

Table des matières

Table des matières	5
Liste des figures	11
Liste des tableaux	15
Notations	16
Résumé	17
Abstract	19
Introduction générale	21
Chapitre 1. Etude bibliographique	27
1. Contexte général	28
1.1 Introduction	28
1.2 Contexte Européen	28
1.3 Situation en France	29
1.3.1 Réutilisation	29
1.3.2 Aspect économique	30
1.3.3 Législation	31
1.4 Perspectives / avenir	32
2. Les granulats recyclés	33
2.1 Production des granulats	33
2.2 Principaux paramètres influant sur les caractéristiques des granulats recyclés	34
3. Les bétons de granulats recyclés	35
3.1 Propriétés du béton à l'état frais	35
3.2 Propriétés du béton à l'état durci	35
3.2.3 Zone de transition interfaciale	35
3.2.2 Propriétés de transfert (perméabilité / porosité)	36
3.2.3 Propriétés mécaniques	36
2.2.1.1 Résistance à la compression	36
3.2.3.2 Résistance à la traction par flexion et par fendage	38
3.2.3.3 Module d'élasticité	38
4. Evolution du comportement du béton avec la température	38
4.1 Modification de la microstructure de la pâte de ciment	38
4.1.1 Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie	38
4.1.2 Evolution de la perte de masse	40
4.1.3 Evolution de la porosité avec la température	42

4.2	Incompatibilité de déformation pâte – granulats	43
4.2.1	Déformation thermique des granulats.....	43
4.2.2	Fissuration de l'interface pâte – granulat	43
4.3	Evolution des propriétés thermiques avec la température	44
4.3.1	Conductivité thermique du béton.....	45
4.3.2	Chaleur spécifique du béton	46
4.4	Evolution des propriétés mécaniques avec la température	48
4.4.1	Résistance à la rupture en compression	49
4.4.2	Résistance à la rupture en traction par fendage.....	50
4.4.3	Module d'Young	51
4.5	Eclatement des bétons sous sollicitation thermique	52
4.5.1	Les différents types d'instabilités thermiques	52
4.5.1.1	L'aspect thermo-hydrique	52
4.5.1.1	L'aspect thermomécanique	53
5.	Problématique du béton recyclé à haute température	54
5.1	Etat de l'art et remarques sur les protocoles expérimentaux	54
5.2	Instabilités thermiques observées après chauffage de bétons de granulats recyclés.....	55
5.3	Comportement thermique et propriétés thermiques des bétons recyclés	56
5.4	Comportement mécanique résiduel des bétons de granulats recyclés	57
5.4.1	Résistance résiduelle en compression.....	57
5.4.2	Résistance résiduelle en traction	59
5.4.3	Module d'élasticité résiduel	60
6.	Conclusion de l'étude bibliographique.....	62
	Références bibliographiques	64
	Chapitre 2. Caractérisation de granulats recyclés	69
1.	Introduction.....	70
2.	Evaluation des méthodes de mesure des propriétés physiques des granulats recyclés – Etude réalisée dans le cadre du Projet National Recybeton	70
2.1	Problématique – objectifs de l'étude.....	70
2.2	Démarche expérimentale	71
2.3	Essais sur gravillons	72
2.3.1	Masse volumique réelle, norme EN 1097-6	72
2.3.2	Coefficient d'absorption à 24 H.....	74
2.3.3	Répétabilité hétérogénéité du lot	75
2.4	Essais sur sable recyclé	75

2.4.1	Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche selon la norme EN 1097-6	75
2.4.2	Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche sur dispositif Büchner.....	76
2.4.3	Comparaison des deux méthodes de séchage de sable.....	77
2.4.4	Comparaison des résultats avec et sans fines (méthode Büchner)	78
2.5	Cinétique d'absorption.....	78
2.5.1	Description des protocoles expérimentaux	78
2.5.1.1	Méthode norme EN 1097-6 (granulats naturels)	78
2.5.1.2	Méthode norme EN 1097-6 (granulats légers).....	79
2.5.2	Cinétique d'absorption d'eau sur gravillons.....	80
2.5.2.1	Résultat de la cinétique à court terme	80
2.2.1.1	Résultat de la cinétique à long terme.....	81
2.5.3	Cinétique d'absorption d'eau du sable recyclé	81
2.6	Etude de l'ouvrabilité des mortiers	84
2.6.1	Méthode 1 – immersion 24 H.....	84
2.6.2	Méthode 2 – ajout de la quantité d'eau d'absorption.....	84
2.7	Conclusion sur l'évaluation des méthodes de caractérisation des propriétés physiques	86
3.	Origine des granulats.....	87
3.1	Les granulats recyclés de laboratoire (GRL)	87
3.2	Les granulats recyclés industriels (GRI)	88
3.3	Les granulats naturels de référence (GSC)	89
4.	Caractérisation physique des granulats	89
4.1	Granulométrie	89
4.2	Détermination de la quantité de mortier attaché aux granulats d'origine.....	90
4.3	Masse volumique, coefficient d'absorption d'eau et porosité	93
4.3.1	Mesure de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés	93
4.3.2	Mesure de la porosité à l'eau sous vide des granulats recyclés.....	94
5.	Caractéristiques pétrographique et minéralogique des granulats recyclés	95
5.1	Pétrographie des granulats recyclés par microscopie optique à lumière polarisée	95
5.2	Analyse cristallographie par diffraction des rayons X	98
5.3	Analyse thermogravimétrique (ATG) et thermo-différentielle (ATD) des granulats.....	100
6.	Conclusion	102
	Références bibliographiques	104

Chapitre 3. Influence des granulats recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques de bétons ordinaires et à hautes-performances.....	105
1. Introduction.....	106
2. Préparation et conditionnement des bétons.....	106
2.1 Formulations et composition des bétons.....	106
2.1.1 Le ciment	106
2.1.2 Le superplastifiant	106
2.1.3 L'eau	107
2.1.4 Les granulats.....	107
2.1.5 Formulation	108
2.2 Procédure de fabrication.....	109
2.2.1 Influence de l'état de pré-saturation des granulats recyclés sur la rhéologie du béton à l'état frais	109
2.2.1.1 Méthode 1 – Ajout de la quantité exacte d'eau d'absorption	110
2.2.1.2 Méthode 2 – Immersion pendant 24h	110
2.2.1.3 Résultats – Valeurs d'ouvrabilité obtenues.....	110
2.2.2 Mise en œuvre.....	111
2.2.3 Propriétés du béton à l'état frais	112
2.3 Conditionnement.....	112
3. Méthodologie expérimentale.....	112
3.1 Observation de l'interface « pâte-granulats » par microscopie.....	113
3.1.1 Microscopie électronique à balayage.....	113
3.2 Propriétés physiques	114
3.3 Mesure des propriétés thermiques.....	115
3.4 Mesure des propriétés mécaniques.....	116
3.4.1 Essai de résistance à la rupture en compression uni-axiale.....	116
3.4.2 Essais de résistance à la rupture en traction par fendage	116
3.4.3 Mesure du module d'élasticité dynamique.....	117
4. Résultats expérimentaux et discussion	118
4.1 Zone de transition interfaciale	118
4.2 Propriétés physiques	123
4.2.1 Masse volumique des bétons.....	123
4.2.2 Porosité accessible à l'eau des bétons	124
4.3 Propriétés thermiques.....	124
4.4 Propriétés mécaniques.....	126
4.4.1 Résultats des mesures.....	126

4.4.2	Comparaison du béton de granulat recyclé de laboratoire et son béton parent ...	127
4.4.3	Comparaison entre le BRL et le BSC à matrice hautes performances.....	128
4.4.4	Comparaison entre les deux types de béton recyclé, BRL et BRI	129
5.	Conclusion	129
	Références bibliographiques.....	131

Chapitre 4. Influence des granulats recyclés sur le comportement des bétons ordinaires ou hautes performances soumis à des températures élevées..... 133

