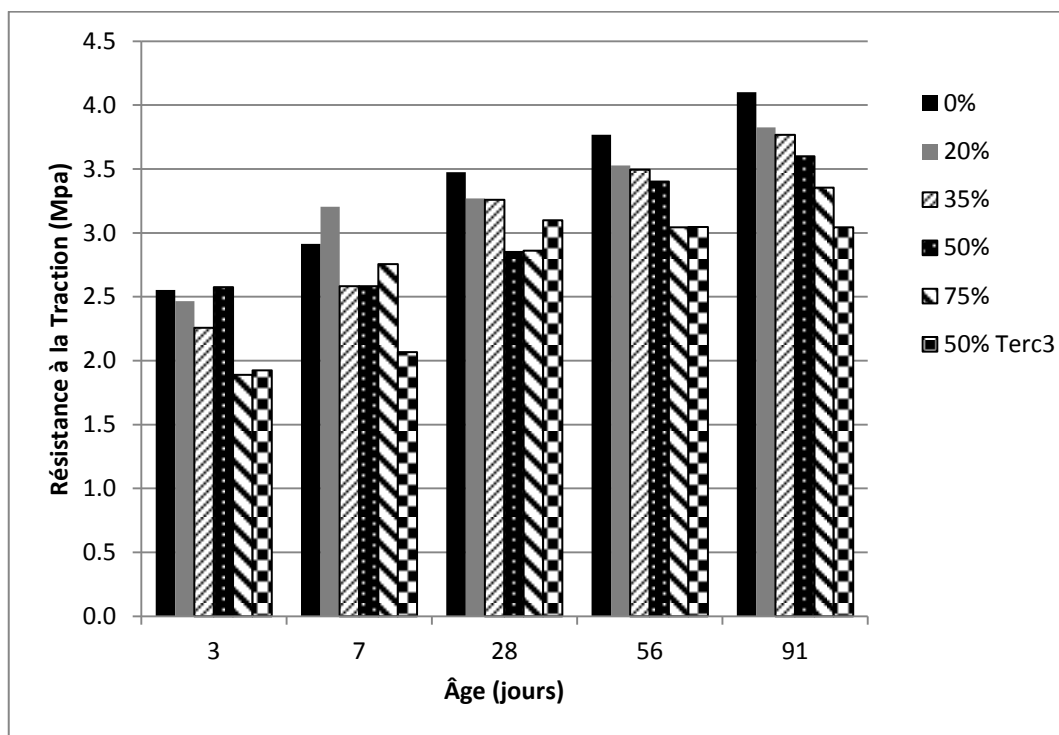


Figure 26: Résistances à la traction des mélanges de rapport E/C de 0,55

Dans le cas de ces mélanges, on obtient des résistances à la traction à 28 jours respectivement de 3,5, 3,3, 3,3, 2,8 et 2,9 MPa pour les mélanges utilisant un ciment GU et des taux de remplacement de 0, 20, 35, 50 et 75%, alors qu'on obtient une résistance à la traction de 3,1 MPa à 28 jours pour le mélange utilisant le GUbFSF. Bien que la tendance soit moins claire pour les résistances à jeune âge, les résultats présentés à la Figure 26 montrent que la résistance à la traction diminue lorsque le taux de remplacement augmente. Les résultats à 91 jours illustrent bien cette tendance. Le mélange utilisant un liant de type GUbFSF a une résistance inférieure au mélange ayant le même taux de remplacement (50%) utilisant un ciment GU à tous les âges, à l'exception des résultats obtenus à 28 jours. Dans ce cas, la résistance à la traction observée est de 3,1 MPa pour le mélange utilisant le liant GUbFSF alors qu'elle est de 2,8 MPa pour le mélange utilisant un ciment GU.

Finalement, des essais de résistance à la traction ont été effectués sur des mélanges proportionnés avec un rapport E/C de 0,55 et un le volume total de granulat constant. Des

mélanges ayant des taux de remplacement de 20% et 50% ont été soumis aux essais de résistance à la traction. Les résultats des résistances à la traction de ces mélanges, identifiés 20% V et 50% V, ainsi que des mélanges ayant les mêmes taux de remplacement étudiés précédemment sont présentés sur la Figure 27.

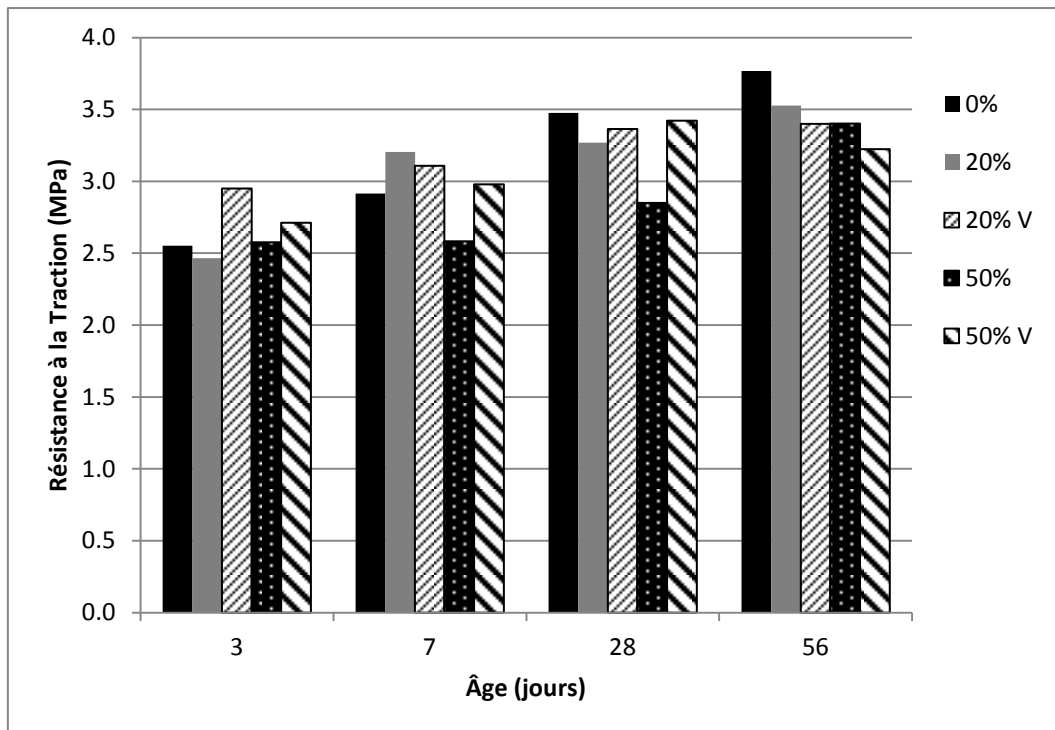


Figure 27: Résistances à la traction des mélanges de rapport E/C de 0,55 (remplacement volumique)

Dans le cas de ces mélanges, on obtient des résistances à la traction à 28 jours de 3,4 MPa. Les résultats de résistance à la traction obtenus pour les mélanges ayant des taux de remplacement de 20% sont similaires à tous les âges sauf à trois jours où l'on observe une plus grande résistance du mélange utilisant un remplacement volumique des granulats. Dans le cas des mélanges ayant des taux de remplacements de 50% cette tendance est observable à tous les âges sauf à 56 jours où on observe un résultat légèrement supérieur pour le mélange ayant un remplacement massique des granulats.

4.2.5 Résistance à la flexion

Les essais des résistances à la flexion ont été effectués selon la norme CSA A23.2-8C. Des prismes de béton 100 mm x 100 mm x 400 mm ont été utilisés. Les résistances à la

compression ont été évaluées à 7 et 28 jours ou à 7, 28, 56 et 91 jours selon les mélanges. Pour chaque âge, deux prismes de béton ont été soumis à l'essai de résistance à la flexion. Les résultats présentés sont la moyenne des résultats obtenus.

Les premiers essais de résistance à la flexion ont été effectués sur les mélanges préparés avec un rapport E/C de 0,65. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 28.

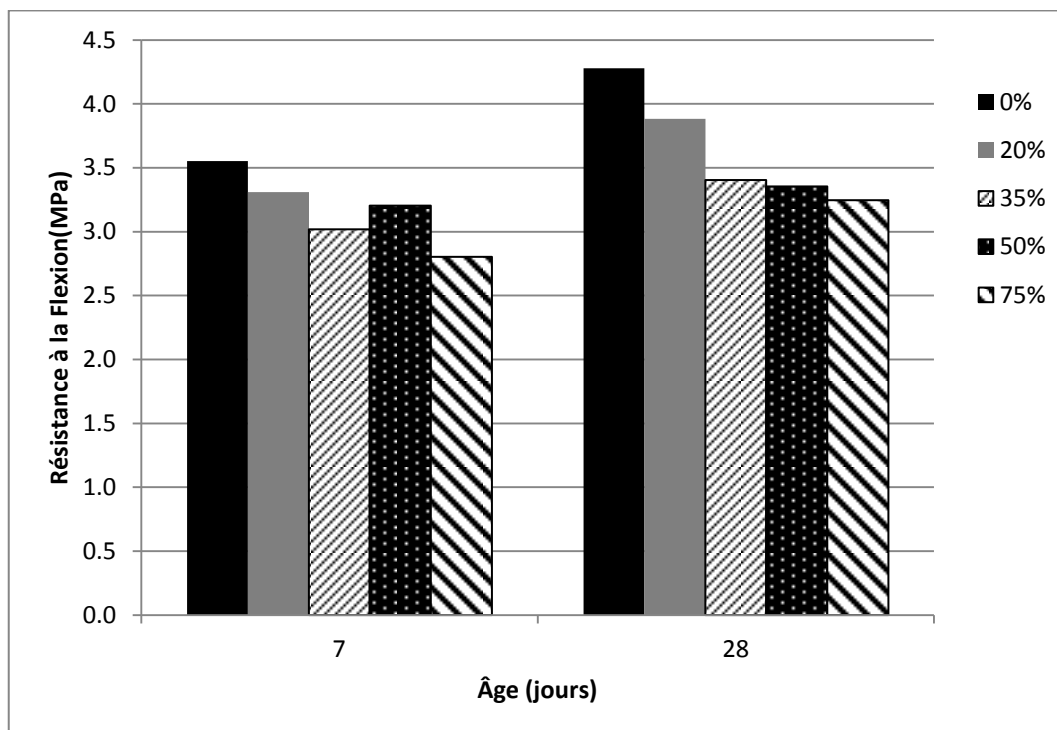


Figure 28: Résistances à la flexion des mélanges de rapport E/C de 0,65

Dans le cas de ces mélanges, on obtient des résistances à la flexion à 28 jours de 4,3, 3,9, 3,4, 3,4 et 3,2 MPa pour les taux de remplacement de 0%, 20%, 35%, 50% et 75% respectivement. Les résultats obtenus indiquent que la résistance à la flexion diminue en fonction de l'augmentation du taux de remplacement. La résistance à la flexion du mélange ayant un taux de remplacement de 20% est, par contre, beaucoup plus près de celle du mélange témoin que de celles des autres mélanges ayant un plus haut taux de remplacement. Une tendance similaire est observable pour les résultats obtenus à 7 jours.

Les essais de résistance à la flexion suivants ont été effectués sur les bétons proportionnés avec un rapport E/C de 0,55. En plus des cinq taux de remplacement, la résistance à la flexion

d'un mélange fabriqué avec un liant GUBFSF et ayant un taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé de 50% a été évaluée. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 29.

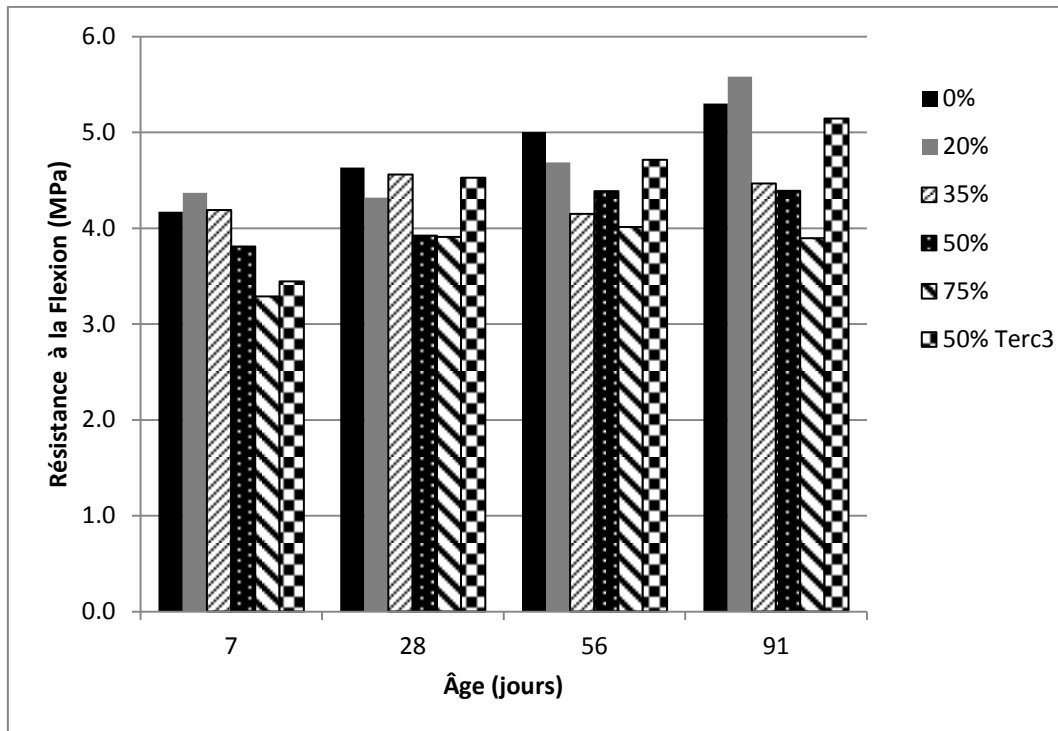


Figure 29: Résistances à la flexion des mélanges de rapport E/C de 0,55

Dans le cas de ces mélanges, on obtient des résistances à la flexion à 28 jours de 4,6, 4,3, 4,6, 3,9 et 3,9 MPa pour les mélanges utilisant un ciment GU et des taux de remplacement de 0, 20, 35, 50 et 75% respectivement, alors que l'on obtient une résistance à la flexion de 4,5 MPa à 28 jours pour le mélange utilisant le GUBFSF. Bien que la tendance soit moins claire pour l'essai de résistance à la traction, les résultats présentés à la Figure 29 semblent indiquer que la résistance à la flexion diminue avec le taux de remplacement. Certains résultats obtenus vont, cependant, contre cette tendance. Par exemple, la résistance à 91 jours du mélange ayant un taux de remplacement de 20% est de 5,6 MPa. Cette résistance est plus élevée que celle observée pour le témoin qui est de 5,3 MPa. Le mélange préparé avec un liant de type GUBFSF a une résistance inférieure au mélange ayant le même taux de remplacement (50%) et incorporant un ciment GU à 7 jours. Cet écart de résistance semble, par contre, s'inverser à

56 jours, moment à partir duquel les résistances à la flexion de ce mélange sont plus élevées que celle du mélange proportionné avec le ciment GU.

4.2.6 *Module d'élasticité*

Les essais de module d'élasticité statique ont été effectués selon la norme ASTM C469/C469M-10. Des éprouvettes de béton de 100 mm de diamètre par 200 mm de hauteur ont été utilisées. Les modules d'élasticité ont été évalués à 28 et 56 jours. Pour chaque âge, deux éprouvettes de béton ont été soumises à l'essai. Les échantillons ont été soumis à trois cycles de chargement. Seuls le deuxième et le troisième chargement ont été utilisés pour calculer le module d'élasticité de l'échantillon. Le module d'élasticité est obtenu en calculant la moyenne de la pente du deuxième et du troisième chargement. Les coefficients de régression linéaires des pentes obtenues sont tous supérieurs à 0,99.

Les essais de module d'élasticité ont été effectués sur les mélanges ayant un rapport E/C de 0,55. En plus des cinq taux de remplacement, le module d'élasticité d'un mélange incorporant un liant GUbFSF et ayant un taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé de 50% a été évalué. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 30. Ceux-ci représentent la moyenne des modules d'élasticité obtenus pour les deux échantillons soumis à l'essai.