1.	Introduction.....	134
2.	Méthodologie expérimentale.....	134
2.1	Traitements thermiques – cycles de chauffage et de refroidissement.....	134
2.2	Caractérisation du béton soumis au traitement thermique	136
2.3	Etude de la fissuration.....	137
2.4	Etude des propriétés physiques	138
2.4.1	Mesure de la perte de masse	138
2.4.2	Mesure de la porosité	138
2.5	Etude des propriétés thermiques des bétons	139
2.5.1	Conductivité, diffusivité et chaleur spécifique	139
2.5.2	Réponse thermique des éprouvettes chauffées	139
2.6	Etude des propriétés mécaniques résiduelles des bétons	140
3.	Résultats expérimentaux et discussion	141
3.1	Observation de la dégradation des bétons recyclés	141
3.1.1	Béton recyclé de laboratoire, E/C 0.6.....	142
3.1.2	Béton recyclé industriel, E/C 0.6	144
3.1.3	Béton recyclé de laboratoire, E/C 0.3.....	146
3.1.4	Béton recyclé industriel, E/C 0.3	148
3.1.5	Etude statistique de la fissuration.....	149
3.2	Etude de l'évolution des propriétés physiques en fonction de la température	153
3.2.1	Evolution de la perte de masse	153
3.2.2	Evolution de la porosité.....	154
3.2.2.1	Porosité à l'eau / porosité à l'éthanol	154
3.2.2.2	Evolution de la porosité en fonction de la température	155
3.3	Evolution des propriétés thermiques en fonction de la température	156
3.3.1	Conductivité, diffusivité et chaleur spécifique	157
3.3.1.1	Conductivité thermique.....	157
3.3.1.2	Chaleur spécifique	158

3.3.2	Différence de température entre la surface et le cœur de l'éprouvette	159
3.4	Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction de la température	161
3.4.1	Performances mécaniques des bétons étudiés.....	161
3.4.2	Comparaison entre le béton recyclé de laboratoire ordinaire et son béton parent	
	165	
3.4.3	Comparaison entre les bétons recyclés à matrice ordinaires et hautes performances	
	166	
3.4.4	Comparaison entre les deux types de bétons recyclés, BRL et BRI.....	167
4.	Conclusion	168
	Références bibliographiques	170
	Chapitre 5. Impacts environnementaux et analyse de cycle de vie	171
1.	Introduction.....	172
2.	Notion de déchet inerte et intérêt du recyclage.....	172
3.	Impacts environnementaux et analyse de cycle de vie (ACV).....	175
3.1	Définitions des objectifs et du champ de l'étude.....	175
3.1.1	Unité fonctionnelle.....	175
3.1.2	Frontières du système	176
3.2	Analyse de l'inventaire	176
3.3	Evaluation de l'impact	176
3.4	Interprétation des résultats	176
4.	Evaluation environnementale des granulats.....	177
5.	Définition des objectifs et du champ d'étude	178
5.1	Champ de l'étude	178
5.2	Unité fonctionnelle.....	179
5.3	Objectifs de l'étude	179
6.	Inventaire du cycle de vie	180
6.1	Hypothèses générales	180
6.2	Phase de production.....	181
7.	Résultats	182
7.1	Comparaison des différents scenarii étudiés	185
7.2	Influence du transport.....	186
8.	Conclusion	186
	Références bibliographiques	188
	Conclusion générale et perspectives.....	189

Liste des figures

Figure 1-1. Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de démolition produite aux Pays-Bas, en Allemagne, au Royaume-Uni et en France. (UEPG, 2006) UEPG : Union Européenne de Producteurs de Granulats	29
Figure 1-2. Résistance en compression relative minimum estimée pour des bétons formulés à partir de différentes qualités de granulats recyclés (A > B > C > D), à différents taux de substitution [Brit 2014].....	37
Figure 1-3. Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours du chauffage [Cast 2004].....	40
Figure 1-4. Analyses ATD (a) et ATG (b) de quatre pâtes de ciment [Ye 2007].....	40
Figure 1-5. Évolution de la perte de masse du béton en fonction de la température [Khou 1988]	41
Figure 1-6. Evolution de la perte de masse de bétons chauffés à vitesse lente (1°C/min) en fonction de la température [Hage 2004].....	42
Figure 1-7. Évolution de la porosité de bétons chauffés à 150, 300 et 450°C [Pliy 2010]	43
Figure 1-8. Evolution de la conductivité thermique du béton en fonction de la température [Xing 2010].....	45
Figure 1-9. Evolution de la chaleur spécifique du béton en fonction de la température et de la teneur en eau (u) du béton exprimée en masse [Euro 2004].....	47
Figure 1-10. Evolution de la chaleur spécifique de différents bétons secs en fonction de la température. [Baza 1996]	48
Figure 1-11. Résistances à la compression de bétons à chaud de bétons mesurée par différents auteurs [Fare 2009]	50
Figure 1-12. Evolution de la résistance en traction d'un béton en fonction de la température, mesurée à chaud et après refroidissement [Schn 1985]	51
Figure 1-13. Evolution du module d'élasticité en fonction de la température [Bamo 2007]	52
Figure 1-14. Illustration du mécanisme d'écaillage par pression hydraulique du béton [Zeim 2006]..	53
Figure 1-15. Principales hypothèses concernant l'éclatement du béton à haute température : (a) phénomènes de pression interne [Ande 1997] et (b) dilatations thermiques empêchées [Baza 1996] [Robe 2008]	54
Figure 1-16. Evolution de la température dans le four et dans le béton pour 2 durées d'exposition : 500°C pendant 1h à gauche, puis 500°C pendant 4h à droite [Zega 2006]	55
Figure 1-17. Surfaces des éprouvettes cubiques chauffées à 800 °C [Xiao 2013]	56
Figure 1-18. Températures enregistrées dans le four et à l'intérieur de d'éprouvettes de béton formulés à partir de granulats de nature différentes avec une E/C de 0.7 [Zega 2009].....	57
Figure 1-19. Etude comparative des résistances en compression résiduelles en fonction des taux de substitution et de la température	58
Figure 1-20. Résistance en compression résiduelle des bétons recyclés en fonction du taux de substitution	59
Figure 1-21. Résistances résiduelles en traction par fendage de bétons recyclés à différents taux de substitution en fonction de la température. [Sarh 2013] en rouge et [Viei 2011] en vert.....	59
Figure 1-22. Résistances résiduelles en traction par fendage de bétons recyclés à différentes températures en fonction du taux de substitution.....	60
Figure 1-23. Evolution du module d'élasticité de bétons recyclés en fonction du taux de substitution et à différentes températures.....	61
Figure 1-24. Evolution du module d'élasticité résiduel en fonction de la température, à taux de substitution donné	61
Figure 2-1. Photographie du bain thermostaté.....	72
Figure 2-2. Schéma explicatif, méthode de mesure de masse volumique selon la norme EN 1097-6.	73

Figure 2-3. Schéma du montage expérimental de séchage sur Büchner	76
Figure 2-4. Photographies montrant l'évolution de l'état hydrique du sable a : au démarrage du pompage, b : après 5 minutes de pompage, c : après 10 minutes de pompage.	77
Figure 2-5. Schéma explicatif de la méthode de mesure de cinétique selon la norme EN 1097-6	79
Figure 2-6. Schéma explicatif de la méthode de mesure de cinétique décrite par Tam et al. [2]	79
Figure 2-7. Cinétique d'absorption des granulats recyclés de granulométrie (a) [4-10] et (b) [10-20] sur 10 minutes.....	80
Figure 2-8. Cinétique d'absorption des granulats recyclés de granulométrie [4-10] et [10-20] sur un mois	81
Figure 2-9. Cinétique d'absorption du sable recyclé (a) avec fines et (b) sans fines sur 10 minutes ...	82
Figure 2-10. Répétabilité des mesures de cinétique d'absorption du sable recyclé (a) avec fines et (b) sans fines sur 10 minutes	83
Figure 2-11. Essai au mini-cône.....	85
Figure 2-12. Évolution de la maniabilité des mortiers de sable recyclé et normalisé (a) en valeurs absolues et (b) en valeur relatives par rapport à l'étalement initial.....	86
Figure 2-13. Granulats Recyclés de Laboratoire (GRL)	87
Figure 2-14. Centrale de tri Picheta dans le Val d'Oise	88
Figure 2-15. Les granulats recyclés industriels (GRI).....	88
Figure 2-16. Les granulats silico-calcaires naturels (GSC)	89
Figure 2-17. Analyse granulométrique des granulats recyclés GRL et GRI, selon la méthode Dreux-Gorisso [Dre 2002].....	90
Figure 2-18. Diagramme de phases du sulfate de sodium [DENE 2014].....	91
Figure 2-19. Résultat de la cristallisation du sulfate de sodium au contact des granulats de laboratoire	92
Figure 2-20. Aspect des granulats après retrait de la gangue de mortier, à gauche : GRL, à droite : GRI	93
Figure 2-21. À gauche : GRlgm, silex (S), quartz (Q) et oxydes de fer (OF) en LPA, à droite: GRlgm, grain de glauconite (LPNA)	96
Figure 2-22. À gauche : GRIm (LPA), à droite : GRCm (LPA) - micrite (M), grès (G), algue fossilisée (AF), carbonates (C), silex (S).....	97
Figure 2-23. À gauche : GRlgm, porosité en périphérie des grains ; à droite : GRIm porosité à l'interface pâte/granulat	97
Figure 2-24. GRLgm silex, carbonate et grains de quartz.....	98
Figure 2-25. Principe de la loi de Bragg	99
Figure 2-26. Diffractogramme du mortier entourant les Granulats Recyclés de Laboratoire	99
Figure 2-27. Diffractogramme du mortier entourant les Granulats Recyclés Industriels	100
Figure 2-28. Analyses ATD et ATG des granulats recyclés de laboratoire.....	102
Figure 2-29. Analyses ATD et ATG des granulats recyclés industriels.....	102
Figure 3-1. Procédure de mise en œuvre (a) égouttage des granulats (b) malaxage des matériaux secs et (c) essai d'affaissement au cône d'Abams	111
Figure 3-2. Conditionnement des éprouvettes	112
Figure 3-3. À gauche : électron secondaire, à droite : électron rétrodiffusé	113
Figure 3-4. Microscopie électronique à balayage	114
Figure 3-5. Mesure des propriétés thermiques du béton à l'aide d'une sonde Hot-Disk	115
Figure 3-6. Schéma de l'assai mécanique de traction par fendage (essai brésilien).....	117
Figure 3-7. Mesures des propriétés mécaniques (a) résistance à la rupture en compression (b) essai de traction par fendage, et (c) mesure du module d'élasticité dynamique.....	118
Figure 3-8. Différentes interfaces dans les bétons de granulats recyclés.....	119

Figure 3-9. Images par microscopie optique de (a) l'interface pâte-granulat dans un échantillon de BRI 0,3 (b) et (c) l'interface entre l'ancienne et la nouvelle pâte d'un échantillon de BRL 0,6 (b) et (c) représentent la même section, (b) sous lumière polarisée analysée et (c) sous lumière polarisée non analysée (AP : ancienne pâte ; NP : nouvelle pâte).....	120
Figure 3-10. Microscopie électronique à balayage (contraste chimique). BRI 0,6 en contraste chimique (a); BRI 0,6 cartographie Ca (b); BRI 0,3 contraste chimique (c); BRI 0,3 cartographie Ca (d); BRL 0,6 contraste chimique (e); BRL 0,6 cartographie Ca (f); BRL 0,3 contraste chimique (g); BRL 0,3 cartographie Ca (h) (AP : ancienne pâte ; NP : nouvelle pâte).....	121
Figure 3-11. Microscopie électronique à balayage, cartographie élémentaire du K (potassium) au niveau de l'interface ancienne pâte / nouvelle pâte de (a) un granulat de BRL 0,6 ; (b) un granulat de BRI 0,6.....	122
Figure 3-12. Masse volumique apparente des bétons recyclés et de référence séchés à l'étuve.....	123
Figure 3-13. Porosité accessible à l'eau des bétons recyclés et de référence étudiés	124
Figure 3-14. Propriétés mécaniques des bétons recyclés et de référence étudiés (a) résistance à la rupture en compression ; (b) résistance à la rupture en traction; (c) module d'Young dynamique ..	127
Figure 4-1. Cycles théoriques de chauffage et refroidissement imposés aux bétons étudiés.....	135
Figure 4-2. (a) four électrique ; (b) centrale d'acquisition	136
Figure 4-3. Disposition des éprouvettes dans le four	136
Figure 4-4. Disposition des thermocouples dans les éprouvettes de béton.....	140
Figure 4-5. Illustration des différents types de fissures. (a) à l'interface "ancienne pâte - nouvelle pâte", (b) à l'interface "pâte - granulat d'origine", et (c) transgranulaire.....	141
Figure 4-6. BRL 0,6 avant chauffage	142
Figure 4-7. BRL 0,6 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C.....	143
Figure 4-8. BRI 0,6 avant chauffage.....	144
Figure 4-9. BRI 0,6 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C	145
Figure 4-10. BRL 0,3 avant chauffage	146
Figure 4-11. BRL 0,3 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C	147
Figure 4-12. BRI 0,3 avant chauffage.....	148
Figure 4-13. BRI 0,3 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C	149
Figure 4-14. Valeurs statistiques de l'aire totale des fissures pour chaque formulation de béton recyclé testée	152
Figure 4-15. Valeurs statistiques de la longueur totale de fissures pour chaque formulation de béton recyclé testée	152
Figure 4-16. Perte de masse moyenne relative des bétons étudiés en fonction de la température de chauffage.....	153
Figure 4-17. Comparaison de l'évolution de la porosité à l'eau et à l'éthanol en fonction de la température du BRL 0,6	154
Figure 4-18. Évolution de la porosité accessible à l'eau des bétons en fonction de la température de chauffage.....	155
Figure 4-19. Evolution de la conductivité thermique des bétons étudiés (a) à matrice ordinaire, et (b) à matrice hautes performances, en fonction de la température, à chaud et après refroidissement	157
Figure 4-20. Evolution de la chaleur spécifique des bétons étudiés (a) à matrice ordinaire et (b) à matrice hautes performances en fonction de la température, à chaud et après refroidissement	159
Figure 4-21. Variation de la différence de température entre le centre et la surface de l'éprouvette en fonction de la température de surface des bétons recyclés et de référence étudiés	160
Figure 4-22. Résistance résiduelle en compression des bétons recyclés et de référence en fonction de la température de chauffage.....	164

Figure 4-23. Résistance résiduelle en traction par fendage des bétons recyclés et de référence en fonction de la température de chauffage	164
Figure 4-24. Modules d'Young résiduels dynamiques des bétons recyclés et de référence en fonction de la température de chauffage.....	165
Figure 4-25. Combustion de déchets de construction non cimentaires dans les éprouvettes de BRI	168
Figure 5-1. Répartition des flux entrants de déchets inertes [ADEME 2012]	173
Figure 5-2. Répartition par tonnage des sous-activités du bâtiment [ADEME 2012]	174
Figure 5-3. Étapes d'une analyse du cycle de vie	177
Figure 5-4. Comparaison des impacts de granulats selon leur source [ADEME 2012]	178
Figure 5-5. Répartition des impacts - alternative sans recyclage.....	184
Figure 5-6. Répartition des impacts - alternative avec recyclage in-situ	184
Figure 5-7. Répartition des impacts - alternative avec recyclage hors site.....	184
Figure 5-8. Comparaison des impacts pour les trois scenarii étudiés.....	185
Figure 5-9. Emissions de gaz à effet de serre (en g CO ₂ eq) liées au transport (en tonne par km)....	186