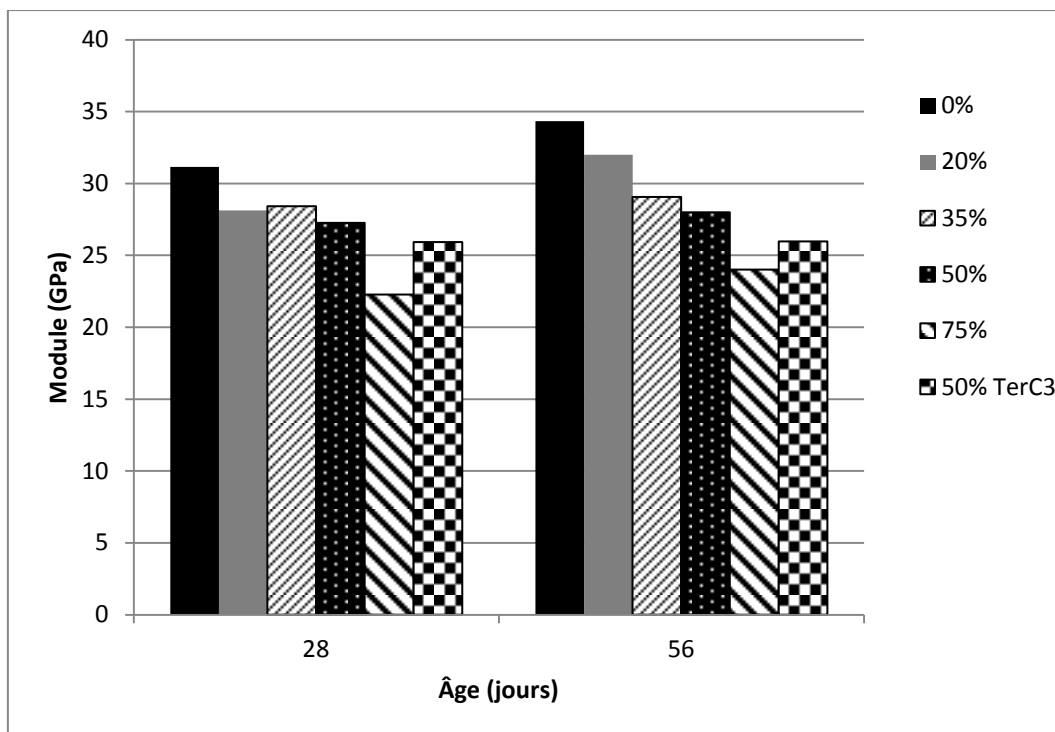


Figure 30: Module d'élasticité des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55

Les modules d'élasticité obtenus à 28 jours sont de 31,2, 28,1 , 28,4 , 27,3 et 22,3 GPa pour les mélanges préparés avec un ciment GU et des taux de remplacement de 0, 20, 35, 50 et 75% respectivement. Dans le cas du méllange préparé avec un liant GUbFSF un module d'élasticité de 25,91 GPa est obtenu à 28 jours. Dans ce cas, le module d'élasticité semble diminuer en fonction de l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par un granulat recyclé. La même tendance est observée sur la Figure 30 pour les résultats à 56 jours. On observe aussi que les modules d'élasticité obtenus pour le mélange préparé avec un liant de type GUbFSF sont légèrement inférieurs à ceux obtenus pour le mélange ayant le même taux de remplacement (50%) et un ciment GU.

4.2.7 Retrait de séchage

Les essais de retrait de séchage ont été effectués selon la norme ASTM C157/C157M-08. Des prismes de béton 50 mm x 50 mm x 285 mm ont été utilisés. La longueur initiale des échantillons a été mesurée à 24 heures de la confection, après le démoulage des prismes de béton. Les échantillons ont, par la suite, été placés dans l'eau pendant 28 jours avant la prochaine mesure. Les lectures subséquentes ont eu lieu après 1 jour, 7 jours, 14 jours, 28

jours, 8 semaines, 16 semaines et 32 semaines dans une chambre à température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et humidité relative de $50 \pm 4\%$. Les résultats obtenus pour les bétons préparés avec un rapport E/C de 0,65 sont présentés sur la Figure 31.

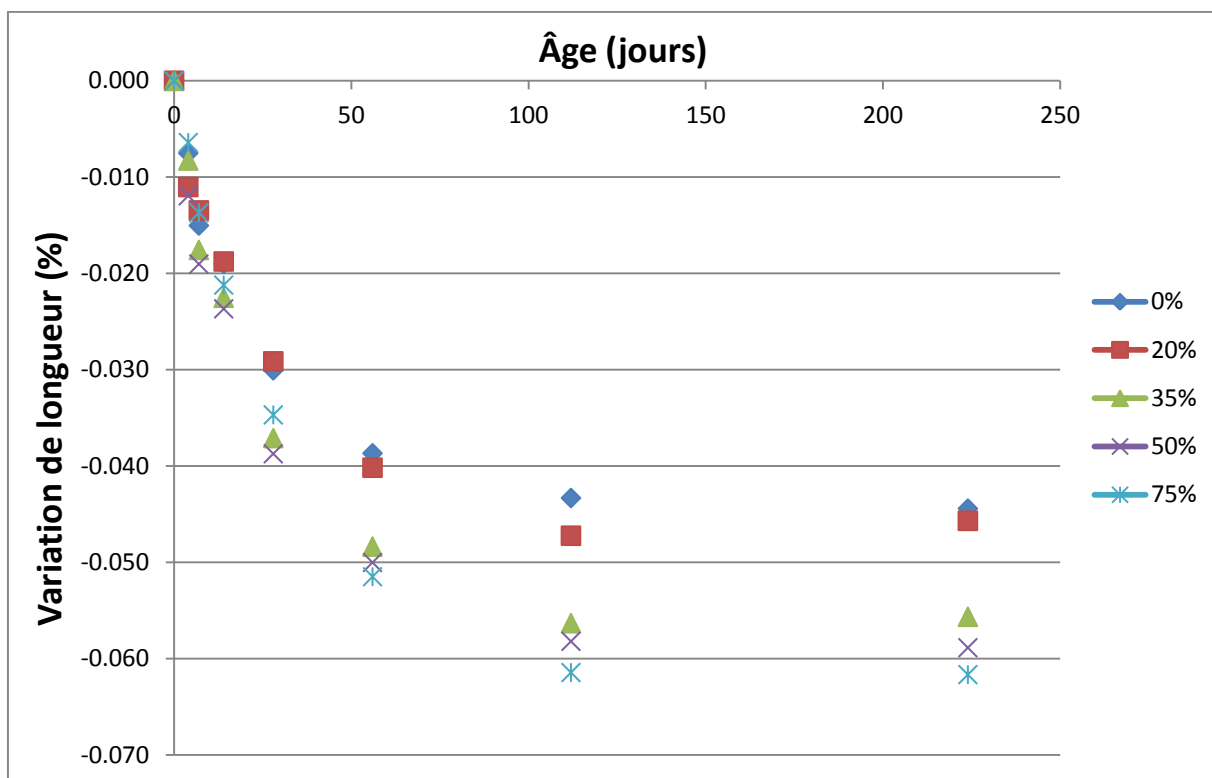


Figure 31: Retrait de séchage des mélanges ayant un rapport E/C de 0,65

Les résultats de retrait présentés sur la Figure 31 indiquent que le retrait de séchage augmente quand le taux de remplacement du granulat recyclé par un granulat naturel augmente. Cette tendance est bien visible au niveau des résultats obtenus à 112 et 224 jours (16 et 32 semaines). L'impact d'un taux de remplacement de 20% semble par contre minime si on le compare avec les autres taux de remplacement plus élevés.

Les mesures du retrait de séchage suivantes ont été effectuées sur les mélanges ayant un rapport E/C de 0,55. En plus des cinq taux de remplacement, le retrait de séchage d'un mélange utilisant un liant GUBFSF et ayant un taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé de 50% a été évalué. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 32.

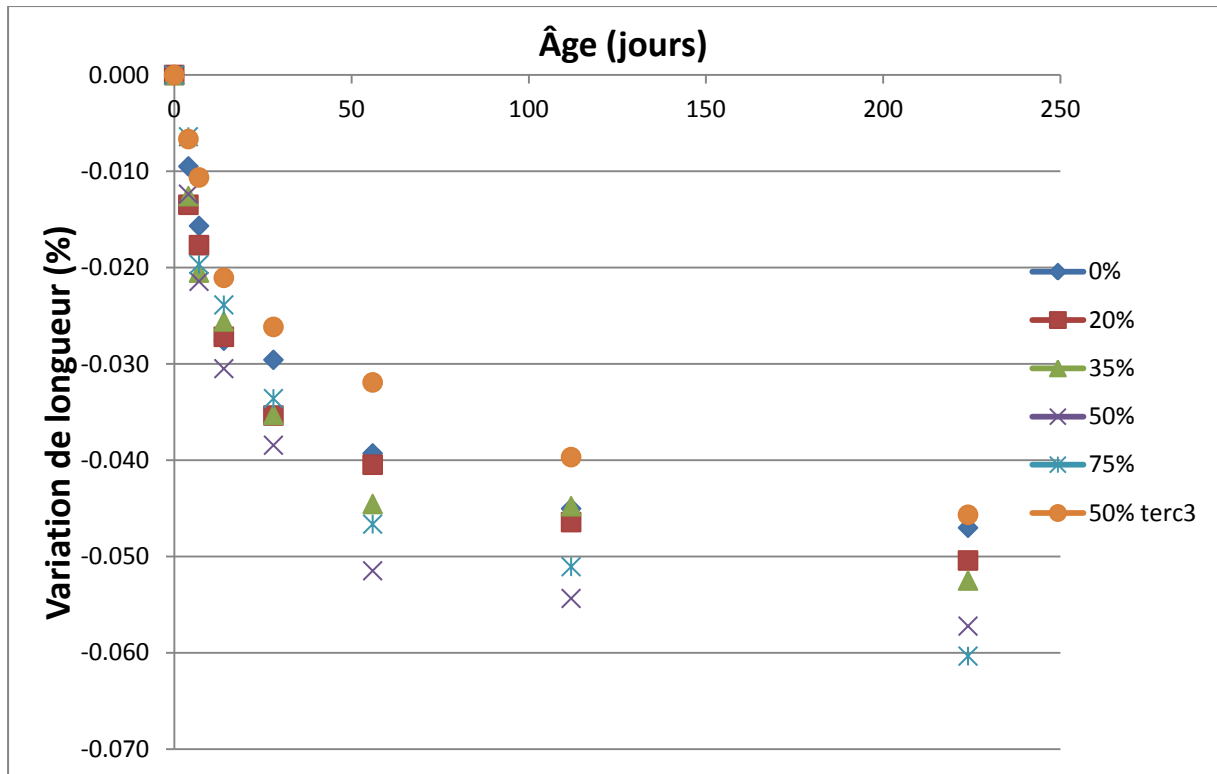


Figure 32: Retrait de séchage des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55

Les résultats de retrait présentés sur la Figure 32 indiquent que le retrait de séchage augmente quand le taux de remplacement du granulat recyclé par un granulat naturel augmente. Cette tendance est bien visible sur les résultats obtenus à 224 jours (32 semaines). Le mélange fabriqué avec le liant GUBFSF semble aussi avoir un retrait significativement plus bas que le même mélange utilisant un ciment GU. Le retrait observé ce béton est même plus faible que le retrait de séchage observé pour le béton témoin.

4.2.8 Résistance aux cycles de gel/dégel

Les essais de résistance au gel/dégel ont été effectués selon la norme ASTM C666/C666M-03. Des prismes de béton 75 mm x 75 mm x 355 mm ont été utilisés. Après une cure humide de 14 jours, les prismes de béton ont été placés dans un tombeau où ils ont subi 5 cycles quotidiens de gel/dégel (-18°C à 4°C). La longueur, la masse et le module d'élasticité dynamique des échantillons ont été mesurés à des intervalles inférieurs à 36 cycles de gel/dégel jusqu'à l'atteinte de 300 cycles ou le bris de l'échantillon. On considère qu'il y a bris de l'échantillon quand le module d'élasticité dynamique atteint 60% de sa valeur initiale.

Selon la norme ASTM C666/C666M-03, le facteur de durabilité est calculé en utilisant la formule suivante :

$$DF = PN/M$$

Ou :

DF = Le facteur de durabilité de l'échantillon.

P = Le module d'élasticité dynamique relatif après N cycles (en pourcentage).

N = Le nombre de cycles après lequel le module d'élasticité dynamique atteint la valeur minimale entraînant la fin de l'essai ou lorsque le nombre de cycles spécifiés est atteint

M = Le nombre de cycles spécifié après lequel l'essai est arrêté

Le module d'élasticité dynamique relatif est un rapport entre la fréquence transversale fondamentale initiale et la fréquence transversale fondamentale mesurée après N cycles. Celle-ci est exprimée en pourcentage.

Les essais de résistance aux cycles de gel/dégel ont été effectués sur les mélanges à rapport E/C de 0,55. En plus des cinq taux de remplacement, la résistance aux cycles de gel/dégel d'un mélange fabriqué avec un liant GUbFSF et ayant un taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé de 50% a été évaluée. Les facteurs de durabilité calculés à partir des résultats obtenus sont présentés sur la Figure 33.

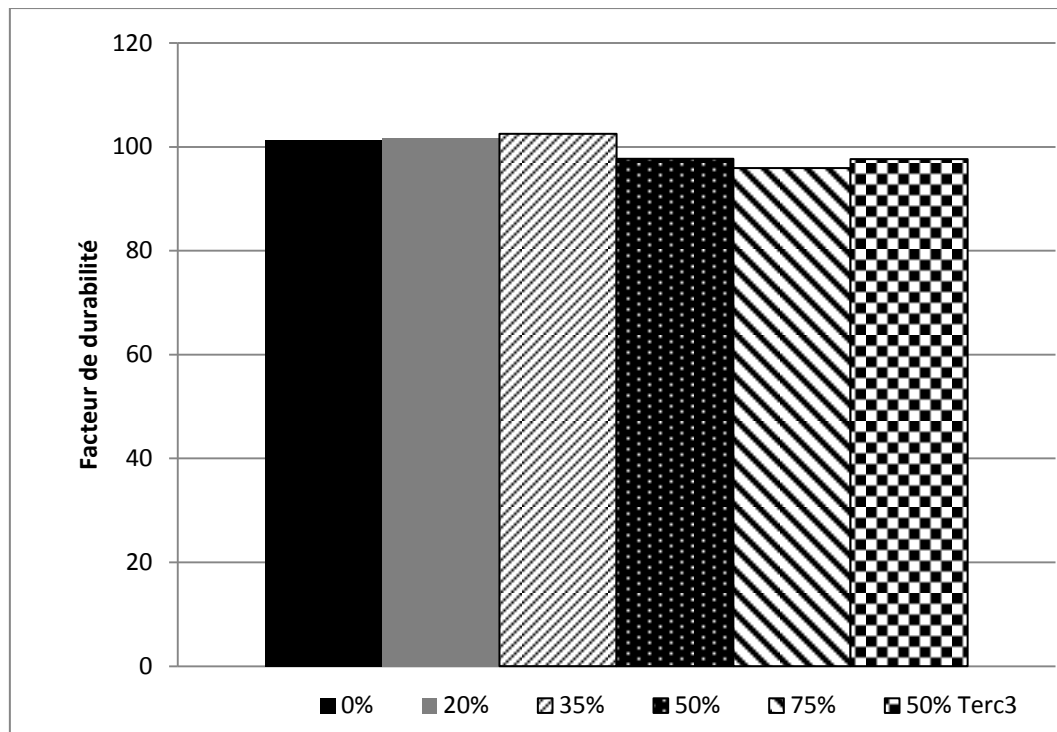


Figure 33: Facteur de durabilité des mélanges ayant un rapport E/C de 50%

Les facteurs de durabilité obtenus après 300 cycles de gel/dégel sont de 101, 102, 103, 98 et 96 pour les mélanges préparés avec un ciment GU et du taux de remplacement de 0, 20, 35, 50 et 75% respectivement. Dans le cas du béton utilisant le GUbFSF on obtient un facteur de durabilité de 98 après 300 cycles. Tous les essais se sont terminés après 300 cycles. Les facteurs de durabilité observée ne sont pas affectés par le taux de remplacement ou le type de liant pour ces mélanges.

4.2.9 Perméabilité aux ions chlorures

Les essais de perméabilité aux ions chlorures ont été effectués selon la norme ASTM C1202-10. Des éprouvettes de béton de 100 mm de diamètre par 200 mm de hauteur ont été utilisées. Dans le cadre de cet essai, les 50 mm du haut et du bas de chaque éprouvette ont été utilisés. Selon la norme ASTM C1202-10, cet essai consiste à mesurer la quantité de courant passant par un échantillon de béton de 50 mm d'épaisseur et de 100 mm de diamètre pendant une période de 6 heures. Une différence de potentiel de 60 V est maintenue entre les deux extrémités de l'échantillon. Une de ces extrémités est placée dans une solution de chlorure de sodium alors que l'autre est placée dans une solution d'hydroxyde de sodium. La charge totale

ayant passé par l'échantillon, en coulombs, est corrélée avec la résistance à la pénétration des ions chlorure du spécimen. Dans le cadre de cette étude, les essais de perméabilité aux ions chlorures ont été effectués après 56 jours de mûrissement des échantillons.

Les premiers essais de perméabilité aux ions chlorure ont été effectués sur les bétons ayant un rapport E/C de 0,55. En plus des cinq taux de remplacement, la perméabilité aux ions chlorure d'un mélange incorporant un liant GUbFSF et ayant un taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé de 50% a été évalué. Les perméabilités aux ions chlorure obtenues sont présentées sur la Figure 34.

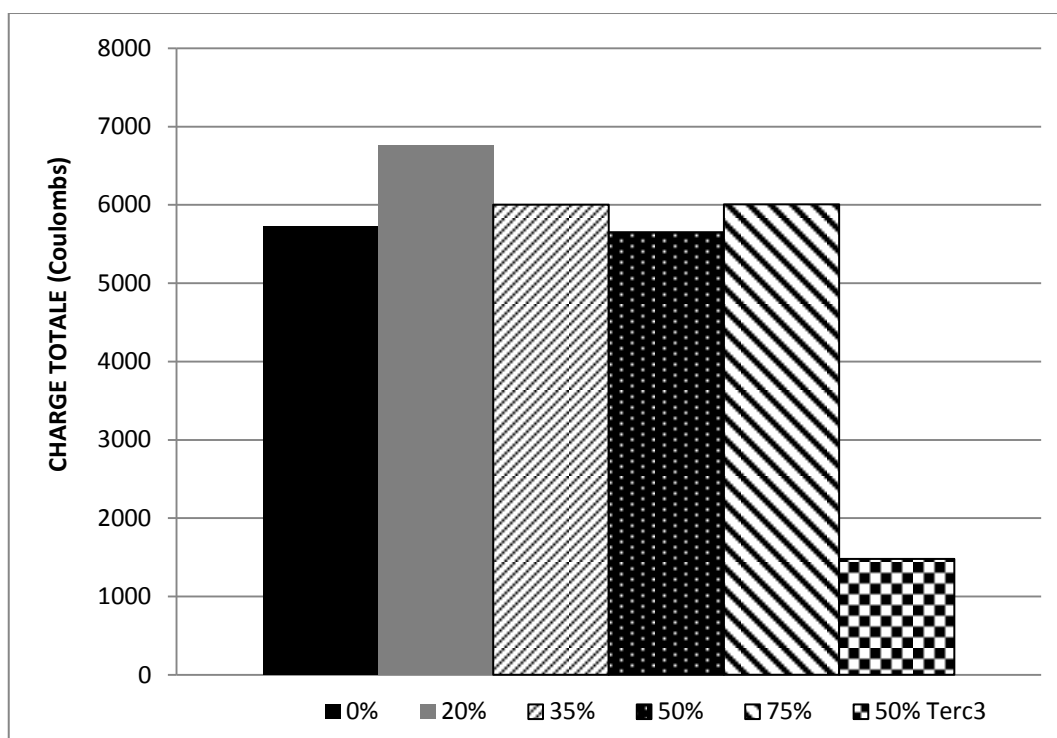


Figure 34: Perméabilité aux ions chlorure de mélanges ayant un rapport E/C de 0,55

Les charges totales obtenues à 56 jours sont de 5730, 6765, 6000, 5650 et 6005 Coulombs pour les mélanges proportionnés avec un ciment GU (taux de remplacement de 0, 20, 35, 50 et 75% respectivement) alors qu'une charge totale de 1478 coulombs à 56 jours pour le mélange contenant le GUbFSF. Dans ce cas, tous les mélanges utilisant le ciment GU ont une perméabilité aux ions chlorure élevée (> 4000 coulombs) selon la norme ASTM C1202-10 alors que le mélange utilisant le GUbFSF a une perméabilité aux ions chlorure basse (entre 1000 et 2000 Coulombs).

Des mesures de perméabilité aux ions chlorures ont été effectuées sur des mélanges de rapport E/C de 0,55 ayant une formulation où le volume total des granulats est constant. Des mélanges ayant des taux de remplacement de 20% et 50% ont été soumis aux essais de perméabilité aux ions chlorures. Les charges en coulombs de ces mélanges, identifiés 20% V et 50% V, ainsi que des mélanges ayant les mêmes taux de remplacement évalués précédemment sont présentés sur la Figure 35.

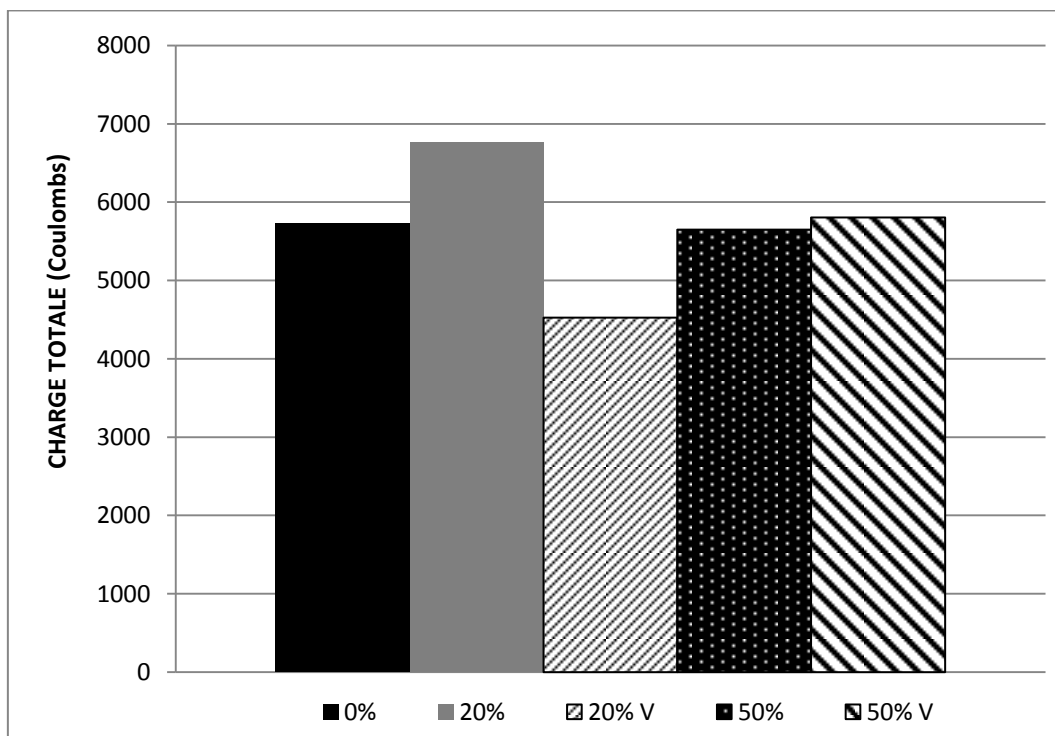


Figure 35: Perméabilité aux ions chlorure de mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 (remplacement volumique)

Les mélanges ayant des taux de remplacement volumique de 20% et 50%, on obtient des charges de 4525 et 5806 Coulombs à 56 jours respectivement. Ces mélanges, comme les mélanges ayant un remplacement massique des granulats naturels ont une perméabilité aux ions chlorure élevée (> 4000 coulombs) selon de la norme ASTM C1202-10.

4.2.10 Perméabilité à l'eau

Dans le cadre de ce projet de recherche, des essais de perméabilité à l'eau ont été effectués sur les mélanges de béton ayant des taux de remplacement variant de 0% à 75%. Deux éprouvettes de béton de 150 mm de diamètre par 300 mm de hauteur ont été prélevées par

mélanges pour cet essai. Cet essai vise à mesurer la perméabilité à l'eau d'un échantillon de béton. La perméabilité à l'eau du béton peut, par la suite, être corrélée à la durabilité de celui-ci. Dans le cadre de l'essai, un trou d'environ 27 mm a été foré au milieu des éprouvettes de béton, tel qu'illustré à la Figure 36.

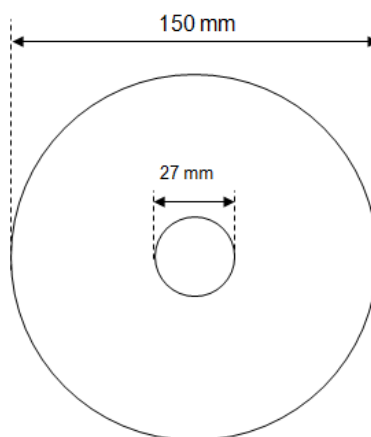


Figure 36: Éprouvette de béton pour essai de perméabilité à l'eau

L'échantillon est par la suite surfacé et placé dans une cellule d'acier inoxydable. Un disque de caoutchouc est placé au-dessus et sous l'échantillon, bloquant ainsi le trou au haut de l'échantillon et imperméabilisant le bas de l'échantillon pour que l'eau ne puisse circuler que par le trou de 27 millimètres au bas de l'échantillon. La cellule d'acier est, par la suite, refermée et remplie d'eau. Une fois la cellule d'acier pleine d'eau, une pression de 700 psi est appliquée progressivement. On mesure, par la suite, l'écoulement d'eau qui percole à travers le béton pour aller s'écouler par le trou du bas de l'échantillon, connecté à un cylindre gradué. Des mesures sont prises à chaque heure ou deux heures s'il y a peu d'écoulement.

On obtient la valeur de la perméabilité à l'eau de l'échantillon en calculant la pente de la courbe de la quantité d'eau ayant percolé à travers le béton en fonction du temps pour un écoulement en état d'équilibre (quand la pression est constante à 700 psi et que l'écoulement est stable dans le temps). Dans le cas des mélanges de béton ayant un rapport E/C de 0,55 évalués dans le cadre de cette étude, la durée de l'essai est d'une semaine par échantillons. L'installation utilisée pour faire ces essais au laboratoire béton de l'Université de Sherbrooke

permet de soumettre quatre échantillons à l'essai en même temps, tel qu'illustré sur la Figure 37.



Figure 37: Montage expérimental de l'essai de perméabilité à l'eau

Les premiers essais ont été effectués sur les échantillons ayant subi un mûrissement de 56 jours en chambre humide. Ces essais se sont par contre révélés peu concluants puisqu'aucun écoulement n'a lieu, même après une semaine dans l'eau sous une pression de 700 psi. Une diminution du niveau d'eau dans le cylindre gradué a même été observée dans plusieurs cas. Une hypothèse avancée pour expliquer ce phénomène était que la cure humide pendant 56 jours ne permettait pas de saturer complètement les pores béton. Les pores du béton se remplissaient donc d'eau au lieu que celle-ci percole à travers l'échantillon pour être recueillie dans le cylindre gradué lors de l'essai. Les échantillons ont donc été submergés dans l'eau pour une durée de trois semaines avant les essais suivants.

Les résultats de la deuxième phase d'essais de perméabilité à l'eau des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 sont présentés au Tableau 14. La perméabilité des échantillons soumis aux essais y est présentée en millilitres d'eau par heure. Les essais sont identifiés par la date du début de ceux-ci, le mélange ainsi que le numéro d'échantillon associé à ceux-ci.

Tableau 14: Perméabilité à l'eau des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55

Date	Identification de l'échantillon	Perméabilité des mélanges (mL/h)					
		0%	20%	35%	50%	50% terc3	75%
29/04/2013	#1	0.090	-	-	0.013	-	-
	#2	*Non concluant	-	-	*Non concluant	-	-
06/05/2013	#1	-	0.249	-	-	0.000	-
	#2	-	*Non concluant	-	-	0.008	-
13/05/2013	#1	-	-	0.018	-	-	0.026
	#2	-	-	*Non concluant	-	-	0.046
10/06/2013	#1	0.000	0.009	-	0.007	-	-
	#2	-	*Non concluant	-	-	-	-

On observe que plusieurs résultats sont identifiés comme non concluants. Ceci est relié à des problèmes rencontrés avec l'installation utilisée pour les essais. Par exemple, il y a eu plusieurs problèmes avec l'étanchéité de la cellule d'acier une fois l'essai commencé. Lorsqu'on constate une fuite, l'essai en question doit être arrêté puisqu'il n'est pas possible d'enlever la pression sur celui-ci pour pouvoir remplacer la cellule d'acier sans arrêter les trois autres essais. De plus, certains problèmes ont été rencontrés avec le niveau d'eau dans les cylindres gradués. Il est arrivé à quelques reprises qu'on constate que toute l'eau s'est drainée du cylindre en plein milieu de l'essai. Dans ces cas, il n'a pas été possible de calculer une perméabilité avec les résultats obtenus.

Il ne semble pas y avoir de lien entre la perméabilité à l'eau des mélanges et le taux de remplacement pour les résultats présentés au Tableau 14. Le mélange utilisant le liant GUbFSF a, par contre, une perméabilité moins élevée que les mélanges utilisant un liant GU, mais cette tendance n'est pas claire étant donné la grande variabilité des résultats.

CHAPITRE 5 Analyse des résultats et discussions

5.1 Phase 1: Essais de caractérisation des granulats

Les résultats présentés au CHAPITRE 4 montrent que le matériau granulaire MR-2 utilisé dans le cadre de cette étude respecte généralement les exigences de la norme CSA A23.1 pour un gros granulat de béton. Les essais sur le matériau recyclé de classe MR-2 ont aussi permis de mieux comprendre la différence du processus d'absorption d'eau dans le temps du granulat recyclé par rapport au granulat naturel. Il a aussi été possible d'estimer que le mortier résiduel représente entre 35 et 40% de la masse totale du matériau MR-2.

5.1.1 *Analyse granulométrique*

L'analyse granulométrique effectuée sur le matériau recyclé montre que celui-ci respecte généralement les exigences granulométriques de la CSA A23.2-2A pour un gros granulat de béton. Certains échantillons présentent, par contre, un pourcentage passant au tamis 5 mm légèrement trop élevé. Cette non-conformité est, par contre, corrigée lorsqu'on diminue la teneur en résidus de béton recyclés à 50% en ajoutant au mélange de granulats naturels. Les seuls mélanges de granulats dont la distribution granulométrique est à l'extérieur des exigences de la norme la CSA A23.2-2A sont les mélanges ayant une teneur en résidus de béton recyclés de 75% et les mélanges de granulats composés à 100% du MR-2.

5.1.2 *Essais de résistance à l'abrasion Los Angeles*

Les essais de résistance à l'abrasion Los Angeles montrent que le matériau de classe MR-2 respecte les exigences de la norme CSA A23.2-16A en ce qui concerne le pourcentage de perte observée. On observe en effet des pertes de masse de 31,8% et de 26,6% pour les deux fuseaux granulométriques soumis à l'essai, bien en deçà de la limite de 50% prescrite par la norme CSA A23.1. Les pertes de masse observées sont, par contre, plus grandes que celle généralement associée à un granulat naturel. À titre d'exemple, la perte de masse du mélange des granulats naturels utilisé est de l'ordre de 15%. Ceci est, par contre, consistant avec ce qui est observé dans la littérature où les granulats recyclés montrent des pertes de masse plus élevées [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009; Padmini *et al.*, 2009; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001; Tabsh et Abdelfatah, 2009].

5.1.3 *Mesure de la masse volumique et absorption*

Les essais de mesure de masse volumique et d'absorption montrent que le matériau recyclé MR-2 a une masse volumique et une absorption similaires à ce qui est présenté dans la littérature. La masse volumique mesurée de 2450 kg/m^3 se compare bien avec les valeurs observées pour un granulat recyclé selon Chakradhara [Chakradhara Rao *et al.*, 2011] alors que l'absorption mesurée de 5,7% se situe dans le fuseau des valeurs observées selon Tam [Tam *et al.*, 2008].

5.1.4 *Mesure de la vitesse d'absorption*

Les mesures de vitesse d'absorption de granulats effectués dans le cadre de cette étude montrent que la vitesse d'absorption relative du granulat recyclé est plus rapide que celle du granulat naturel. En effet, l'absorption relative mesurée à 5 minutes est de l'ordre de 15% pour le granulat naturel et de l'ordre de 65% pour le granulat recyclé. Les valeurs d'absorption relative observées à 30 minutes sont de l'ordre de 40% pour le granulat naturel et de l'ordre de 80% pour le granulat recyclé. Ces résultats s'expliquent par le fait que la grande porosité des granulats recyclés est plus rapidement accessible à l'eau et fait en sorte que non seulement l'absorption totale du granulat est plus élevée, mais aussi que la vitesse d'absorption relative est plus grande [Ferreira *et al.*, 2011].

Bien que les essais effectués dans le cadre de cette étude donnent une bonne indication de l'absorption dans le temps des granulats analysés, il est possible d'améliorer davantage la méthode d'essai pour augmenter la précision des résultats. L'ajout de la manipulation supplémentaire consistant à remuer l'échantillon de granulat entre les mesures a permis d'obtenir des résultats plus près de la réalité des conditions d'absorption du granulat placé dans un malaxeur lors de la préparation du béton. En effet, cette manipulation permet aux bulles d'air prisonnières du granulat de s'échapper. Au préalable, celles-ci restaient prisonnières des granulats et causaient un biais sur la masse mesurée lors de l'essai. Il est, cependant, possible d'améliorer la méthode d'introduction des granulats dans l'eau lors de l'essai. La technique utilisée lors de cette étude consiste à descendre manuellement le panier d'acier contenant les granulats dans l'eau et de commencer à prendre les mesures quand ceux-

ci entrent en contact avec l'eau. Il est possible de modifier le montage utilisé pour faciliter le placement des granulats dans l'eau et ainsi diminuer la turbulence de l'eau due à l'introduction de ceux-ci. Ceci permet d'avoir une lecture de la masse initiale plus précise. La différence observée entre les deux courbes sur le matériau recyclé présentées dans les Figure 19 et Figure 20 peut s'expliquer, en partie, par ce phénomène. On observe une absorption relative à 5 minutes de 62% sur la Figure 19 alors que celle-ci est de 69% sur la Figure 20. La différence entre ces deux lectures est donc causée en partie par le mouvement de l'eau lors de la mesure initiale en plus de la variabilité intrinsèque des granulats recyclés.