Liste des tableaux

Tableau 1-1. Etude réalisée par [Tam 2008]	31
Tableau 1-2. Prix comparés des granulats recyclés et de granulats naturels dans différents pays de l'Union Européenne (UEPG, 2005)	31
Tableau 2-1. Récapitulatif des essais réalisés	71
Tableau 2-2. Récapitulatif des mesures de masses volumiques ρ_{rd} obtenues avec la méthode normée pour une prise d'essai unique.....	73
Tableau 2-3. Récapitulatif des mesures de masse volumique ρ_{rd} obtenues avec la méthode normée	73
Tableau 2-4. Récapitulatif des mesures de coefficient d'absorption d'eau avec la méthode normée pour une prise d'essai unique	74
Tableau 2-5. Récapitulatif des mesures de coefficient d'absorption d'eaux avec la méthode normée74	
Tableau 2-6. Comparaison des valeurs de masse volumique et coefficient d'absorption d'eau obtenues pour le sable recyclé avec la méthode normée et la méthode Büchner	77
Tableau 2-7. Comparaison des valeurs de masse volumique et coefficient d'absorption d'eau obtenues pour le sable recyclé avec et sans fines	78
Tableau 2-8. Pourcentage massique de mortier dans les granulats recyclés	92
Tableau 2-9. Masse volumique et coefficients d'absorption d'eau des granulats recyclés	93
Tableau 2-10. Porosité à l'eau sous vide des granulats recyclés.....	94
Tableau 3-1. Composition du ciment CEM I 52.5 N déterminé par fluorescence X.....	106
Tableau 3-2. Caractéristiques des granulats	108
Tableau 3-3. Composition des bétons élaborées à partir des conditions saturées surface sèche. Données pour 1m ³ . BRI : Béton Recyclé Industriel, BRL : Béton Recyclé de Laboratoire, BSC : Béton Silico-Calcaire.	108
Tableau 3-4. Ouvrabilité de bétons recyclés en fonction de la méthode de pré-saturation des granulats.....	111
Tableau 3-6. Propriétés thermiques des bétons étudiés à température ambiante	125
Tableau 3-7. Propriétés mécaniques des bétons étudiés à température ambiante.....	126
Tableau 4-1. Récapitulatif des essais réalisés pour chaque type de béton	137
Tableau 4-2. Comparaison de la fissuration des bétons recyclés ordinaires BRL 0.6 et BRI 0.6 après les cycles de chauffage-refroidissement à 450°C et 750°C.....	150
Tableau 4-3. Comparaison de la fissuration des bétons recyclés à matrice hautes performances BRL 0.3 et BRI 0.3 après les cycles de chauffage-refroidissement à 450°C et 750°C.....	151
Tableau 4-4. Fissuration des bétons recyclés étudiés.....	151
Tableau 4-5. Valeurs des porosités accessibles à l'eau en fonction de la température de chauffage	156
Tableau 4-6. Résistance résiduelle en compression uni-axiale (les valeurs de BSC 0.6 et BSC 0.3 sont celles obtenues par Zhi Xing dans ses travaux de thèse [Xin 2010]).....	161
Tableau 4-7. Résistance résiduelle en traction par fendage (les valeurs de BSC 0.6 et BSC 0.3 sont celles obtenues par Zhi Xing dans ses travaux de thèse [Xin 2010]).....	162
Tableau 4-8. Modules d'Young dynamiques résiduels (les valeurs de BSC 0.6 et BSC 0.3 sont celles obtenues par Zhi Xing dans ses travaux de thèse [Xin 2010]).....	163
Tableau 5-1. Caractéristiques mécaniques comparatives de matériaux de construction	174
Tableau 5-2. Formulation étudiée. Données pour un m ³	180
Tableau 5-3. Impacts environnementaux d'un m ³ de béton naturel sans recyclage	183
Tableau 5-4. Impacts environnementaux d'un m ³ de béton recyclé in situ.....	183
Tableau 5-5. Impacts environnementaux d'un m ³ de béton recyclé hors site	183
Tableau 5-6. Méthodes utilisées	183

Notations

GRL	Granulat Recyclé de Laboratoire
GRI	Granulat Recyclé Industriel
GSC	Granulat Silico-Calcaire naturel de référence
BRL	Béton Recyclé de Laboratoire
BRL 0,6	Béton Recyclé de Laboratoire à matrice ordinaire
BRL 0,3	Béton Recyclé de Laboratoire à matrice hautes performances
BRI	Béton Recyclé Industriel
BRI 0,6	Béton Recyclé Industriel à matrice ordinaire
BRI 0,3	Béton Recyclé Industriel à matrice hautes performances
BSC	Bétons Silico-Calcaire naturel de référence
BSC 0,6	Bétons Silico-Calcaire naturel de référence à matrice ordinaire
BSC 0,3	Bétons Silico-Calcaire naturel de référence à matrice hautes performances
fc	Résistance à la rupture en compression
fc (T)	Résistance à la rupture en compression à une température T donnée
fc (20)	Résistance à la rupture en compression à température ambiante
ft	Résistance à la rupture en traction
ft (T)	Résistance à la rupture en traction à une température T donnée
ft (20)	Résistance à la rupture en traction à température ambiante
E	Module d'Young dynamique
E (T)	Module d'Young dynamique à une température T donnée
E (20)	Module d'Young dynamique à température ambiante
λ	Conductivité thermique

Résumé

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde après l'eau. Les professionnels de la construction, de plus en plus confrontés aux questions liées à la préservation de l'environnement, font face depuis quelques années à une double problématique. D'un part, le nombre croissant de construction conduit à des difficultés d'approvisionnement en matière première. D'autre part, le secteur du bâtiment en Ile-de-France produit annuellement plus de 11 millions de tonnes de déchets, qui sont aujourd'hui encore trop souvent déposés en installation de stockage. Il devient évident que la valorisation de ces déchets est un enjeu environnemental majeur, et que leur réutilisation sous forme de granulats destinés à la fabrication de nouveaux bétons permettrait la préservation des ressources naturelles, mais également une limitation de la pollution par enfouissement.

Le travail de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour objectif d'améliorer la compréhension du comportement des bétons de granulats recyclés soumis à des températures élevées. En effet, lorsque le béton est soumis à des températures élevées, lors d'un incendie par exemple, le matériau subit de nombreuses altérations - dilatation des granulats, retrait de la pâte de ciment, augmentation de la pression de vapeur au sein du matériau, ou encore différentes contraintes thermiques qui peuvent conduire à des phénomènes de fissuration et d'écaillage. De par leur composition, les granulats recyclés présentent des caractéristiques différentes des granulats naturels : ils sont plus poreux, ont un coefficient d'absorption d'eau plus important, contiennent des hydrates, et présentent des zones de transition interfaciale, connues pour être la zone de faiblesse mécanique du béton. Nous comprenons qu'il est primordial d'être en mesure d'anticiper le comportement du béton recyclé à haute température afin de permettre son utilisation dans le bâtiment.

Les recherches présentées ici consistent en une approche expérimentale. Deux sortes de granulats recyclés sont testées, un « granulat recyclé de laboratoire » issu d'un béton naturel formulé, coulé et concassé au laboratoire, et un « granulat recyclé industriel » issu d'un chantier de démolition. Les bétons incorporant ces granulats sont formulés avec deux types de matrices cimentaires : une matrice ordinaire, avec un rapport E/C de 0.6 et une matrice hautes performances, avec un rapport E/C de 0.3. Les bétons sont soumis à des cycles de chauffage – refroidissement jusqu'à 150°C, 300°C, 450°C et 750°C, à vitesse lente afin d'assurer l'homogénéité de la température au sein des échantillons. A l'issue de chaque traitement thermique, l'évolution des propriétés thermiques, mécaniques et microstructurales est analysée. L'enjeu de ces travaux est également de comprendre l'interaction entre les granulats et les matrices de compacité variable, à température élevée. L'étude est complétée par une analyse de cycle de vie (ACV) qui vise à évaluer l'intérêt environnemental du recyclage des déchets de démolition sous forme de nouveaux granulats.