5.1.5 Mesure de la teneur en mortier résiduel

Suite aux essais de mesure de la teneur en mortier résiduelle effectués dans le cadre de cette étude, il a été calculé que la teneur en mortier résiduel du matériau recyclé MR-2 se situe vraisemblablement entre 35 et 40% de la masse totale du granulat recyclé. Ce calcul est basé sur les pertes de masse obtenue suite aux essais utilisant la méthode de l'expansion thermique et la méthode du gel/dégel. Dans les deux cas, il a été impossible de détacher tout le mortier résiduel du granulat original formant le granulat recyclé. Il a donc été nécessaire d'estimer visuellement la teneur en mortier résiduel toujours attaché aux granulats après les essais. La teneur en mortier résiduel correspondant aux deux méthodes a été déterminée en multipliant le pourcentage de perte de masse suite aux essais à la proportion du mortier détaché estimée visuellement. Cette analyse visuelle des granulats, effectuée suite aux essais, a permis de déterminer que la méthode de l'expansion thermique détache approximativement les deux tiers du mortier résiduel alors que la méthode du gel/dégel permet de détacher approximativement les trois quarts du mortier résiduel. En multipliant ces proportions et les pourcentages de pertes de masses observées dans le cadre des deux essais (24% pour la méthode de l'expansion thermique et 28% pour la méthode du gel/dégel) il est possible d'obtenir la teneur en mortier résiduel du granulat. On obtient des teneurs en mortier résiduel du matériau MR-2 de 35 et 37% pour la méthode du choc thermique et la méthode du gel/dégel respectivement.

Il est surprenant de constater que la méthode de l'expansion thermique semble beaucoup moins efficace que ce qui est rapporté dans littérature. En effet, soumettre le granulat au choc

thermique et détacher manuellement le mortier fragilisé attaché à celui-ci ne détache que les deux tiers du mortier résiduel alors que selon Butler [Butler *et al.*, 2011], presque tout le mortier est détaché du granulat suite à l'essai. Il a aussi été observé que la méthode de l'expansion thermique détache très peu de mortier suite au choc thermique. Le mortier est fragilisé par l'essai et doit être détaché manuellement du granulat. L'essai de gel/dégel semble, par contre, avoir une efficacité similaire à ce qui est observé dans la littérature. On observe qu'environ 75% du mortier résiduel est détaché du granulat dans le cadre de ce projet alors que cette valeur se situe entre 80% et 90% dans la littérature [Butler *et al.*, 2011]. Dans ce cas, les cycles de gel/dégel ont permis de détacher une fraction importante du mortier résiduel. Le reste du mortier fragilisé a, par la suite, été détaché manuellement.

La méthode du gel/dégel est donc plus efficace que la méthode de l'expansion thermique pour détacher le mortier résiduel du granulat original. Bien que la méthode du gel/dégel permet d'estimer la proportion de mortier résiduel formant le granulat recyclé, cette méthode ne permet pas, cependant, de détacher tout le mortier résiduel et laisse donc place à une certaine interprétation en ce qui a trait à la proportion exacte de mortier attaché au granulat après l'essai.

5.2 Phase 2: Essais sur béton

Suite aux essais sur granulats, des mélanges de béton utilisant les granulats recyclés ont été préparés et échantillonnés. Les premiers mélanges effectués dans le cadre de cette étude sont des mélanges ayant un rapport E/C de 0,65. Ces mélanges correspondent à des bétons de classe R-3 selon la norme CSA A23.1 auxquels un agent entraîneur d'air a été ajouté pour respecter les exigences de la classe de béton R-2 en ce qui a trait à la teneur en air du béton. Les propriétés à l'état frais visées sont une teneur en air de 4 à 7% ainsi qu'un affaissement de 80 ± 30 mm.

Des mélanges de béton ayant un rapport E/C de 0,55 ont aussi été préparés dans le cadre de cette étude. Bien que ceux-ci représentent des mélanges de béton de meilleure qualité, ce qui est normalement observé dans la construction résidentielle, il semble que les exigences de la norme CSA en ce qui concerne les bétons résidentiels sont portées à changer. En effet, selon

la nouvelle version de CSA A23.1, les dalles de sols de construction résidentielles auraient comme exigences un rapport E/C maximal de 0,55 et une résistance à la compression minimale de 25 MPa. C'est donc dans cette optique de changement au niveau des exigences concernant les bétons résidentiels que la décision de préparer des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 a été prise. Les propriétés à l'état frais visées pour ces mélanges sont une teneur en air de 4 à 7% ainsi qu'un affaissement de 100 ± 20 mm. La décision d'augmenter l'affaissement a été prise pour obtenir des mélanges de béton similaire à ce qui est observé sur des chantiers de construction résidentielle. Bien que des affaissements aussi bas que 50 mm soient en théorie permis, les bétons utilisés dans la construction résidentielle ont une cible d'affaissement de 100 mm pour permettre une meilleure mise en place. Le changement à la cible d'affaissement vise alors à refléter cette réalité.

Le principal paramètre évalué dans le cadre des essais sur béton est l'impact du taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé. Ainsi, pour les deux rapports E/C évalués, les taux de remplacement de 0%, 20%, 35%, 50% et 75% ont été évalués. Dans le cas des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 l'utilisation d'un liant ternaire de type GUbFSF a été évaluée. Dans ce cas, un mélange de béton ayant un rapport E/L de 0,55 et un taux de remplacement de 50% a été utilisé. Les 6 premiers mélanges ayant un rapport E/C 0,55 ont été préparés en remplaçant le granulat naturel par une masse équivalente de granulat recyclé. Deux mélanges supplémentaires ont, par la suite, été préparés en remplaçant le granulat naturel par le granulat recyclé en fonction de leurs volumes pour évaluer si on observe une différence dans les propriétés du béton formulé en utilisant ces deux méthodes. Ces mélanges ont été préparés pour des taux de remplacement de 20% et 50%.

5.2.1 Bétons de rapport E/C de 0,65

Dans le cadre de la confection des premiers mélanges de béton, cinq gâchées de 100 litres ont été préparées. Pour chacun de ces gâchés, l'affaissement, la teneur en air et la masse volumique du béton plastique ont été mesurés. En plus des essais sur béton frais, la résistance à la compression, la résistance à la traction indirecte, la résistance à la flexion ainsi que le retrait de séchage ont été évalués pour ces mélanges.

(1) *Essais sur béton à l'état frais*

L'affaissement et la teneur en air du béton ne semblent pas affectés par le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé. Pour tous les mélanges, ces propriétés sont restées dans les limites prescrites sans qu'il n'y ait de variation en fonction du taux de remplacement. À première vue ceci peut sembler surprenant puisque plusieurs chercheurs ont observé une baisse de l'affaissement causée par la grande absorption du granulat recyclé [Butler *et al.*, 2011; Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Lopez-Gayarre *et al.*, 2009]. Il est, par contre, important de noter que la pré-saturation partielle des granulats a dans ce cas permis de contrer l'effet négatif de la grande absorption des granulats recyclés en remplissant la porosité des granulats d'eau. L'eau du mélange que le granulat recyclé aurait normalement absorbée lors du malaxage est donc restée disponible pour lubrifier le mélange et ainsi maintenir l'affaissement initial. La teneur en air entraînée n'est, par contre, pas affectée par l'utilisation de granulats recyclés [Malesev *et al.*, 2010; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001].

On observe une légère diminution de la masse volumique du béton frais quand le taux de remplacement du granulat recyclé augmente. La masse volumique à l'état frais du mélange R-0,65-0% est de 2335 kg/m³ alors que celle du mélange R-0,65-75% est de 2140 kg/m³. La baisse de la masse volumique est due à la masse volumique plus faible des granulats recyclés par rapport au granulat naturel. Les granulats représentant une grande fraction des composantes du béton peuvent avoir un effet sur la masse volumique du béton frais en fonction de la masse volumique de ceux-ci.

(2) *Résistance à la compression*

La résistance à la compression a été mesurée à 3, 7 et 28 jours pour les mélanges ayant un rapport E/C de 0,65. Pour tous les âges, la résistance à la compression est affectée par le taux de remplacement. À 28 jours, on voit une perte de l'ordre de 20% de la résistance à la compression pour le plus haut taux de remplacement de 75%. Cette valeur de perte de résistance est dans la limite supérieure de ce qui est généralement observé dans la littérature pour des bétons similaires. On observe généralement une perte de résistance à la compression de 10 à 20% [de Oliveira et Vazquez, 1996; Etxeberria *et al.*, 2007; Rahal, 2007] pour les plus hauts taux de remplacement du granulat naturel (75% à 100%).

Le mélange ayant un taux de remplacement de 20% a, par contre, une résistance équivalente au mélange témoin. On voit une démarcation claire entre la résistance à la compression du mélange R-0,65-20% et du mélange R-0,65-35%. La résistance à la compression à 28 jours chute de 24,3 MPa à 19,7 MPa pour les mélanges R-0,65-20% et R-0,65-35% respectivement. Un taux de remplacement de 20% est donc le taux de remplacement optimal pour ne pas affecter la résistance à la compression.

(3) Résistance à la traction indirecte

La résistance à la traction indirecte a été mesurée à 3, 7 et 28 jours pour les mélanges ayant un rapport E/C de 0,65. L'effet du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé sur la résistance à la traction est très similaire à ce qui a été observé pour la résistance à la compression. Pour tous les âges, la résistance à la traction est affectée par le taux de remplacement. À 28 jours, on voit une perte de l'ordre de 20% de la résistance à la traction pour le plus haut taux de remplacement de 75%. Cette valeur de perte de résistance est légèrement supérieure à ce qui est observé dans la littérature. On observe généralement une perte de résistance à la traction de 10 à 15% [Tabsh et Abdelfatah, 2009] pour le remplacement total des granulats naturels.

Le mélange ayant un taux de remplacement de 20% a, par contre, une résistance équivalente au mélange témoin. On voit une démarcation claire entre la résistance à la traction du mélange R-0,65-20% et du mélange R-0,65-35%. La résistance à la traction après 28 jours chute de 3,2 MPa à 2,5 MPa pour les mélanges R-0,65-20% et R-0,65-35% respectivement. Un taux de remplacement de 20% est donc le taux de remplacement optimal pour ne pas affecter la résistance à la traction.

(4) Résistance à la flexion

La résistance à la flexion a été mesurée à 7 et 28 jours pour les mélanges ayant un rapport E/C de 0.65. Pour tous les âges, la résistance à la flexion est affectée par le taux de remplacement. Les résultats présentés dans la section 4.2.5 montrent une diminution graduelle de la résistance à la flexion quand le taux de remplacement augmente. À 28 jours, on voit une perte de l'ordre de 25% de la résistance à la flexion avec un taux de remplacement de 75%. Cette

valeur perte de résistance est supérieure celles observée dans la littérature. On observe généralement des pertes de résistance à la flexion de l'ordre de 10% [de Oliveira et Vazquez, 1996] à 13% [Topcu et Sengel, 2004] pour les plus hauts taux de remplacement du granulat naturel.

Dans le cas de la résistance à la flexion, le mélange ayant un taux de remplacement de 20% n'a pas une résistance égale au mélange témoin. Les mélanges R-0,65-20% et R-0,65-35% présentent des résistances à la flexion de 3,9 MPa et 3,4 MPa, ce qui représente des pertes de résistance respective de 10% et 20% par rapport au béton témoin ayant une résistance à la flexion de 4,3 MPa. Bien que le taux de remplacement de 20% ait un impact sur la résistance à la flexion pour ces mélanges, celui-ci est relativement faible par rapport aux pertes de résistances observées pour les taux de remplacement plus élevés. Un taux de remplacement de 20% est donc le taux de remplacement optimal pour minimiser l'impact sur la résistance à la flexion.

(5) Retrait de séchage

Le retrait de séchage de prismes de béton a été mesuré pour chacun des mélanges ayant un rapport E/C de 0,65. Bien que la tendance est moins claire pour les mesures prises à un plus bas âge, on observe une corrélation entre l'augmentation du taux de remplacement et le retrait de séchage. Cette tendance est claire quand l'on observe les résultats obtenus après 16 et 32 semaines. Celle-ci a été souvent observée dans la littérature [Guo et Wang, 2012; Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008; Li, 2008; Malesev *et al.*, 2010; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001; Tam et Tam, 2007]. Les deux facteurs responsables du plus grand retrait observé lors de l'utilisation de granulats recyclés sont la présence de mortier résiduel et l'eau supplémentaire ajoutée pour remplir la porosité du granulat [Li, 2008].

Les mesures de retrait présentées à la section 4.2.7 démontrent que les mélanges ayant des taux de remplacement supérieurs présentent un retrait significativement plus élevé que le mélange témoin. Le mélange ayant un taux de remplacement de 20% présente, par contre, un retrait de séchage similaire au béton témoin. Ce taux de remplacement a aussi été identifié par Tam [Tam et Tam, 2007] comme n'ayant pas d'impact significatif sur le retrait de séchage.

Selon les résultats obtenus, le taux de remplacement de 20% est le taux de remplacement optimal dans le cas de ce mélange si on cherche à minimiser l'impact des granulats recyclés sur le retrait de séchage.

(6) Résumé des performances des mélanges ayant un rapport E/C de 0,65

Pour les mélanges présentés dans cette section, l'impact du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé sur les propriétés à l'état frais et le retrait de séchage est similaire à ce qui est observé dans la littérature. Les résistances mécaniques mesurées sont, par contre, plus basses que ce qui est généralement observé pour des mélanges similaires. En effet, la perte de résistance due à l'augmentation du taux de remplacement semble plus élevée pour ces mélanges de béton. Les résistances à la traction et à la flexion en particulier semblent plus affectées par le remplacement du granulat naturel par le matériau MR-2 par rapport à ce qui est présenté dans la littérature pour des taux de remplacement similaires.

Une cause possible pour ces pertes de résistance plus élevées est la présence d'enrobé bitumineux dans le granulat utilisé. Le fait que le granulat recyclé utilisé dans le cadre de cette étude est composé à 5% de résidus d'enrobé bitumineux est possiblement la source d'une certaine perte de résistances mécaniques par rapport aux bétons utilisant un granulat composé seulement de résidus de bétons et de granulats naturel. Il est probable que les résidus d'enrobé bitumineux représentent un point de faiblesse dans la structure du béton et, par le fait même, diminuent la résistance des échantillons de béton soumis aux essais de résistance mécanique. L'inspection visuelle d'échantillons après leurs ruptures a permis de recueillir de l'information appuyant cette hypothèse. Dans plusieurs cas, il a été observé que les fractures ayant mené à la rupture des échantillons passant par des morceaux d'enrobé bitumineux. Dans ces cas, le morceau d'enrobé bitumineux est divisé en deux sur les faces de l'échantillon brisé comme on peut l'observer sur les Figure 38 et Figure 39 qui présente des échantillons de béton recyclé suite aux essais de résistance à la traction indirecte et à la flexion. On voit très bien sur ces figures que pour ces essais, la fracture de l'échantillon s'effectue en passant au milieu des morceaux d'enrobé bitumineux puisque les morceaux d'enrobé bitumineux (en noir) sont présents sur les deux faces de la fracture.