MOTS CLES: BETON; GRANULATS RECYCLES; PERFORMANCES MECANIQUES; TRAITEMENT THERMIQUE; HAUTE TEMPERATURE, MICROSTRUCTURE.

Abstract

In the past decade, constructions sites have been growing more than ever, and the aggregate production and importation are not sufficient any more to cover the needs in construction materials. The goal set in France is to re-use 20 more Mt each year of waste as recycled material for building sites before 2020.

The objective of this experimental study is to assess the high temperature behavior of ordinary and high performance concrete made with recycled coarse aggregates (RCA). Concrete behavior at high temperature -expansion of aggregates, withdrawal of cement paste, increase of vapor pressure, chemical transformations...- can lead to several phenomena such as spalling, and a dramatic loss of mechanical properties. As aggregates occupy a large volume of concrete, around 60-80%, they play a major role in the heat and mass transfer into concrete during fire. Recycled coarse aggregates (RCA) being different from natural coarse aggregates (NCA) in many ways – higher porosity, double interfacial transition zone – it is essential to study recycled aggregate concrete behavior when submitted to high temperature.

Two types of recycled coarse aggregates are used. An industrial one, obtained from a building demolition site and a laboratory one was obtained from a parent concrete (PC) mixed, cast and crushed in the laboratory. From both recycled aggregates, normal concrete ($w/c = 0.6$) and high performance concrete ($w/c = 0.3$) are cast. The four recycled concretes are compared to reference concretes, with the same formulation, made with silico-calcereous coarse natural aggregates. Concretes cylinders are subjected to heating/cooling cycles, up to 150, 300, 450 or 750°C. The heating rate is 0.5°C/min, and is followed by a 2 hours stage once the target temperature is reached, to insure an homogeneous temperature inside the cylinder. Cracks of concrete specimen are observed by optical microscopy, then their residual mechanical performances are measured (compressive strength, splitting tensile strength and dynamic young modulus). Their thermal behavior (conductivity, diffusivity, specific heat, thermal gradient during heating), and the evolution of their microstructure (loss of weight, porosity) are also studied.

The study is completed with a Life Cycle Analysis were the life cycle of 1m³ of concrete is studied according three options. A scenario without recycling, a scenario were demolition waste are recycled into aggregates in-situ, a scenario were demolition waste are recycled into aggregates and transported to another construction site.

KEY WORDS: CONCRETE; RECYCLED COARSE AGGREGATES; MECHANICAL PROPERTIES; THERMAL TREATMENT; HIGH TEMPERATURE, MICROSTRUCTURE.

Introduction générale

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde après l'eau. Les professionnels de la construction, de plus en plus confrontés aux questions liées à la préservation de l'environnement, font face depuis quelques années à une double problématique. Dans les régions très urbanisées comme en Ile-de-France, le nombre de constructions augmente, et avec elles le besoin en matières premières. Le béton est un des matériaux les plus utilisés dans les ouvrages modernes, et le besoin en granulats, un de ses composants, s'élève en moyenne à 6 tonnes par habitant chaque année au niveau national. Or, les carrières de granulats s'épuisent. Elles sont de plus en plus classées ICPE, soit « Installations Classées Pour l'Environnement », les espaces potentiellement exploitables se raréfient, et les professionnels de la construction font face à des difficultés d'approvisionnement. Ils se trouvent face à la nécessité d'acheminer des granulats depuis d'autres régions, avec de fait un transport supplémentaire qui a un coût environnemental évident. D'autre part, le secteur du bâtiment en Ile-de-France produit annuellement plus de 11 millions de tonnes de déchets, qui sont aujourd'hui encore trop souvent déposés en installation de stockage. Il devient évident que la valorisation de ces déchets est un enjeu environnemental majeur, et que leur réutilisation sous forme de granulats destinés à la fabrication de nouveaux bétons serait une alternative bénéfique pour l'environnement. Elle permettrait en effet la préservation des ressources naturelles, mais également une limitation de la pollution par enfouissement. Le recyclage est désormais en marche, avec notamment la mise en place du projet national RECYBETON, réunissant de nombreux scientifiques et industriels du secteur de la construction pour décider des cadres d'utilisation de ce « nouveau » matériau.

Les propriétés du béton recyclé ont déjà été étudiées par de nombreux scientifiques à travers le monde, mais très peu d'auteurs se sont intéressés à la problématique de la durabilité de ce matériau à haute température. En effet, lorsque le béton est soumis à des températures élevées, lors d'un incendie par exemple, le matériau subit de nombreuses altérations. On peut observer une dilatation des granulats, un retrait de la pâte de ciment, une augmentation de la pression de vapeur au sein du matériau, ou encore différentes contraintes thermiques qui peuvent conduire à des phénomènes de fissuration et d'écaillage.

De par leur composition, les granulats recyclés présentent des caractéristiques différentes des granulats naturels, et leur comportement à haute température peut s'avérer distinct. En effet, les granulats recyclés sont plus poreux, ont un coefficient d'absorption d'eau plus important, contiennent des hydrates, et présentent des zones de transition interfaciale, connues pour être la zone de faiblesse mécanique du béton. Nous comprenons qu'il est primordial d'être en mesure d'anticiper le comportement du béton recyclé à haute température afin de permettre son utilisation dans le bâtiment.

Le travail de thèse de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour objectif d'améliorer la compréhension du comportement des bétons de granulats recyclés soumis à des températures élevées. Les recherches présentées ici consistent en une approche expérimentale. Les travaux ont été réalisés dans le cadre de la fédération « Institut des matériaux » de l'Université de Cergy-Pontoise, puisqu'ils résultent d'une collaboration entre le « Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil » (L2MGC) et le laboratoire « Géosciences et Environnement Cergy » (GEC). La thèse est en partie financée par la Fondation de l'Université de Cergy-Pontoise, via la Chaire Eco-Quartiers et Villes Durables. Les recherches visent à évaluer l'influence des granulats recyclés sur le comportement du béton à haute température. Deux sortes de granulats recyclés sont testées, un « granulat recyclé de laboratoire » issu d'un béton naturel formulé, coulé et concassé au laboratoire, et dont nous maîtrisons la composition, et un « granulat recyclé industriel » issu d'un chantier de démolition, et qui nous place dans les conditions réelles d'utilisation de déchets du BTP. Les bétons incorporant ces granulats sont formulés avec deux types de matrices cimentaires : une matrice ordinaire, avec un rapport E/C de 0.6 et une matrice hautes performances, avec un rapport E/C de 0.3. Les bétons sont soumis à des cycles de chauffage – refroidissement jusqu'à 150°C, 300°C, 450°C et 750°C, à vitesse lente afin d'assurer l'homogénéité de la température au sein des échantillons. À l'issue de chaque traitement thermique, l'évolution des propriétés thermiques, mécaniques et microstructurales est analysée. L'enjeu de ces travaux est également de comprendre l'interaction entre les granulats et les matrices de compacité variable, à température élevée.

Le manuscrit est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre est une étude bibliographique faisant un état de l'art et une analyse critique des travaux antérieurs sur le sujet du béton recyclé et du béton à haute température. Le chapitre est divisé en trois parties faisant état de domaines de recherche distincts. Dans un premier temps, les propriétés à température ambiante des bétons recyclés sont décrites et analysées. Les travaux concernant les propriétés mécaniques, les caractéristiques physiques et microstructurales, ainsi que l'étude de la zone de transition interfaciale dans les bétons de granulats recyclés sont exposés. Puis, les travaux portant sur le comportement du béton à haute température sont synthétisés. L'évolution des caractéristiques physiques (perte de masse, porosité) thermiques (conductivité, chaleur massique) et mécaniques (résistances à la rupture en compression et traction, module d'Young) sont prises en considération. Enfin, les quelques travaux portant sur le comportement des bétons de granulats recyclés à haute température sont décrits et discutés.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des granulats recyclés. Dans un premier temps, nous procédons à l'évaluation de méthodes de caractérisation des granulats naturels, appliquées aux recyclés. Cette étude, commanditée par le projet national RECYBETON, consiste à

évaluer d'une part l'applicabilité de la norme actuelle EN 1097-6 (concernant les mesures de masses volumiques) à l'étude des granulats recyclés, et d'autre part de mesurer leur cinétique d'absorption sur les 10 premières minutes et sur la durée d'un mois. Des méthodes de mesures alternatives sont également testées. Nous travaillons ici avec les granulats, gravillons et sable, fournis pour l'étude. Dans une deuxième partie, les caractéristiques des granulats utilisés dans ces travaux de thèse sont déterminées. Nous étudions leurs caractéristiques physiques (granulométrie, porosité, masse volumique), ainsi que leur pétrographie et leurs caractéristiques minéralogiques, telles que leur cristallographie par diffraction des rayons X et leur thermogravimétrie par ATD-ATG.

Le troisième chapitre traite de l'influence des gravillons recyclés et de la compacité de la matrice sur le comportement de bétons recyclés à température ambiante. Deux types de gravillons recyclés sont étudiés, un gravillon recyclé de laboratoire (GRL) et un gravillon recyclé industriel (GRI). Pour chaque type de granulat, deux bétons sont réalisés, un béton à matrice ordinaire, et un béton à matrice hautes performances. Ces bétons sont comparés à des bétons de référence de granulat silico-calcaire de même formulation. Les caractéristiques de ces six bétons sont déterminées dans les mêmes conditions expérimentales afin de distinguer l'influence des granulats dans une même matrice cimentaire et l'influence de la compacité de la matrice en fonction de la nature des granulats. Sont présentées, les caractéristiques physico-chimiques (densité, porosité), les propriétés thermiques (conductivité, diffusivité et chaleur spécifique) et les propriétés mécaniques (résistance en compression uni-axiale, résistance en traction par fendage et module d'Young dynamique) des différents bétons à température ambiante.

Le quatrième chapitre porte sur l'influence des granulats recyclés sur le comportement du béton soumis à de hautes températures. Les bétons présentés dans le chapitre 3 sont soumis à des traitements thermiques de chauffage – refroidissement de différentes amplitudes, allant de la température ambiante jusqu'à 150, 300, 450, et 750 °C. On cherche à déterminer l'influence des granulats issus de béton concassé selon la compacité de la matrice cimentaire, et à suivre l'évolution de différentes propriétés (physiques, thermiques et mécaniques) en fonction de la température. Nous présenterons l'évolution des dégradations des six bétons étudiés, soit la progression de la fissuration, la perte de masse et l'évolution de la porosité après les différentes sollicitations thermiques. Ces caractéristiques permettent d'évaluer l'état de dégradation des bétons, et notamment la qualité des interfaces pâte - granulat ou ancienne pâte - nouvelle pâte. Nous étudions également les différences induites par les granulats sur le comportement thermique (conductivité, chaleur massique, évolution de la température au sein du matériau) et mécanique résiduel (résistance à la rupture en compression uni-axiale et en traction par fendage, module d'élasticité dynamique) des différents bétons.

Le cinquième chapitre consiste en une analyse de cycle de vie (ACV) qui vise à évaluer l'intérêt environnemental du recyclage des déchets de démolition sous forme de nouveaux granulats. Trois alternatives de vie d'un m^3 de béton sont comparées. Une alternative sans recyclage avec l'utilisation de granulats naturels et une mise en décharge en fin de vie du matériau, une alternative avec recyclage in-situ de déchets de démolition sous forme de granulats sur un site de chantier unique, et une alternative de recyclage hors site, dans laquelle les déchets de démolition sont transportés sur un autre chantier afin d'y être recyclés.

A la fin de ce mémoire de thèse de doctorat se trouve une conclusion composée d'une synthèse générale de nos travaux, ainsi que des perspectives de recherche envisagées.

Chapitre 1. Etude bibliographique

1. Contexte général

1.1 Introduction

La protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles sont devenues un enjeu socio-économique majeur. Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde, après l'eau. Les industries, notamment du bâtiment, sont aujourd'hui contraintes de modifier leurs techniques de production et/ou de mise en œuvre, afin d'adopter des méthodes s'inscrivant dans un contexte de développement durable.

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

La production régionale de granulats étant en baisse en Ile-de-France, on fait, de plus, face à la nécessité d'acheminement des granulats d'autres régions, transport entraînant un impact environnemental et un coût économique évidents.

La problématique environnementale des bétons se retrouve également en fin de vie du matériau. Le secteur du bâtiment produit une quantité de déchets extrêmement importante (environ 11M de tonnes annuellement en Ile-de-France) dont la partie principale est aujourd'hui éliminée en décharge.

On comprend alors la nécessité de trouver rapidement une alternative moins impactante sur l'environnement qui permettrait d'une part la préservation des ressources naturelles, mais également l'économie de matériaux mis en décharge, et une réduction des transports. Il serait en effet alors idéal de n'employer que des matériaux locaux et, au mieux, réutilisés in situ sur les chantiers. Il s'agit alors de raisonner en termes d'analyse de cycle de vie (ACV).

Cette étude bibliographique détaillera le contexte socio-économique dans lequel s'inscrit l'utilisation du béton recyclé, puis résumera l'état de l'art consacré aux propriétés du béton recyclé, au comportement du béton à haute température. Nous détaillerons enfin le peu d'études réunissant déjà les deux aspects cités, à savoir le comportement du béton recyclé à haute température.

1.2 Contexte Européen

D'après une étude de la commission Européenne [stud 2005], les déchets de construction et de démolition représentent 1 tiers des déchets générés dans l'UE, soit environ 1t/hab./an. 40% d'entre eux sont réutilisés dans la production de granulats recyclés.

D'autre part, en 2005 la production de matériaux recyclés sous forme de granulats représentait 6% de la production totale de granulats utilisés dans le BTP. Le principe de recyclage se met cependant petit à petit en place. Le traitement des déchets de démolition représente aujourd'hui une vraie industrie, mais dont le profit dépend fortement de l'environnement technique, économique, géologique et politique de la zone dans laquelle elle opère.

Les facteurs suivants ont le plus d'impact :

- La pénurie de matériaux naturels
- La stabilité de l'industrie du bâtiment et travaux publics (BTP)
- L'implication des acteurs directement en amont et en aval des filières de recyclage
- Le soutien des autorités publiques
- Le schéma de taxation, adapté aux conditions locales.

Comparés à certains pays européens (Figure 1-1), la France est encore un peu en retard sur la mise en place d'une industrie du recyclage des déchets de démolition, mais les choses se mettent en place, notamment via le Projet National RECYBETON, démarré en 2011.