Figure 38: Éprouvette de béton R-0,65-50% suite à l'essai Brésilien

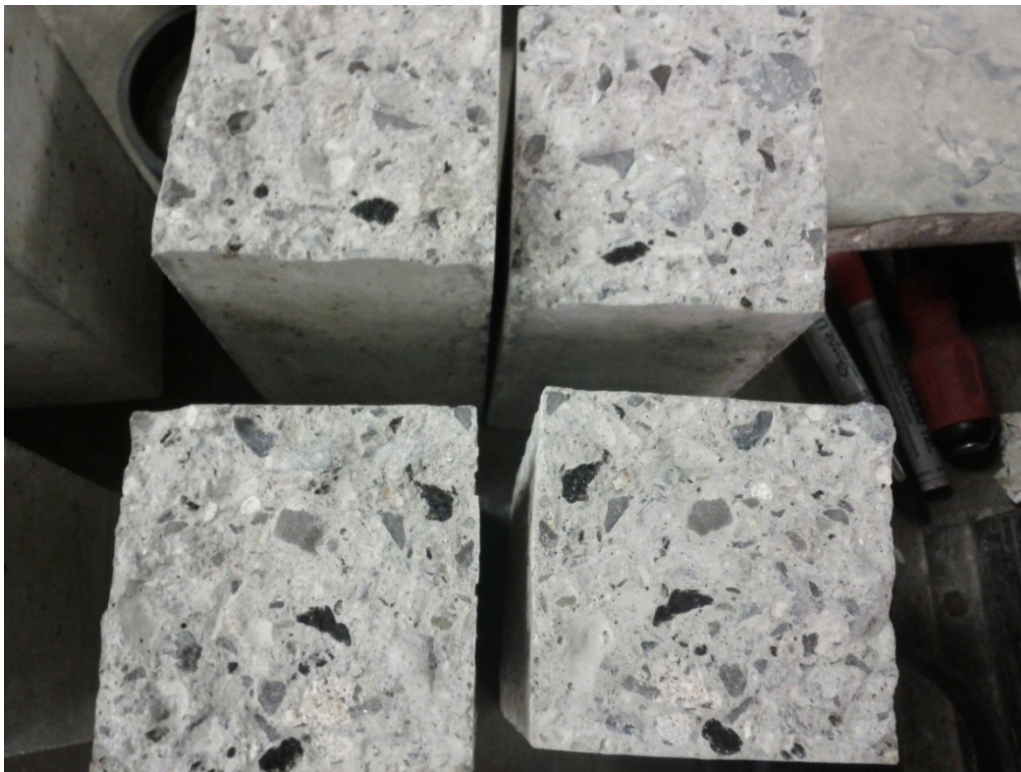


Figure 39: Prisme de béton R-0,65-50% suite à l'essai de résistance à la flexion

5.2.2 Bétons ayant un rapport E/C de 0,55

Suite aux premiers mélanges de béton de rapport E/C de 0,65, d'autres mélanges de béton ayant un rapport E/C de 0,55 ont été confectionnés. Tel que mentionné dans la section 5.2, le rapport E/C plus bas a été ici choisi pour refléter les nouvelles exigences de la norme CSA en ce qui a trait aux bétons résidentiels. Dans ce cas, deux gâches de 70 litres ont été préparées pour chaque taux de remplacement évalué. Pour chaque mélange évalué, les deux gâches ont été préparées consécutivement pour diminuer autant que possible les variations au niveau des conditions des matériaux utilisés et minimise la différence entre les propriétés des deux gâchés. Cette méthodologie a été nécessaire étant donné le grand nombre d'échantillons prélevés pour chaque mélange et par le fait même la grande quantité de béton requise pour préparer ceux-ci. Pour chacun de ces gâchés, l'affaissement, la teneur en air et la masse volumique du béton plastique ont été mesurés. En plus des essais sur béton frais, la résistance à la compression, la résistance à la traction indirecte, la résistance à la flexion, le module d'élasticité, le retrait de séchage, la résistance au gel/dégel, la perméabilité aux ions chlore ainsi que la perméabilité à l'eau a été évaluée pour ces mélanges.

(1) Essais sur béton à l'état frais

Comme dans le cas des bétons de rapport E/C de 0,65, l'affaissement et la teneur en air du béton ne semblent pas être affectés par le remplacement du granulats naturels par un granulats recyclés. Dans ce cas, comme dans le cas des bétons ayant un rapport E/C de 0,65, il est probable que la pré saturation partielle des granulats ait permis de contrer l'effet négatif de la grande absorption des granulats recyclés en remplissant la porosité des granulats d'eau. L'eau du mélange que le granulats recyclés aurait normalement absorbée lors du malaxage est donc restée disponible pour lubrifier le mélange et maintenir ainsi l'affaissement. Pour tous les mélanges préparés avec le ciment GU, la teneur en air entraînée n'est pas affectée par l'utilisation de granulats recyclés. Il a par contre été nécessaire d'augmenter le dosage en agent entraîneur d'air du mélange utilisant le GUBFSF. Ceci est dû à la présence des cendres volantes et de la fumée de silice dans ce type de liant ternaire. La composition de ces ajouts cimentaires diminue l'efficacité de l'agent entraîneur d'air. Il est donc nécessaire d'ajuster la teneur en agent entraîneur d'air pour obtenir un pourcentage d'air entraîné comparable aux autres mélanges.

On observe, par contre, une légère diminution de la masse volumique du béton frais quand le taux de remplacement du granulat recyclé augmente. La masse volumique à l'état frais du mélange R-0,55-0% est de 2310kg/m^3 en alors que celle du mélange R-0,55-75% est de 2200kg/m^3 . Ces résultats sont les moyennes des deux masses volumiques mesurées pour chaque mélange. La baisse de la masse volumique est due à la masse volumique plus faible des granulats recyclés. Les granulats représentant une grande fraction du béton et la masse volumique du béton frais varie en fonction de la masse volumique de ceux-ci.

(2) *Résistance à la compression*

La résistance à la compression a été mesurée à 3, 7, 28, 56 et 91 jours pour les mélanges ayant un rapport E/C de 0.55. Pour tous les âges, la résistance à la compression ne semble affectée par le taux de remplacement. Les cinq mélanges utilisant un liant GU présentent des résistances très similaires à tous les âges. La seule exception est la résistance à 91 jours du mélange R-0,55-75% qui est significativement plus basse que celle des autres mélanges à 91 jours. Il est, cependant, difficile de statuer sur la validité de ce résultat étant donné que la résistance mesurée à 91 jours est plus basse que la résistance à 56 jours, une tendance qui n'a pas été observée pour aucun autre mélange. Il est possible qu'un facteur externe autre que l'utilisation des granulats recyclés soit la source de cette baisse de résistance observée. Le mélange R-0,55-50% GUbFSF présente des résistances à la compression plus basse que les mélanges utilisant un ciment GU. Les résistances observées pour ce mélange sont plus basses que celles du mélange R-0,55-50% et ce même à 56 et 91 jours. Ceci est surprenant puisque la littérature à ce sujet indique que même si les résistances à plus bas âge sont souvent plus basses lorsque des cendres volantes sont utilisées, on observe généralement des résistances équivalentes et même plus élevées que celles d'un mélange préparé avec un ciment ordinaire à partir de 56 jours [Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008]. L'utilisation de la fumée de silice a normalement un effet positif sur les résistances du béton même à bas âge [Gonzalez-Fonteboa et Martinez-Abella, 2008]. Les résultats observés sont donc surprenants. Il est possible qu'un facteur autre que le type de liant ait eu un impact sur les résistances observées, l'écart type entre les résultats étant plus grands pour ce mélange que pour le mélange équivalent utilisant un liant GU. Des essais supplémentaires utilisant ce type de liant sont nécessaires pour mieux

comprendre les résultats observés qui vont à l'encontre ce qui est généralement observé dans la littérature.

En général, les bétons confectionnés dans le cadre de cette phase du projet semblent moins affectés par l'utilisation de granulats recyclés que ce qui est observé dans la littérature. En effet, les cinq mélanges fabriqués avec un liant GU ne présentent pas de perte de résistance à la compression lorsque le taux de remplacement du granulats augmente, alors qu'on observe généralement une perte de résistance à la compression de 10 à 20% [de Oliveira et Vazquez, 1996; Etxeberria *et al.*, 2007; Rahal, 2007] pour les plus hauts taux de remplacement du granulats naturel.

En ce qui concerne la résistance à la compression, le taux de remplacement de 50% semble le taux de remplacement optimal puisqu'on observe que les résistances à la compression ne semblent pas affectées même à ce taux de remplacement élevé. Le taux de remplacement de 75% semble aussi intéressant, mais il serait nécessaire de confirmer la cause de la perte de résistance à 91 jours de ce mélange.

(3) *Résistance à la traction indirecte*

La résistance à la traction a été mesurée à 3, 7, 28, 56 et 91 jours pour les mélanges de rapport E/C de 0.55. Pour tous les âges, la résistance à la traction semble diminuer avec le taux de remplacement augmente. Bien que cette tendance soit moins claire à bas âge, on voit très bien la diminution de résistance en fonction du taux de remplacement pour les essais effectués à 28, 56 et 91 jours. La perte de résistance observée entre le béton témoin et le mélange ayant le plus haut taux de remplacement est de 18% à 28 et 91 jours. Ceci est légèrement plus élevé que ce qui est généralement observé dans la littérature. On observe généralement des pertes de résistance à la traction de 10 à 15% [Tabsh et Abdelfatah, 2009] pour les plus hauts taux de remplacement.

Le mélange R-0,55-50% GUBFSF présente des résistances à la traction indirecte plus basses que les mélanges utilisant le ciment GU. Comme pour la résistance à la compression, les résistances observées pour ce mélange sont plus basses que celles du mélange R-0,55-50% et

ce même à 56 et 91 jours. Ceci est surprenant puisque la littérature à ce sujet indique que même si les résistances à plus bas âge sont souvent plus basses lorsque des cendres volantes sont utilisées, on observe généralement des résistances équivalentes et même plus élevées que celles d'un mélange proportionné avec un ciment ordinaire à partir de 56 jours. L'utilisation de la fumée de silice a normalement un effet positif sur les résistances du béton même à bas âge. Comme dans le cas des résultats observés au niveau des résistances à la compression, les résultats observés sont donc très surprenants et difficilement explicables. Des essais supplémentaires utilisant ce type de liant sont nécessaires pour mieux comprendre les résultats observés qui vont à l'encontre de ce qui est généralement observé dans la littérature.

Bien que le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé ait un impact négatif sur la résistance à la traction indirecte pour tous les mélanges étudiés, un taux de remplacement de 20% semble avoir un impact minime sur cette propriété. La perte de résistance à la traction de ce mélange par rapport au béton témoin est de l'ordre de 5%, 6% et 8% à 28, 56 et 91 jours. Ce taux de remplacement est donc le taux de remplacement optimal pour cette propriété.

(4) Résistance à la flexion

La résistance à la flexion a été mesurée à 7, 28, 56 et 91 jours pour les mélanges avec un rapport E/C de 0.55. Pour tous les âges, la résistance à la flexion semble diminuer plus le taux de remplacement augmente. La perte de résistance observée entre le béton témoin et le mélange ayant le plus haut taux de remplacement est de 15%, 20% et 26% à 28, 56 et 91 jours respectivement. Ceci est légèrement plus élevé que ce qui est généralement observé dans la littérature, notamment à un âge de 91 jours. On observe généralement des pertes de résistance à la flexion de 10% [de Oliveira et Vazquez, 1996] à 13% [Topcu et Sengel, 2004] pour les plus hauts taux de remplacement.

Pour un même taux de remplacement de 50%, le mélange R-0,55-50% proportionné avec le liant GUbFSF présente des résistances à la flexion plus élevées que le mélange utilisant un ciment GU ayant aussi un taux de remplacement de 50%. Bien que la résistance à la flexion observée pour ce mélange soit plus basse que la résistance du mélange R-0,55-50% à 7 jours,

le mélange R-0,55-50% GUbFSF présente des résistances à la flexion plus élevée à 28, 56 et 91 jours. Contrairement à ce qui a été observé pour les résistances à la compression et à la traction indirecte, ceci est tout à fait cohérent avec l'effet normalement observé pour un mélange utilisant des ajouts cimentaires. L'utilisation de cendres volantes diminue généralement les résistances observées à bas âge. Le fait que les résistances à 28 jours du mélange contenant le liant ternaire soient plus élevées que celles du mélange utilisant le ciment GU est très probablement dû à la présence de la fumée de silice dans le liant ternaire. Celle-ci a un effet bénéfique sur les résistances mêmes à plus bas âge puisque la fumée de silice densifie l'interface granulat pâte [Tam et Tam, 2008], et, par le fait même améliorer la résistance à la flexion du mélange. Il est étrange de constater que la résistance à la flexion ne semble pas être affectée de la même manière que les résistances à la compression et traction. Ceci est possiblement dû au fait que les poutres de flexions n'ont pas été prélevées de la même gâchée que les éprouvettes de béton. Bien que la teneur en air de la gâchée dans laquelle ont été prélevés les prismes de béton est dans la fourchette recherchée, celle-ci est plus basse de 1.5% par rapport à l'autre gâchée préparée pour le même mélange. Cette différence au niveau de la teneur en air peut expliquer en partie la différence observée entre ces 2 gâchées. Des essais supplémentaires utilisant le liant GUbFSF seraient par contre utiles pour mieux expliquer ces résultats.

Bien que le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé ait un impact négatif sur la résistance à la flexion pour tous ces mélanges, un taux de remplacement de 20% semble avoir un impact minime sur cette propriété. En effet, les résistances observées pour le mélange R-0,55-20% sont très similaires à celles observées pour le mélange R-0,55-0% à tous les âges. Comme on le voit sur la Figure 29 de la section 4.2.5, la résistance à la flexion du mélange ayant un taux de remplacement est légèrement supérieure à celle du béton témoin à 7 et 91 jours alors qu'elle est généralement inférieure à 28 et 56 jours. Ces légères variations sont vraisemblablement dues à l'erreur expérimentale.

(5) Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 a été mesuré à 28 et 56 jours. Pour tous les âges, le module d'élasticité mesuré diminue quand le taux de

remplacement augmente. La diminution du module d'élasticité observé pour le taux de remplacement de 75% est de 29% à 28 jours et de 30% à 56 jours. Ces résultats sont similaires à ceux observés dans la littérature. Pour les plus hauts taux de remplacement, des baisses du module d'élasticité de 28% [Kou *et al.*, 2007] et de 35% [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Rao *et al.*, 2007] ont été observées. L'impact de l'utilisation du granulat recyclé comme remplacement du granulat naturel a aussi un impact similaire à ce qui est observé dans la littérature pour les plus bas taux de remplacement. Le mélange R-0,55-20% présente une baisse de module d'élasticité par rapport au mélange R-0,55-0% de 10% à 28 jours et de 7% à 56 jours. Dans le cas du mélange R-0,55-35%, les baisses relatives de module d'élasticité sont de 9% à 28 jours et de 15% à 56 jours. Ces résultats sont très similaires à ceux présentés par Corinaldesi [Corinaldesi, 2010]. Celui-ci a observé une baisse du module d'élasticité de 15% pour un mélange ayant un taux de remplacement de 30%. Finalement, les modules d'élasticité obtenus pour le mélange R-0,55-50% proportionné avec le liant GUBFSF sont légèrement inférieurs à ceux obtenus pour le mélange ayant le même taux de remplacement et incorporant le ciment GU.

Les deux taux de remplacement les plus intéressants en ce qui a trait à l'impact sur le module d'élasticité sont des remplacements de 20% ou de 35% du granulat naturel par un granulat recyclé. Dans les deux cas, les baisses observées au niveau du module d'élasticité sont relativement faibles. Bien que le taux de remplacement de 35% permet une plus grande utilisation de granulat recyclé, celui-ci résulte en un module d'élasticité statique plus bas qu'un remplacement de 20% du granulat naturel.

(6) Retrait de séchage

Le retrait de séchage de prismes de béton a été mesuré pour chacun des mélanges préparés avec un rapport E/C 0,55. Bien que la tendance soit moins claire pour les mesures prises à plus bas âge, on observe une corrélation entre l'augmentation du taux de remplacement et le retrait de séchage. Cette tendance est claire quand l'on observe les résultats obtenus après 16 et 32 semaines. Celle-ci a été souvent observée dans la littérature [Guo et Wang, 2012; Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008; Li, 2008; Malesev *et al.*, 2010; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001; Tam et Tam, 2007]. Les deux facteurs responsables du plus grand retrait observé lors de l'utilisation

de granulats recyclés sont la présence de mortier résiduel et l'eau supplémentaire ajoutée pour remplir la porosité du granulat [Li, 2008].

Le mélange utilisant le liant GUBFSF présente un retrait de séchage significativement moins élevé que le mélange ayant le même taux de remplacement du granulat naturel pour lequel un ciment de type GU a été utilisé. La variation de la longueur observée pour ce mélange est même inférieure à celle observée pour le béton témoin. Il semble donc que, dans ce cas, le type de liant utilisé ait compensé l'effet négatif du granulat recyclé sur le retrait de séchage. Bien que des résultats similaires aient été observés dans la littérature [Kou et Poon, 2012], le mécanisme par lequel les cendres volantes auraient un effet positif sur le retrait de séchage n'est pas clairement expliqué par l'auteur. Une première hypothèse pour expliquer ceci aurait pu être que le retrait de séchage est plus lent pour le mélange utilisant le liant GUBFSF étant donné la faible perméabilité du béton confectionné avec celui-ci. On verrait donc un plus grand retrait à long terme pour ce mélange. Les résultats obtenus à 48 semaines ne semblent cependant pas confirmer cette hypothèse. Des résultats supplémentaires pourraient servir à mieux identifier le phénomène qui a ici mené à un retrait plus bas pour ce mélange.