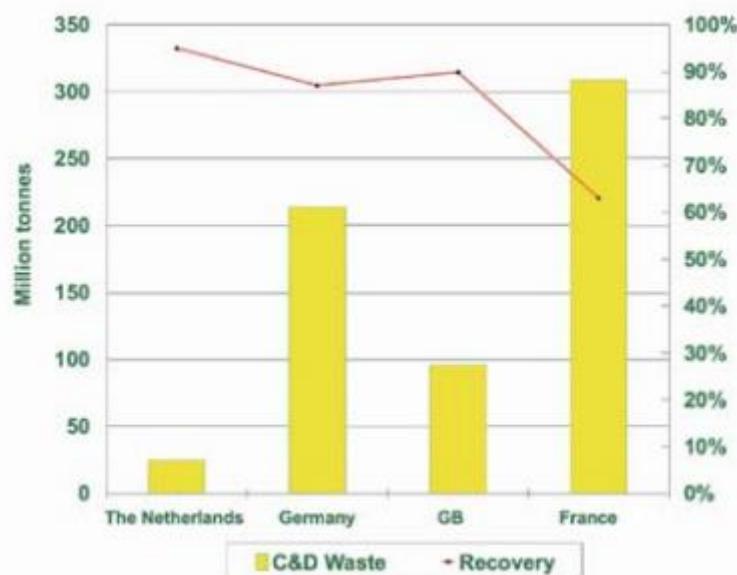


Figure 1-1.Taux de recyclage en fonction de la quantité de déchets de démolition produite aux Pays-Bas, en Allemagne, au Royaume-Uni et en France. (UEPG, 2006) UEPG : Union Européenne des Producteurs de Granulats

1.3 Situation en France

1.3.1 Réutilisation

Si aujourd'hui en France le recyclage des chantiers routiers est très efficace, la réutilisation des déchets de démolition de chantiers du bâtiment s'avère autrement plus complexe. En effet, les ouvrages d'art sont faciles à recycler, puisque constitués presque uniquement de béton. Dans un bâtiment, le béton cohabite avec d'autres matériaux très divers (bois, plastiques, métaux, verre, brique...). Le recyclage du béton n'est alors possible qu'à la suite d'un tri des matériaux, on parle ici de « déconstruction ». Cette opération est onéreuse, et jusqu'à présent n'était pas nécessairement demandée dans les appels d'offres et non prévue dans le financement.

Parmi eux, les bétons sont aujourd'hui essentiellement réutilisés dans des remblaiements ou concassés afin d'être utilisés dans les TP, et plus particulièrement dans les sous couches de fondation des routes. Une alternative judicieuse et économique serait pourtant de réutiliser ces bétons

existants directement dans le domaine du bâtiment, puisque cela permettrait à la fois une économie des ressources naturelles et une limitation de la mise en décharge, mais également une mise en œuvre rapide et une diminution des transports. En effet, dans l'idéal, les matériaux de démolition seraient concassés in-situ et réutilisés pour la formulation de nouveaux bétons sur le même chantier.

Aujourd'hui en France l'applicabilité des règles de calcul de l'Eurocode 2 aux granulats recyclés n'est pas encore établie. Le dispositif normatif est le même pour les granulats naturels et recyclés, bien que certaines caractéristiques spécifiques à ces derniers induisent une réflexion autour de son applicabilité. Selon la norme EN 206-1, l'utilisation des granulats recyclés a été autorisée, mis à part dans les bétons précontraints, mais dans des proportions limitées qui dépendent de leur qualité et de la classe de résistance souhaitée pour le béton.

Trois types de gravillons recyclés sont définis :

- Type 1 : Au moins 95 % de béton ou granulats non liés
- Type 2 : Au moins 90 % de béton ou granulats non liés
- Type 3 : Au moins 70 % de béton ou granulats non liés

Le taux de substitution maximal autorisé de granulats recyclés en % par rapport à la masse totale de gravillon ou de sable varie de 30% pour les gravillons de type 1, à 15% pour les gravillons de type 2 et 5% pour les gravillons de type 3. De plus, les gravillons recyclés de Type 2 et 3 ainsi que les sables recyclés ne peuvent être utilisés que pour des bétons de résistances inférieures ou égales à C25/30.

1.3.2 Aspect économique

D'après les chiffres de l'UNPG (Union National des Producteurs de Granulats), en 2012 l'utilisation totale de granulats en France a atteint 360 millions de tonnes, soit 5,7t/hab./an, dont 79% (285 millions de t) ont été utilisées pour les travaux publics, et 21% (78 millions de tonnes) dans le bâtiment. Leur prix s'élève en moyenne à 7€ la tonne, valeur fortement liée au transport, puisque plus de 90% transitent par camions.

Quelques régions parviennent à équilibrer leur bilan production/consommation, tandis que beaucoup d'autres dépendent de sites d'approvisionnement parfois relativement éloignés. La région Ile-de-France, par exemple, affiche un fort déficit, puisqu'en 2012 elle n'a produit que 60% des 30 millions de tonnes consommées.

Tam [Tam 2008] a réalisé une étude économique complète en comparant les coûts et bénéfices engendrés par la méthode de production de granulats actuelle avec ceux engendrés par la méthode de recyclage (Tableau 1-1). Il a été démontré que sur le long terme les granulats recyclés sont économiquement bien plus intéressants, mais que le facteur « disponibilité » affecte quelque peu la viabilité de cette méthode. En effet, la quantité de matériaux disponibles est limitée par le nombre de chantiers de démolition locaux, et quand les producteurs de granulats recyclés échouent à fournir la quantité souhaitée, alors les granulats naturels redeviennent la source d'approvisionnement numéro un.

Tableau 1-1. Etude réalisée par [Tam 2008]

	Méthode actuelle (\$1000/an)	Méthode recyclage (\$1000/an)
Coût total	44097,16	6738,06
Bénéfices totaux	20,3	37654,61
Bénéfices nets	-44076,84	30916,55

De plus, on constate une grande disparité entre la France et les autres pays de la communauté européenne. Prenons en exemple la consommation de granulats recyclés qui s'élevait en 2007 à 5% en France contre 25% au Royaume-Uni. Cette différence provient essentiellement du fait que les sources d'approvisionnement en granulats naturels sont plus importantes en France que dans le reste de l'Europe, et que par conséquent, les granulats recyclés sont, d'une façon générale, plus compétitifs partout en Europe, excepté en France. La tendance est récapitulée dans le Tableau 1-2 :

Tableau 1-2. Prix comparés des granulats recyclés et de granulats naturels dans différents pays de l'Union Européenne (UEPG, 2005)

Pays	Prix moyen des agrégats recyclés (1), €/t	Prix moyen des agrégats naturels (2), €/t	Rapport (1) / (2)
France	4,4 – 9,0	3,6 – 6,5	1,2 – 1,4
Espagne	3,0	6,0 – 14,4	0,2 – 0,5
Belgique	2,4 – 7,2	2,4 – 10,8	0,7 – 11
Royaume-Uni	3,3 – 8,4	4,4 – 15,2	0,5 – 0,6
Allemagne	4,8 – 8,4	6,5 – 8,8	0,7 – 0,95
Pays-Bas	8,7	11,4	0,76

1.3.3 Législation

Actuellement, près de 90% des déchets de chantiers du BTP sont éliminés en décharge. Or depuis juillet 2002, l'article L. 541-24 du code de l'environnement impose que seuls les déchets ultimes soient désormais acceptés en installation de stockage. Le caractère « ultime » dépend du contexte local, puisqu'il désigne les déchets qui ne sont pas susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

Par ailleurs, l'article 11 de la directive-cadre du 19 novembre 2008 fixe l'objectif de 70% de valorisation matière des déchets du BTP d'ici 2020.

La loi Grenelle 1 a introduit le principe d'élaboration de plans de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers du BTP de manière obligatoire. (*Art. 46 de la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*).

La Loi Grenelle 2 précise les objectifs de ces plans et certaines modalités et pratiques de mise en œuvre.

Le Décret n° 2011-828 du 11 juillet 2011 portant sur diverses dispositions relatives à la prévention et à la gestion des déchets détaille le contenu attendu des plans. (*Art. 541-41, sous-section 3 du Code de l'Environnement*).

1.4 Perspectives / avenir

La première étape à franchir en France serait de calquer nos méthodes de démolition sur d'autres pays d'Europe qui aujourd'hui recyclent quasiment tout leur béton. Le maximum est atteint en Suisse avec 95% de béton recyclé, l'Allemagne suit avec 80%. En France nous sommes aujourd'hui à un taux de recyclage de 62%.