Les mesures de retrait présentées à la section 4.2.7 démontrent que les mélanges ayant des taux de remplacement supérieurs présentent un retrait significativement plus élevé que le mélange témoin. Les mélanges préparés avec des taux de remplacement de 20% et de 35% présentent par contre des valeurs de retrait de séchage similaire au béton témoin. Selon les résultats obtenus, les taux de remplacement de 20% et de 35% est les taux de remplacement les plus intéressants dans le cas des bétons ayant un rapport E/C de 0,55 si on cherche à minimiser l'impact des granulats recyclés sur le retrait de séchage.

(7) Résistance au gel/dégel

Les essais de résistance au gel dégel ont été effectués sur les mélanges de béton ayant un rapport E/C de 0,55. Après 14 jours de cure humide, les prismes de béton ont été placés dans un tombeau soumis à 5 cycles de gel/dégel quotidien jusqu'à 300 cycles ou le bris de l'échantillon selon la procédure ASTM C666. Le remplacement du granulat recyclé par un granulat naturel ne semble pas avoir d'impact sur la résistance aux cycles de gel/dégel des

prismes de béton soumis. En effet, les résultats présentés dans la section 4.2.8 montrent que le facteur de durabilité obtenu après les 300 cycles de gel/dégel varie très peu entre les mélanges. Ces résultats sont cohérents avec les observations de Li [Li, 2008] qui affirme que les granulats recyclés n'ont pratiquement pas d'impact sur la résistance au gel/dégel du béton. La résistance au gel/dégel est contrôlée par le réseau de bulle d'air entraîné dans le béton. Le type de granulats recyclés a peu d'impact sur cette propriété.

Les facteurs de durabilité obtenus pour les mélanges utilisant un ciment GU se situent entre 103 et 96 alors que le facteur de durabilité du mélange R-0,55-50% préparé avec le liant GUbFSF est de 98. Le type de liant utilisé ne semble donc pas avoir d'impact significatif sur cette propriété pour ces mélanges. Dans tous les cas, les facteurs de durabilité obtenus sont supérieurs à 60, la limite représentant l'arrêt de l'essai de résistance au gel/dégel.

(8) Perméabilité aux ions chlore

La perméabilité aux ions chlore des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 a été mesurée à 56 jours. La perméabilité aux ions chlore ne semble pas affectée par le remplacement du granulats naturels par un granulats recyclés pour ces mélanges. Il est important de noter que tous les mélanges utilisant un ciment GU présentent des perméabilités aux ions chlorures très élevées. Les charges totales obtenues pour ces mélanges se situent entre 5730 et 6734 Coulombs. Ils ont donc une perméabilité aux ions chlorure élevée (> 4000 Coulombs) selon de la norme ASTM C1202-10. Étant donné la nature de l'essai, il est impossible de statuer sur les légères différences observées au niveau de la charge totale mesurée entre les différents mélanges. En effet, l'essai devient beaucoup moins précis pour les très grandes charges, pour les bétons de perméabilité élevées. Tous les mélanges utilisant un ciment GU ont donc une performance équivalente, soit une perméabilité élevée.

Le mélange utilisant le liant ternaire GUbFSF présente par contre une perméabilité aux ions chlorures beaucoup moins élevées que les autres mélanges. La charge totale mesurée pour les échantillons de ce mélange est de 1478 Coulombs. Ce mélange est donc un béton ayant une perméabilité aux ions chlorure basse selon de la norme ASTM C1202-10. Cette perméabilité aux ions chlorure significativement plus basse est due à la présence de la fumée de silice et des cendres

volantes dans le liant utilisé. Ces matériaux tendent à diminuer significativement la perméabilité des bétons dans lesquels ils sont utilisés, surtout à des âges plus élevés dans le cas des cendres volantes [Kou et Poon, 2006]. Le fait que l'essai a été effectué à 56 jours a vraisemblablement permis de bien voir l'effet bénéfique des cendres volantes en plus de la fumée de silice.

Les résultats présentés dans la section 4.2.9 semblent, à première vue, contradictoires avec ce qui est généralement relevé dans la littérature, soit que la perméabilité aux ions chlorés des mélanges augmente quand le taux de remplacement augmente [Chakradhara Rao *et al.*, 2011; Kou *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2008; Kou et Poon, 2006; Tam et Tam, 2007]. Il n'a cependant pas été possible d'évaluer la différence entre les différents taux de remplacement pour les mélanges évalués dans cette étude étant donné les hautes perméabilités observées. Dans ce cas, le rapport E/C élevé ainsi que le type de liant utilisé ont un beaucoup plus grand impact sur cette propriété que le type de granulat utilisé. Il n'a pas été possible d'identifier un taux de remplacement du granulat naturel optimal pour cette propriété.

(9) Perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 a été mesurée dans le cadre de cette étude. Les premiers essais ont été effectués à 56 jours pour chaque mélange. Ceux-ci n'étant pas concluants, il a été nécessaire de les reprendre quelques semaines plus tard à environ 3 mois de la confection de chaque mélange. Les essais dont les résultats sont présentés dans la section 4.2.10 sont les essais effectués à environ 91 jours de la date de préparation des mélanges.

Comme on peut le voir sur le Tableau 14 de la section 4.2.10, les résultats de perméabilité à l'eau semblent très variables. Il ne semble pas y avoir de lien entre les perméabilités à l'eau mesurées et le taux de remplacement. Le mélange utilisant le liant GUbFSF semble avoir une perméabilité moins élevée que les mélanges utilisant un liant GU, mais cette tendance n'est pas claire étant donné la grande variabilité des résultats.

En général, il est très difficile de corrélérer les résultats obtenus avec la perméabilité à l'eau du béton analysé. En plus d'y avoir eu plusieurs essais qui ont du être interrompue à cause de problèmes avec le montage, les résultats obtenus sont très variables et ne semblent pas cohérents pour les deux échantillons du même mélange.

Le principe de l'essai consiste à mesurer la quantité d'eau, en millilitre, qui percole à travers l'échantillon en fonction du temps pour obtenir la perméabilité de l'échantillon (ml/h). Pour ce faire, les échantillons sont soumis à une pression d'eau constante jusqu'à ce qu'on observe un écoulement d'eau constant. La pente de la courbe du volume d'eau recueilli en fonction du temps est donc considérée comme représentant la perméabilité à l'eau de l'échantillon.

Identifier le moment à partir duquel il y a un écoulement constant est un exercice complexe pour les mélanges analysés dans le cadre de ce projet. Pour les mélanges de rapport E/C analysés, il fût souvent nécessaire d'attendre deux ou trois jours avant que d'écoulement débute. Une fois cet écoulement commencé, les variations de volume d'eau recueilli étaient très faibles. Dans plusieurs cas, il semble que la variation du volume d'eau mesurée est d'un ordre de grandeur similaire aux variations causées par le montage utilisé. Ceci fait en sorte qu'il est très difficile de tirer des conclusions claires de ces essais.

L'essai pour lequel la mesure de la perméabilité à l'eau du mélange fut le plus facile est l'essai 20% 05-05-2013 #1. Dans ce cas, il est facile d'identifier le moment à partir duquel l'écoulement constant a commencé puis la perméabilité observée est significativement plus élevée que les autres mélanges. Les variations du volume d'eau dans le cylindre gradué étant plus grandes, les résultats obtenus semblent moins affectés par l'imprécision du montage. La Figure 40 présente les résultats obtenus à partir du moment où l'on observe un écoulement constant pour cet essai.

À l'opposé, le moment à partir duquel l'écoulement constant de l'eau commence pour l'essai 20% 10-06-2013 #1 est très difficile à identifier. Il n'a pas été possible d'identifier clairement l'écoulement constant pour ce mélange. La mesure de perméabilité à l'eau obtenue à partir de

la pente de la courbe ne représente donc probablement pas très bien la réalité. La Figure 41 présente les résultats obtenus pour cet essai.

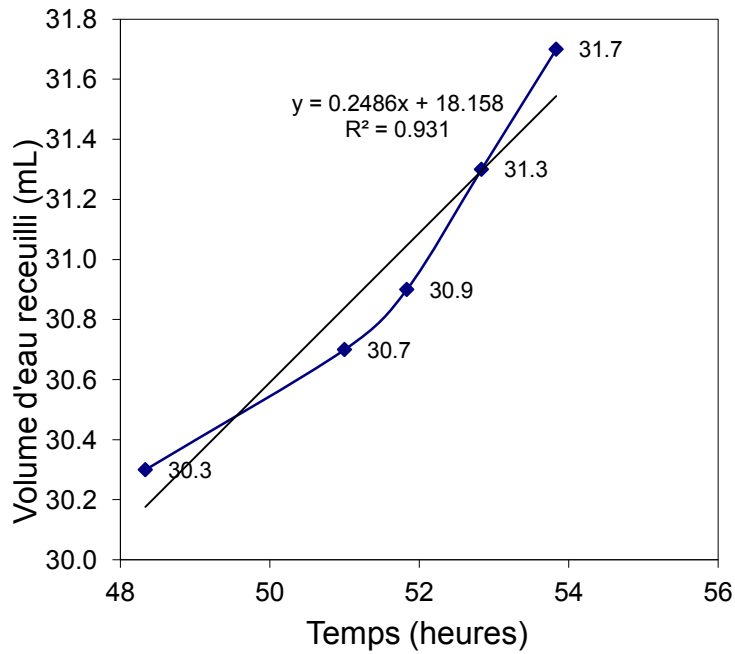


Figure 40: Résultats perméabilité à l'eau (20% 05-05-2013 #1)

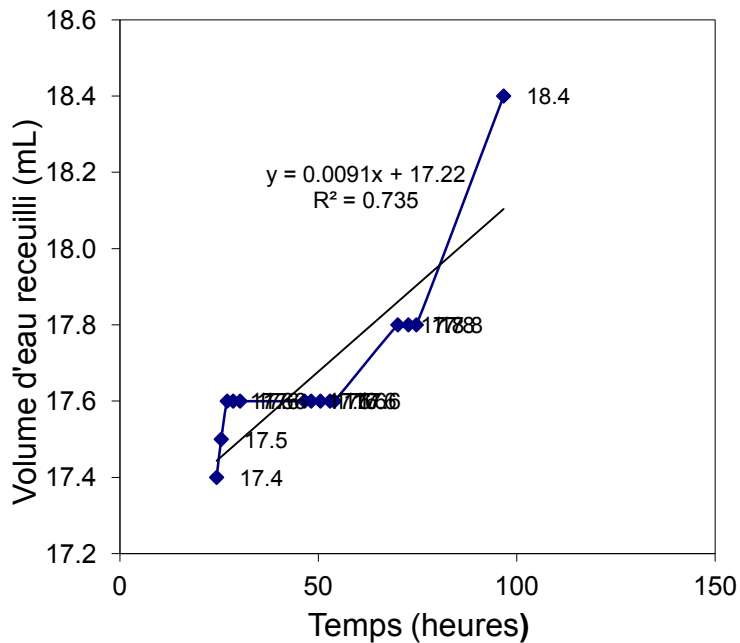


Figure 41: Résultats perméabilité à l'eau (20% 10-06-2013 #1)

En général, il ne semble pas que cet essai soit bien adapté à aux bétons confectionner dans le cadre de ce projet. D'après l'information recueillie sur cet essai, il semble mieux adapté aux bétons de rapport E/C très élevé. Les essais effectués sur des bétons de rapport E/C de 0,7 semblent donner de meilleurs résultats que ceux présentés dans cette étude. Ces bétons étant très perméables, l'essai ne s'échelonne que sur une seule journée. Les variations du niveau d'eau dans le cylindre gradué sont aussi plus grandes, diminuant l'impact de l'imprécision de la prise de mesure.

Il est possible de changer quelques aspects du montage utilisé pour mieux adapter l'essai à des bétons de perméabilité plus basse. Un exemple serait de diminuer le diamètre du cylindre gradué utilisé pour prendre les mesures et ainsi pouvoir mieux voir de plus faible variation de la quantité d'eau dans celui-ci. L'analyse de mélanges de perméabilité plus basse pourrait exiger une augmentation de la durée de l'essai à deux semaines ou possiblement un mois pour mieux voir l'écoulement constant.

Bien qu'il existe possiblement certains moyens d'améliorer la précision de l'essai pour des bétons de rapport E/C de 0,55, les résultats présentés dans cette section semblent très variables et peuvent difficilement être corrélé à une propriété physique des mélanges de béton analysés. Avant de pouvoir conclure sur l'impact du remplacement du granulats naturel par un granulats recyclés sur la perméabilité à l'eau il est nécessaire d'adapter cet essai à des bétons de plus basse perméabilité.

(10) Résumé des performances des mélanges de rapport E/C 0,55

Pour les mélanges présentés dans cette section, l'impact du remplacement granulats naturel par un granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais, le module d'élasticité, le retrait de séchage et la résistance au gel/dégel est similaire à ce qui est observé dans la littérature. Les résistances mécaniques mesurées ne semblent par contre pas affectées de la même manière pour les mélanges analysés dans cette section. En effet, le remplacement du granulats naturel par un granulats recyclés ne semble pas affecter négativement la résistance à la compression du

béton alors que la résistance à la traction indirecte et à la flexion diminue quand le taux de remplacement augmente.

Une explication possible pour les résistances à la compression équivalente observées pour ces mélanges est qu'une quantité d'eau correspondant à seulement 65% de l'absorption des granulats a été ajoutée au mélange lors de la période de pré saturation. Dans ce cas, il est possible que les granulats aient absorbé une quantité d'eau correspondant à plus de 65% de leurs absorptions entre le contact eau/ciment et la prise finale. Ceci cause donc une légère baisse du rapport E/C effectif, causant une amélioration des propriétés mécaniques des mélanges étudiés. Comme cette possible baisse du rapport E/C augmente en fonction de la quantité de granulats recyclés utilisés, il est probable que celle-ci ait servi à compenser les propriétés mécaniques plus faibles des granulats recyclés.

On observe par contre une baisse de la résistance à la traction et à la flexion quand le taux de remplacement augmente. Bien que la diminution du rapport E/C décrite dans le paragraphe précédent ait un effet positif sur ces propriétés, il est important de noter que la qualité de l'interface granulat/pâte est une propriété qui a un très grand impact sur les résistances à la traction et à la flexion. Comme les granulats recyclés utilisés dans ce projet sont composés d'une certaine teneur en résidus d'enrobé bitumineux, il est possible que l'interface entre la pâte et ces résidus d'enrobé bitumineux soit de moins bonnes qualités que l'interface entre un granulat naturel et la pâte. Les résidus d'enrobé bitumineux représentent donc des points de faiblesses à la traction et à la flexion. Comme la qualité de l'interface granulat pâte a un moins grand impact sur la résistance à la compression, la présence des résidus d'enrobés bitumineux a un moins grand impact sur celle-ci. Cette hypothèse est renforcée par les observations des cylindres et prismes brisés. Comme il a été décrit dans la section 5.2.1(6), les cylindres et prismes de béton brisés dans le cadre des essais de résistance à la traction et à la flexion présentent souvent des morceaux d'enrobés bitumineux au niveau de la fracture de l'échantillon. Ceci porte à croire que ces morceaux d'enrobé bitumineux représentent un point de faiblesse. La plus grande sensibilité des résistances à la traction et flexion par rapport aux morceaux d'enrobé bitumineux explique les différences observées au niveau de l'impact de

l'utilisation des granulats recyclés sur les propriétés mécaniques des mélanges de rapport E/C de 0,55.

Pour des raisons décrites dans la section précédente, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude n'ont pas permis de conclure sur l'effet du remplacement du granulat naturel sur la perméabilité aux ions chlorures ainsi que sur la perméabilité à l'eau du béton.

Le mélange pour lequel un liant de type GUbFSF a été utilisé en remplacement du ciment GU a généralement moins bien performé que le mélange ayant le même taux de remplacement utilisant un ciment ordinaire. Des résistances mécaniques plus basses que le mélange de référence ont été observées même à 56 et 91 jours. Ceci est surprenant étant donné que les liants utilisant les ajouts cimentaires performant généralement mieux à plus long terme. Le liant GUbFSF a cependant permis d'obtenir une perméabilité aux ions chlorures et retrait de séchage plus bas. Les résultats obtenus pour ce mélange de béton semblent aller à l'encontre de ce qui est observé dans la littérature pour plusieurs propriétés du béton. Des essais supplémentaires utilisant le même type de liant peuvent servir à mieux comprendre les résultats obtenus pour ce mélange.

Les taux de remplacement optimaux pour ces mélanges sont le remplacement de 20% ou de 35% du granulat naturel par un granulat recyclé. Selon les résultats obtenus pour ces mélanges, un taux de remplacement de 20% n'a pas ou très peu d'impact sur les propriétés du béton. Celui-ci est donc le taux de remplacement idéal si on ne veut pas que les propriétés du béton soient affectées. Un taux de remplacement de 35% peut aussi être intéressant si on cherche à maximiser la quantité de granulats recyclés utilisés. Dans ce cas, on observe un impact sur certaines propriétés du béton dans lequel les granulats recyclés sont utilisés. Il peut être nécessaire d'évaluer au cas par cas si l'impact sur les propriétés du béton vaut le gain qu'apporte l'utilisation d'une plus grande quantité de granulats recyclés.

5.2.3 Bétons de rapport E/C de 0,55 à remplacement volumique

Deux mélanges de béton supplémentaires ont été confectionnés suite à la phase d'essais sur bétons de rapport E/C de 0,55. Tel que discuté brièvement dans l'introduction de la section

5.2 ces mélanges ont été préparés en utilisant un remplacement volumique du granulat naturel par les granulats recyclés. Les bétons préparés dans les sections précédentes ont été préparés en remplacement les granulats naturels par une masse égale de granulats recyclés selon le taux de remplacement. Comme la masse volumique du granulat recyclé est légèrement plus basse que celle des granulats naturels utilisés, le volume total qu'occupent les granulats varie pour ces mélanges. Les deux mélanges présentés dans cette étude ont un volume de granulat constant par rapport au béton témoin. Les essais sur ces deux mélanges visent donc à évaluer l'impact du type de remplacement utilisé sur les propriétés du béton. Les taux de remplacement de 20% et de 50% ont été évalués pour ces mélanges. Ces mélanges sont identifiés : R-0,55-20% V et R-0,55-50% V pour les différencier des bétons préparés auparavant. Dans ce cas, une gâché de 70 litres a été préparée pour chaque taux de remplacement évalué. Pour chacun de ces gâchés, l'affaissement, la teneur en air et la masse volumique du béton plastique ont été mesurés. En plus des essais sur béton frais, la résistance à la compression, la résistance à la traction indirecte et la perméabilité aux ions chlore ont été évalués.

(1) Essais sur béton à l'état frais

Les propriétés à l'état frais des ces mélanges ne semblent pas affectés par le type de remplacement. La teneur en air, l'affaissement et la masse volumique à l'état frais sont très similaires à ce qui a été mesuré pour les mélanges R-0,55-20% et R-0,55-50%. Les teneurs en air et les affaissements mesurés pour ces mélanges sont dans les gammes visées.

(2) Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée à 3, 7, 28, 56 et 91 jours pour les mélanges utilisant un remplacement volumique. En général, la résistance à la compression ne semble affectée par le type de remplacement utilisé. Les mélanges R-0,55-50% et R-0,55-50% V présentent de résistance à la compression très similaire à tous les âges. Les mélanges R-0,55-20% et R-0,55-20% V présentent par contre une légère différence au niveau des résistances à la compression à 56 et 91 jours. Le mélange R-0,55-20% V a une résistance à la compression significativement plus élevée que le R-0,55-20% à cet âge. Ces différences ne sont probablement pas liées au type de remplacement utilisé étant donné que la composition de

ceux deux mélanges est très similaire et que les mélanges ayant des taux de remplacement plus élevés ont des performances équivalentes. Comme le taux de remplacement est très bas pour ces mélanges, la différence au niveau de la composition de ces mélanges est très faible. La différence au niveau de la teneur en gros granulat n'est que de 30 kg/m^3 pour les deux mélanges ayant un taux de remplacement de 20%. La différence observée au niveau de la résistance à la compression est donc possiblement liée à l'erreur expérimentale ou à une mauvaise consolidation des échantillons du mélange R-0,55-20% qui ont été brisés à 56 et 91 jours. L'hypothèse d'une moins bonne consolidation ou d'un défaut dans les échantillons du mélange R-0,55-20% testés à 56 et 91 jours est d'autant plus probable si on regarde les résultats obtenus lors de l'évaluation de l'impact des différents taux de remplacement des mélanges de rapport E/C de 0,55. En effet, on peut clairement voir que le mélange présente des résistances à la compression à 56 et 91 jours légèrement inférieures aux quatre autres mélanges dont les résultats sont présentés sur la Figure 23. Ceci porte à croire que la résistance à la compression de ce mélange a été affectée négativement par un facteur externe à la formulation utilisée pour ces âges. Une inspection visuelle des éprouvettes de béton brisées aurait par contre été très utile pour confirmer cette hypothèse. Celle-ci n'a cependant pas été effectuée puisque les éprouvettes de béton ont été disposées suite à l'essai, avant que les résultats soient comparés. Au final, le remplacement volumique des granulats naturel ne semble pas avoir d'impact significatif sur la résistance à la compression de ce mélange.

(3) Résistance à la traction indirecte

La résistance à la traction a été mesurée à 3, 7, 28 et 56 jours pour les mélanges utilisant un remplacement volumique. La résistance à la compression ne semble affectée par le type de remplacement utilisé pour un taux de remplacement de 20%. On observe par contre une différence au niveau de la résistance à la traction des mélanges ayant un taux de remplacement de 50%. Les résistances à la traction plus basses du mélange R-0,55-50% sont possiblement dues au fait que celui-ci ait un volume de gros granulat plus élevé. La résistance à la traction est contrôlée par la qualité de l'interface granulat pâte, un plus grand volume de granulat et par le fait même une plus grande surface d'interface granulat pâte cause une baisse des résistances à la traction. Cette baisse de résistance n'est pas perçue pour les mélanges ayant des taux de remplacement de 20% étant donné que le volume de granulats total varie très

peu entre ces deux mélanges. Le remplacement volumique des granulats naturels a donc un impact positif sur la résistance à la traction de pour les mélanges ayant des taux de remplacement plus élevés, ces mélanges ayant un volume de gros granulats moins élevé que les mélanges pour lesquels le granulat naturel a été remplacé selon un rapport massique.

(4) Perméabilité aux ions chlore

La perméabilité aux ions chlore des mélanges ayant un remplacement volumique a été mesurée à 56 jours. La perméabilité aux ions chlore ne semble pas affectée par le type de remplacement du granulat naturel pour ces mélanges. Ces mélanges, comme les mélanges préparés avec un ciment GU dans la section précédente, présentent des perméabilités aux ions chlores très élevés. Les charges totales obtenues pour ces mélanges sont de 4525 et 5806 Coulombs. Ils ont donc une perméabilité aux ions chlorure élevée (> 4000 Coulombs) selon de la norme ASTM C1202-10. Comme les perméabilités aux ions chlore observées sont très élevées, il n'est pas possible de mesurer précisément l'impact du type de remplacement sur cette propriété.

(5) Résumé des performances des mélanges de rapport E/C 0,55 à remplacement volumique

Dans le cadre des mélanges présentés dans cette section, il ne semble pas y avoir de différence entre les mélanges pour lesquels les granulats naturels ont été remplacés selon un rapport massique ou volumique pour les propriétés à l'état frais, la résistance à la compression et la perméabilité aux ions chlorure. On constate par contre que la résistance à la traction semble améliorée par un remplacement volumique par rapport au remplacement massique. Ceci est du au moins grand volume de granulats totaux de ces mélanges et par le fait même la moins grande surface occupée par les interfaces granulat/pâte. On ne peut par contre pas discerner cette tendance pour le mélange ayant un aux de remplacement de 20% étant donné que le volume total de granulat varie peu entre les deux types de formulations évaluées.

CHAPITRE 6 Conclusions et recommandations

Les présents travaux de recherche ont permis d'étudier les propriétés des granulats de béton recyclés ainsi que leur utilisation en remplacement de granulats naturels dans des bétons de résistance moyenne. La première phase du projet de recherche est consacré à la caractérisation des granulats recyclés utilisés dans le cadre de ce projet de recherche. Les essais effectués dans la cadre de cette phase d'essais sont notamment : l'analyse granulométrique, la mesure de la masse volumique et absorption, l'essai Los Angeles, la mesure de la vitesse d'absorption et la mesure de la teneur en mortier résiduel.

La deuxième phase de cette étude consiste en une étude paramétrique visant à évaluer l'impact de différents taux de remplacement sur les propriétés du béton. Suite aux résultats de la phase précédente, la méthode de malaxage du béton a été adaptée aux granulats recyclés en ajoutant une étape de pré saturation du granulat. Dans le cadre de cette phase d'essais, des bétons de rapports E/C de 0,65 et 0,55 ont été soumis à des essais visant à mesurer leurs propriétés mécaniques et leurs propriétés liées à la durabilité. Les propriétés mesurées pour ces bétons sont notamment : la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion, le module d'élasticité, le retrait de séchage, la résistance au gel/dégel, la perméabilité aux ions chlorures et la perméabilité à l'eau.

La première phase du projet a permis de définir les propriétés des granulats de béton recyclé ainsi qu'une méthode permettant d'évaluer la vitesse d'absorption des granulats et de mesurer la teneur en mortier résiduel des granulats recyclés. Les travaux de la phase 1 ont permis de mettre en observation les éléments suivants :

- Les granulats recyclés ont une masse volumique plus faible et une absorption beaucoup plus élevées que les granulats naturels.
- La résistance à l'abrasion des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels.
- La vitesse d'absorption relative du granulat recyclé est plus grande que celle du granulat naturel. Cette propriété est donc importante à considérer lors de la préparation des bétons utilisant des granulats recyclés.

- Les deux méthodes d'essais utilisées pour mesurer la teneur en mortier résiduel du granulat recyclé ont permis d'estimer la teneur en mortier résiduel de celui-ci comme étant entre 35 et 40%.

La deuxième phase du projet a permis d'évaluer l'impact de l'utilisation des granulats recyclés sur le béton. Les travaux de la phase 2 ont permis de mettre en observation les éléments suivants:

- Il est possible de minimiser ou de prévenir l'impact négatif des granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais du béton en ajoutant une phase de pré saturation partielle des granulats au protocole de malaxage.
- Pour les plus hauts taux de remplacement, les granulats recyclés ont généralement un impact négatif sur les résistances mécaniques et les propriétés liées à la durabilité des bétons.
- Il est, cependant, possible d'utiliser des granulats recyclés sans affecter les propriétés du béton. Le taux de remplacement optimal pour les bétons préparés dans le cadre de ce projet est de 20%. Un remplacement de 35% des granulats naturels par un granulat de béton recyclé est aussi une possibilité intéressante pour maximiser l'utilisation des granulats recyclés tout en permettant un faible impact sur les propriétés du béton.
- La présence de 5% d'enrobé bitumineux dans le matériau de classe MR-2 utilisé comme granulat recyclé semble avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques des bétons préparés avec celui-ci. Les résistances à la traction et à la flexion semblent particulièrement affectées par la présence de l'enrobé bitumineux.
- La résistance au gel/dégel des bétons préparés dans le cadre de ce projet ne semble pas être affectée par l'utilisation des granulats recyclés.
- L'utilisation de granulats recyclés n'affecte pas significativement la perméabilité aux ions chlore pour les bétons de rapport E/C de 0,55 fabriqué avec un ciment GU. L'utilisation d'un GUbFSF permet par contre de beaucoup diminuer la perméabilité aux ions chlorures.
- Le retrait de séchage augmente de manière proportionnelle à la quantité des granulats recyclés utilisés.

- L'essai visant à mesurer la perméabilité à l'eau des bétons ne semble pas adapté aux bétons de rapport E/C de 0,55. Il n'a pas été possible d'établir de corrélation avec le taux de remplacement du granulat naturel.
- Les mélanges de béton pour lesquels les granulats naturels ont été remplacés par un granulat recyclé selon un rapport massique ont des propriétés similaires aux mélanges pour lequel le remplacement a été fait selon un rapport volumique. Il ne semble pas y avoir d'écart significatif entre les deux méthodes de formulation pour les bétons étudiés.

Selon les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de recherche, les recommandations suivantes peuvent être émises :

- Pré conditionner les granulats recyclés en les humidifiant avant l'utilisation (ex : avec l'aide de gicleurs) ou en ajoutant une période de malaxage supplémentaire avant l'introduction du ciment afin de saturer partiellement les granulats.
- Limiter l'utilisation des granulats recyclés à 20 ou 35% de la teneur totale en gros granulats. Ces taux de remplacement permettent l'utilisation de granulats recyclés en minimisant l'impact négatif de ceux-ci sur les propriétés du béton.
- Limiter la teneur en mortier résiduel et autre impureté dans le matériau utilisé comme granulats recyclés. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude semblent indiquer que même une teneur de 5% d'enrobé bitumineux dans le granulat MR-2 a un impact significatif sur les propriétés mécaniques du béton.

La présente étude a permis de mieux identifier les enjeux entourant l'utilisation des granulats recyclés. Les résultats obtenus semblent aussi indiquer que l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons de résistance moyenne destinés à la construction résidentielle est une perspective intéressante pour l'industrie du béton.

Il est, cependant, nécessaire de bien maîtriser les propriétés des matériaux recyclés utilisés dans le but de contrôler l'impact sur les propriétés du béton. Les débris de démolition étant un matériau très variable et difficile à contrôler, il peut être nécessaire de développer de nouveaux systèmes de contrôle qualité pour ces matériaux. Les essais visant à mesurer la

teneur en mortier résiduel sont un exemple d'outils qui peuvent être utilisés à cet effet. Une meilleure maîtrise des essais mesurant la teneur en mortier résiduel peut servir à mettre en place un contrôle qualité des granulats recyclés en fonction de leur teneur en mortier résiduel. Cette teneur en mortier résiduel ayant une corrélation directe à la qualité du granulat recyclé, il est possible de rapidement évaluer la qualité de ceux-ci.

Les propriétés des granulats recyclés les rendent intéressants pour plusieurs autres applications. Par exemple, la grande absorption de ceux-ci eut servir de source d'eau pour du mûrissement interne dans des bétons de très faible perméabilité. Un autre exemple est l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons autoplaçant. Les granulats recyclés ayant déjà une certaine teneur de mortier résiduel, cette teneur peut être déduite de la teneur totale de mortier des bétons autoplaçant.

ANNEXE – DONNÉES

Identification Mélange	# essai	Résistance en Compression																
		3 jours			7 jours			28 jours			56 jours			91 jours				
		Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type		
R-0,65-0% GU	1	16.02	15.7	0.49	21.37	21.7	0.39	24.55	24.5	0.33								
	2	15.33			21.93			24.09										
	3							24.72										
R-0,65-20% GU	1	16.92	16.5	0.55	19.36	19.4		22.49	24.3	1.60								
	2	16.14						25.10										
	3							25.41										
R-0,65-35% GU	1	11.37	11.8	0.54	15.38	15.4	0.08	19.51	19.7	0.43								
	2	12.13						19.31										
	3							20.13										
R-0,65-50% GU	1	12.50	12.1	0.59	15.29	15.4	0.16	19.05	19.4	0.34								
	2	11.67						19.63										
	3							19.65										
R-0,65-75% GU	1	13.01	13.3	0.39	14.27	14.3	0.01	19.24	19.0	0.83								
	2	13.56						18.11										
	3							19.73										
R-0,55-0% GU	1	21.51	21.7	0.33	22.45	23.1	0.95	30.08	28.3	2.73	29.87	30.7	0.79	35.39	34.6	0.71		
	2	21.98						29.59						31.44				34.18
	3							25.13						30.83				34.13
R-0,55-20% GU	1	20.57	19.7	1.23	23.46	23.6	0.19	28.42	28.1	0.39	29.56	29.0	0.62	31.35	32.0	0.96		
	2	18.84						28.09						28.35				31.61
	3							27.64						29.14				33.12
R-0,55-35% GU	1	20.25	19.9	0.56	24.73	24.1	0.95	27.05	28.2	2.10	32.65	31.5	1.18	34.12	33.6	0.58		
	2	19.46						26.94						30.29				32.97
	3							30.63						31.49				33.66
R-0,55-50% GU	1	21.66	21.7	0.00	23.43	23.3	0.12	27.64	28.7	0.94	29.47	30.4	0.85	33.21	33.3	0.28		
	2	21.66						23.26						29.49				31.12
	3							28.90						30.64				33.11
R-0,55-50% TerC3	1	11.83	12.6	1.07	19.08	19.0	0.07	24.04	25.5	1.55	24.12	26.1	1.70	25.18	27.6	2.15		
	2	13.34						18.98						25.20				26.75
	3													27.11				27.29
R-0,55-75% GU	1	20.69	20.7		23.84	24.5	0.97	26.89	27.5	0.63	30.32	29.9	0.49	29.13	29.3	0.54		
	2							25.21						28.13				30.11
	3													27.44				29.40
R-0,55-20% GU V	1	20.81	21.3	0.63	25.97	25.2	1.09	29.59	30.4	3.27	33.39	32.5	0.79	35.56	34.5	0.93		
	2	21.71						24.44						31.13				31.88
	3													24.85				32.24
R-0,55-50% GU V	1	20.11	20.7	0.78	24.48	24.8	0.50	30.19	29.3	1.07	29.31	30.9	2.25	34.28	33.6	2.27		
	2	21.21						25.19						29.53				32.50
	3													28.11				29.83

Identification Mélange	# essai	Résistance en Traction (Brésilien)														
		3 jours			7 jours			28 jours			56 jours			91 jours		
		Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type
R-0,65-0% GU	1	2.32	2.3	0.02	2.70	2.6	0.18	2.94	3.1	0.21						
	2	2.30			2.44			3.06			3.34					
	3															
R-0,65-20% GU	1	2.38	2.4	0.06	2.87	2.7	0.26	3.23	3.2	0.11						
	2	2.46			2.50			3.06			3.25					
	3															
R-0,65-35% GU	1	1.95	1.9	0.05	2.28	2.2	0.14	2.52	2.5	0.05						
	2	1.87			2.08			2.47			2.58					
	3															
R-0,65-50% GU	1	1.64	1.8	0.16	2.27	2.2	0.08	2.26	2.4	0.17						
	2	1.87			2.15			2.58			2.37					
	3															
R-0,65-75% GU	1	2.11	2.0	0.19	2.16	2.2	0.10	2.11	2.5	0.32						
	2	1.84			2.30			2.69			2.62					
	3															
R-0,55-0% GU	1	2.48	2.6	0.10	2.82	2.9	0.14	3.53	3.5	0.08	3.60	3.8	0.24	4.27	4.1	0.17
	2	2.62			3.01			3.52			3.93			4.10		
	3							3.38						3.93		
R-0,55-20% GU	1	2.47	2.5	0.01	3.05	3.2	0.22	2.96	3.3	0.32	3.72	3.5	0.24	3.71	3.8	0.16
	2	2.46			3.36			3.25			3.61			3.94		
	3							3.60			3.26					
R-0,55-35% GU	1	2.03	2.3	0.32	2.44	2.6	0.19	3.15	3.3	0.24	3.48	3.5	0.10	3.84	3.8	0.13
	2	2.49			2.72			3.53			3.60			3.62		
	3							3.10			3.40			3.84		
R-0,55-50% GU	1	2.58	2.6	0.01	2.68	2.6	0.14	2.60	2.8	0.24	3.11	3.4	0.26	3.46	3.6	0.20
	2	2.57			2.49			3.07			3.59			3.74		
	3							2.88			3.51					
R-0,55-50% Ter C3	1	1.97	1.9	0.06	2.06	2.1	0.01	3.12	3.1	0.29	2.79	3.0	0.25	2.93	3.0	0.25
	2	1.88			2.07			3.37			3.06			2.87		
	3							2.80			3.28			3.33		
R-0,55-75% GU	1	2.00	1.9	0.16	2.58	2.8	0.24	2.26	2.9	0.54	2.82	3.0	0.29	3.51	3.4	0.14
	2	1.77			2.93			3.32			2.94			3.32		
	3							3.00			3.37			3.23		
R-0,55-20% GU V	1	2.92	2.9	0.05	2.98	3.1	0.18	3.23	3.4	0.14	3.25	3.4	0.15			
	2	2.98			3.23			3.35			3.41					
	3							3.52			3.55					
R-0,55-50% GU V	1	2.75	2.7	0.05	2.97	3.0	0.01	3.29	3.4	0.13	2.94	3.2	0.27			
	2	2.68			2.99			3.43			3.48					
	3							3.55			3.25					

Identification Mélange	# essai	Résistance en Flexion											
		7 jours			28 jours			56 jours			91 jours		
		Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type	Résultats	Moyenne	Écart type
R-0,65-0% GU	1	3.46	3.6	0.13	4.12	4.3	0.22						
	2	3.64			4.44								
R-0,65-20% GU	1	3.33	3.3	0.03	3.89	3.9	0.01						
	2	3.29			3.88								
R-0,65-35% GU	1	2.88	3.0	0.20	3.36	3.4	0.07						
	2	3.16			3.45								
R-0,65-50% GU	1	3.20	3.2		3.36	3.4							
	2												
R-0,65-75% GU	1	2.72	2.8	0.12	3.06	3.2	0.27						
	2	2.89			3.44								
R-0,65-50% GU (2)	1				3.61	3.7	0.19	4.18	4.1	0.16	3.65	3.7	0.10
	2				3.88			3.95			3.79		
R-0,55-0% GU	1	4.12	4.2	0.07	4.76	4.6	0.18	5.08	5.0	0.12	5.00	5.3	0.42
	2	4.22			4.51			4.92			5.60		
R-0,55-20% GU	1	4.34	4.4	0.05	4.53	4.3	0.29	4.60	4.7	0.12	5.71	5.6	0.18
	2	4.40			4.11			4.77			5.45		
R-0,55-35% GU	1	4.12	4.2	0.11	4.59	4.6	0.05	4.11	4.1	0.05	4.29	4.5	0.25
	2	4.26			4.53			4.18			4.64		
R-0,55-50% GU	1	3.84	3.8	0.04	3.97	3.9	0.07	4.64	4.4	0.35	4.23	4.4	0.23
	2	3.78			3.87			4.14			4.55		
R-0,55-50% TerC3	1	3.42	3.4	0.04	4.39	4.5	0.20	4.53	4.7	0.26	5.18	5.1	0.05
	2	3.47			4.67			4.90			5.11		
R-0,55-75% GU	1	3.32	3.3	0.04	4.14	3.9	0.33	4.04	4.0	0.04	3.84	3.9	0.08
	2	3.26			3.68			3.98			3.95		

Perméabilité aux ions chlorures			
R-0,55-0% GU	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	5730	<i>(Coulombs)</i>
R-0,55-20% GU	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	6764	<i>(Coulombs)</i>
R-0,55-35% GU	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	6002	<i>(Coulombs)</i>
R-0,55-50% GU	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	5650	<i>(Coulombs)</i>
R-0,55-75% GU	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	6005	<i>(Coulombs)</i>
R-0,55-50% TerC3	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	1478	<i>(Coulombs)</i>
R-0,55-20% GU V	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	4525	<i>(Coulombs)</i>
R-0,55-50% GU V	<i>CHARGE TOTALE(95mm):</i>	5806	<i>(Coulombs)</i>

	Résistance en Gel-Dégel						
	0%	20%	35%	50%	75%	50% Terc3	0.65 50%
Variation de la masse (%)	-0.283	-0.479	-0.246	-0.347	-0.647	-0.701	-1.456
(Vt/V0)2 (%)	101	102	103	98	96	98	91
Déformation (µm/m)	160	98	220	192	216	120	92
Nombre de cycles	315	305	315	300	300	305	301

Module d'élasticité										
		0%	20%	35%	50%	75%	50% TerC3	0.65 50%	20% V	50% V
28j (1)	Module (GPa)	31.39	28.64	27.51	26.99	21.19	26.17	26.98	27.46	25.96
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Module (GPa)	31.56	28.76	27.65	27.05	21.31	26.28	27.17	27.43	26.13
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Moyenne	31.48	28.70	27.58	27.02	21.25	26.23	27.08	27.45	26.04
28j (2)	Module (GPa)	30.77	27.39	29.15	27.44	23.25	25.51	25.52	28.81	27.32
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Module (GPa)	30.89	27.68	29.31	27.55	23.31	25.69	25.65	29.01	27.77
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Moyenne	30.83	27.54	29.23	27.50	23.28	25.60	25.59	28.91	27.55
28 j Moyenne		31.15	28.12	28.41	27.26	22.26	25.91	26.33	28.18	26.79
56j (1)	Module (GPa)	31.89	33.31	29.15	27.06	23.9	26.57	27.9	30.74	27.893
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	0.9979
	Module (GPa)	32.01	31.73	29.31	27.07	24.12	26.12	27.93	30.79	27.449
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	1
	Moyenne	31.95	32.52	29.23	27.07	24.01	26.35	27.92	30.76	27.67
56j (2)	Module (GPa)	36.57	31.33	28.8	28.66	23.9	25.53	25.57	31.08	29.045
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	0.9981
	Module (GPa)	36.89	31.65	28.98	29.14	24.12	25.63	25.58	31.19	29.016
	Coeff. de régression linéaire	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	0.9989
	Moyenne	36.73	31.49	28.89	28.90	24.01	25.58	25.58	31.13	29.03
56 j Moyenne		34.34	32.01	29.06	27.98	24.01	25.96	26.75	30.95	28.35

Propriétés à l'état frais des mélanges de rapport E/C de 0,65					
	R 0,65 0%	R 0,65 20%	R 0,65 35%	R 0,65 50%	R 0,65 75%
Volume (L)	100	100	100	100	100
Affaissement (mm)	65	65	85	75	75
Teneur en air (%)	5	5.3	5.6	6	5
Densité (kg/m ³)	2335	2284	2290	2224	2139
Humidité sable (%)	1.68%	1.72%	1.40%	1.20%	2.40%
Humidité GR (%)	2.66%	2.66%	2.66%	2.66%	3.18%
Essai échantillonné	Compression, traction, flexion, retrait	Compression, traction, flexion, retrait	Compression, traction, flexion, retrait	Compression, traction, flexion, retrait	Compression, traction, flexion, retrait

Propriétés à l'état frais des mélanges de rapport E/C de 0,55 (1)								
	R 0,55 0%		R 0,55 20%		R 0,55 35%		R 0,55 50%	
# gachée	1	2	1	2	1	2	1	2
Volume (L)	80	80	80	80	80	80	75	75
Affaissement (mm)	100	120	105	115	120	110	90	95
Teneur en air (%)	6.6	6.8	5.5	5.7	6.2	6.4	6.2	6.6
Densité (kg/m ³)	2314	2298	2285	2294	2266	2275	2232	2249
Humidité sable (%)	1.21%	0.65%	1.09%	1.40%	1.07%	1.15%	0.70%	1.01%
Humidité GR (%)	3.11%	3.11%	3.29%	3.29%	3.30%	3.30%	3.11%	3.11%
Essai échantillonné	Gel/Dégel, Retrait, Flexion	Compression, traction, Kcl, Keau, module	Gel/Dégel, Retrait, Flexion	Compression, traction, Kcl, Keau, module	Gel/Dégel, Retrait, Flexion	Compression, traction, Kcl, Keau, module	Compression, traction, Kcl, module	Gel/Dégel, Retrait, Flexion, Keau

	Propriétés à l'état frais des mélanges de rapport E/C de 0,55 (2)					
	R 0,55 75%		R 0,55 50% Ter C3		R 0,55 20% V	R 0,55 50% V
# gachée	1	2	1	2	1	1
Volume (L)	85	85	80	80	80	80
Affaissement (mm)	95	100	90	60	120	120
Teneur en air (%)	6.6	6.4	6	4.5	5.1	6
Densité (kg/m ³)	2199	2198	2230	2278	2269	2235
Humidité sable (%)	0.81%	1.09%	0.66%	1.56%	0.54%	0.40%
Humidité GR (%)	2.92%	3.15%	3.60%	3.29%	1.65%	1.65%
Essai échantillonné	Gel/Dégel, Retrait, Flexion	Compression, traction, Kcl, Keau, module	Compression, traction, Kcl, retrait, Gel/Dégel, module	Keau, Flexion	Compression, traction, Kcl, module, retrait	Compression, traction, Kcl, module, retrait

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abbas, A. (2007). *Durability of Green Concrete as a Structural Material*. Doctor of philosophy in Civil Engineering, Carleton University,
- Abbas, A., Fathifazl, G., Burkan Isgor, O., Razaqpur, A. G., Fournier, B. et Foo, S. (2008). Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM International*, volume 5, numéro 1,
- Abd Elhakam, A., Mohamed, A. E. et Awad, E. (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, volume 35, p. 421-427.
- Ann, K. Y., Moon, H. Y., Kim, Y. B. et Ryou, J. (2008). Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*, volume 28, numéro 6, p. 993-999.
- Baofan, C. (2013). Basic mechanical properties and microstructural analysis of recycled concrete. *Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition*, volume 28, numéro 1, p. 104-9.
- (1998). Bulletin d'information technique de la direction du Laboratoire des chaussées, Matériaux recyclés dans les chaussées. volume 3, numéro 3,
- Butler, L., West, J. S. et Tighe, S. L. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, volume 41, numéro 10, p. 1037-1049.
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K. et Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 44, numéro 1, p. 205-220.
- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 24, numéro 9, p. 1616-1620.
- Corinaldesi, V. et Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, volume 23, numéro 8, p. 2869-2876.
- de Juan, M. S. et Gutierrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 872-7.

- de Oliveira, M. B. et Vazquez, E. (1996). Influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, volume 16, numéro 1-3, p. 113-117.
- Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. et Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, volume 37, numéro 5, p. 735-742.
- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B. et Foo, S. (2009). New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 21, numéro 10, p. 601-611.
- Fathifazl, G., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Abbas, A., Fournier, B. et Foo, S. (2010). Shear strength of reinforced recycled concrete beams with stirrups. *Magazine of Concrete Research*, volume 62, numéro 10, p. 685-699.
- Fathifazl, G. (2007). *Structural performance of Steel Reinforced Recycled Concrete*. Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Carleton University,
- Ferreira, L., Barra, M. et de Brito, J. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, volume 63, numéro 8, p. 617-27.
- Gai-Fei Peng, Yan-Zhu Huang, Hai-Sheng Wang, Jiu-Feng Zhang et Qi-Bing Liu (2013). Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete at Low and High Water/Binder Ratios. *Advances in Materials Science & Engineering*, p. 842929 (6 pp.).
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. et Hisada, M. (2011). Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete. *Construction and Building Materials*, volume 25, numéro 5, p. 2426-2431.
- Gonzalez-Fontebao, B. et Martinez-Abella, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, volume 43, numéro 4, p. 429-437.
- Guo, Y. et Wang, X. (2012). Experimental study on forecasting mathematical model of drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *Mathematical Problems in Engineering*, p. 567812 (14 pp.).
- INSPEC SOL (2011). *Caractérisation des matériaux recyclés Granulats MR-2-VM (Ville de Montréal) Provenance: Asphalte Hi-Tech, St-LaurentMontréal, Québec*,
- JianZhuang, X., Bin, L. et ChuanZeng, Z. (2012). On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Science in China Series E: Technological Sciences*, volume 55, numéro 9, p. 2609-16.

-
- Kenai, S. et Debieb, F. (2011). Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates. *Materials and Structures*, volume 44, numéro 4, p. 815-24.
- Kosmatka, Steven H. et autres (2004). *Dosage et Contrôle des Mélanges de Béton*, 7e édition édition. Association Canadienne du Ciment, Ottawa, Ontario, Canada,
- Kou, S. C. et Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction & Building Materials*, volume 35, p. 69-76.
- Kou, S. C., Poon, C. S. et Chan, D. (2008). Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 41, numéro 7, p. 1191-1201.
- Kou, S. C., Poon, C. S. et Dixon, C. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 19, numéro 9, p. 709-717.
- Kou, S. et Poon, C. S. (2006). Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, volume 21, numéro 4, p. 130-136.
- Kou, S., Poon, C. et Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, volume 33, numéro 2, p. 286-291.
- Levy, S. M. et Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 11, p. 1975-1980.
- Li, X. (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 53, numéro 1-2, p. 36-44.
- Lopez-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-Lopez, M. et Lopez-Colina, C. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, volume 29, numéro 12, p. 3022-3028.
- Malesev, M., Radonjanin, V. et Marinkovic, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, volume 2, numéro 5, p. 1204-25.
- Martinez-Lage, I., Martinez-Abella, F., Vazquez-Herrero, C. et Perez-Ordóñez, J. L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, volume 37, p. 171-176.

- Mehta, P. K. et Monterio, P. J. M. (1986). *Concrete (structure, proprieties and materials)*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.,
- NQ 2590-600/2002 Granulats - Matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobé bitumineux et de briques - Classification et caractéristiques.
- Otsuki, N., Miyazato, S. et Yodsudjai, W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 15, numéro 5, p. 443-451.
- Padmini, A. K., Ramamurthy, K. et Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 829-36.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, volume 42, numéro 1, p. 407-415.
- Rao, A., Jha, K. N. et Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 50, numéro 1, p. 71-81.
- Recy-Québec (2008).
- Richardson, A., Coventry, K. et Bacon, J. (2011). Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, volume 19, numéro 2-3, p. 272-277.
- Sagoe-Crentsil, K., Brown, T. et Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 31, numéro 5, p. 707-712.
- Tabsh, S. W. et Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 1163-7.
- Tam, V. W. -, Gao, X. - et Tam, C. M. (2006). Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, volume 58, numéro 7, p. 477-84.
- Tam, V. W. Y. et Tam, C. M. (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, volume 42, numéro 10, p. 3592-602.
- Tam, V. W. Y. et Tam, C. M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 10, p. 2068-77.

- Tam, V. W. Y., Gao, X. F. et Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, volume 35, numéro 6, p. 1195-1203.
- Tam, V. W. Y., Tam, C. M. et Wang, Y. (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials*, volume 21, numéro 10, p. 1928-1939.
- Tarn, V. W. Y., Gao, X. F., Tarn, C. M. et Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 3, p. 364-9.
- Topcu, I. B. et Sengel, S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, volume 34, numéro 8, p. 1307-1312.
- Ville de Montréal, Service des infrastructures (2008). *Devis technique normalisé 6VM-20: Matériaux granulaires de recyclage destinés aux travaux routiers* Montreal, Canada,
- Yang, K., Chung, H. et Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, volume 105, numéro 3, p. 289-296.