Quelques projets expérimentaux de réutilisation du béton de déconstruction dans le bâtiment [Use 2000] ont déjà vu le jour en Europe:

- Suisse : école « Leutschenbach », 2009
- Suisse : appartements « Brunnenhof », 2007
- République Tchèque : « multipurpose experimental building » à l'UCEEB, 2014
- Belgique : « A recycled house », 2000
- Royaume-Uni : « New operations center for Wessex Water », 2000

Si ce système de recyclage du béton est aujourd'hui si peu systématiquement mis en place, c'est avant tout parce que les premières études réalisées en laboratoire tendent à montrer que les bétons élaborés à partir de granulats recyclés présentent des problèmes d'hétérogénéité, et quelques difficultés de mise en œuvre (problème d'ouvrabilité, nécessité d'utiliser plus d'eau et plus de ciment pour atteindre des performances mécaniques similaires aux bétons standards).

Pour cette raison, la France a vu démarrer en 2011 le Projet National RECYBETON. En effet, les professionnels de la construction sont de plus en plus sensibilisés aux questions d'environnement et s'interrogent sur le devenir de leurs matériaux en fin de vie. Ce projet national est un projet de recherche et développement collaboratif soutenu par le ministère de l'environnement et du développement durable, et qui devrait s'étaler sur une durée de 4 à 5 ans. Il regroupe des industriels et universitaires spécialistes du génie civil, et vise à changer la tendance au niveau national en favorisant la réutilisation de l'intégralité des produits issus des bétons déconstruits. Il traite donc de la problématique des granulats recyclés mais s'intéresse également au recyclage des matériaux hydrauliques. Le but est d'aboutir à des normes visant à cadrer l'utilisation des bétons recyclés, afin de permettre enfin en France leur bonne utilisation dans le bâtiment.

2. Les granulats recyclés

2.1 Production des granulats

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

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

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

Différentes étapes visent à obtenir un produit de recyclage répondant aux caractéristiques souhaitées.

- Si besoin, réduction des plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (B.R.H.)
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires, suivi d'un déferraillage électromagnétique
- Criblage, visant à éliminer les matériaux ne répondant pas aux caractéristiques souhaitées
- Si nécessaire, concassage secondaire sur la fraction supérieure du concassage primaire.

Les installations de recyclages peuvent être fixes ou mobiles, et dites « primaires » ou « secondaires » selon qu'elles proposent un ou plusieurs niveaux de concassage. Les produits résultant de ces installations sont de natures variées, allant du matériau de pré-criblage, aux graves non calibrées, graves 0/D, sables et gravillons. Ils sont aujourd'hui généralement utilisés pour réaliser des terrassements (remblayages divers, couches de forme...) et des chaussées (assises).

Les granulats de béton recyclés peuvent être obtenus (a) à partir d'éléments en béton récupérés après avoir subi des tests, lors de travaux scientifiques par exemple ou (b) du béton déconstruit. Dans le premier cas, les granulats obtenus sont relativement propres, mais dans le second ils peuvent être contaminés par de la brique, du sable, de la poussière, du verre, du plastique... Il a cependant été prouvé que ces granulats recyclés, même légèrement contaminés, pouvaient être utilisés dans la formulation des bétons à la place de granulats naturels [Rao 2007] [Naga 2004]. Cependant, de la même manière que pour les granulats naturels, la qualité des granulats recyclés, en terme de distribution de taille, absorption, abrasion, etc. doit être évaluée avant utilisation.

On obtient généralement la meilleure distribution de taille et de forme en procédant à un premier concassage, suivi d'un second. Cependant, pour des raisons économiques, un seul concassage est généralement effectué et il en résulte des graves de 50mm de diamètre en moyenne. Un second broyage permettrait de descendre à un diamètre de 14-20mm environ.

2.2 Principaux paramètres influant sur les caractéristiques des granulats recyclés

L'absorption d'eau des granulats recyclés est comprise entre 3 et 12% [Jose 2002] [Katz 2003] [Rao 2005], la valeur précise dépendant du béton à partir duquel ont été produits les granulats, dit béton « parent ». Il est important de noter que cette valeur est bien plus élevée que celle des granulats naturels, qui ont une absorption d'eau comprise entre 0.5 et 3%. Cette différence est principalement due aux résidus de mortier adhérant au granulat naturel de départ, qui est plus poreux que la pierre en elle-même, ce qui augmente globalement l'absorption d'eau du nouveau granulat. Plusieurs autres paramètres régissent l'absorption d'eau des granulats recyclés [Padm 2009]:

- Le type de granulat dans le béton parent
- Les performances mécaniques du béton parent
- La taille maximale de granulat utilisé dans le béton parent

Padmini [Padm 2009] a montré que le pourcentage d'absorption d'eau du granulat recyclé augmente avec la performance mécanique du béton parent, à cause de la plus grande quantité de mortier attachée dans ce cas-là. Son étude a également prouvé que la taille des granulats utilisés dans le béton parent influence l'absorption d'eau des granulats produits à partir de ce béton : en effet, plus le granulat naturel initial est petit, plus la surface spécifique totale disponible est grande, et donc plus les granulats recyclés sont riches en ancien mortier, autrement dit, plus ils sont poreux [Zhao 2014].

D'autres études ont mis en évidence l'influence du béton parent sur la qualité des granulats recyclés, avec notamment une attention particulière à accorder à la provenance du béton parent, et des précautions à prendre si celui-ci vient d'un ouvrage utilisé dans des conditions spécifiques, comme par exemple une utilisation sous-marine [Debi 2010]. Il a été constaté que la résistance du béton recyclé peut être aussi bonne que celle du béton parent, pourvu que le rapport E/C de la pâte entourant les granulats (soit celui du béton parent) soit identique ou inférieur à celui du béton recyclé [Hans 1983] [Poon 2004].

Un autre facteur peut influencer significativement la qualité des granulats recyclés provenant de sites de démolition, il s'agit de la présence de contaminants, soit de déchets de chantier de nature non cimentaire. On peut trouver parmi les granulats recyclés du verre, du bois, du plastique, du bitume, du gypse, des matières organiques ou des contaminations sous forme de chlorures ou de sulfates [Khal 2004]. La présence de ces contaminants peut induire une diminution de résistance en compression pouvant aller jusqu'à 15% de perte par rapport à un béton sans contaminant [Lamo 2002].

3. Les bétons de granulats recyclés

3.1 Propriétés du béton à l'état frais

Plusieurs recherches ont montré que pour une teneur en eau identique, l'ouvrbabilité d'un béton recyclé sera inférieure à celle d'un béton standard, et ceci plus particulièrement quand le pourcentage de remplacement de granulats excède 50% [Topç 2004] [Seng 2004]. Cette différence est très certainement due à la plus grande porosité des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Afin de pallier ce problème, différentes études ont été réalisées en faisant varier les conditions de préparation des granulats, et il en est ressorti qu'un ajout d'eau correspondant à l'absorption d'eau des granulats testés améliore significativement l'ouvrbabilité du béton frais [Rao 2005]. L'eau peut être ajoutée de différentes manières, soit en pré-saturant les granulats préalablement au malaxage, soit en compensant en ajoutant directement l'eau d'absorption dans l'eau de gâchage [Ferr 2011] [Zhao 2014].

De la même manière, la quantité d'air occlus est légèrement supérieure (de 4 à 5%) dans le cas des bétons recyclés avec un taux de remplacement de 100%.

La masse volumique du béton frais naturel est connue pour être aux alentours de 2400kg.m^{-3} . Dans le cas des bétons formulés à partir de granulats recyclés, la valeur est clairement inférieure (aux alentours de 2150kg.m^{-3}) et ce quel que soit le type de ciment utilisé. [Topç 1995] [Katz 2003]

3.2 Propriétés du béton à l'état durci

3.2.3 *Zone de transition interfaciale*

Il n'est pas tout à fait exact de considérer le matériau béton comme étant un composite à deux phases : granulat et matrice cimentaire. En réalité, la pâte de ciment n'est pas complètement homogène et sa microstructure est modifiée à proximité des granulats. Cette zone est généralement appelée « zone de transition interfaciale » ou ITZ (Interfacial Transition Zone). Pendant le coulage du béton, la concentration volumique en grains anhydres s'apauvrit quand on se rapproche du granulat, par conséquent dans le béton frais la porosité et le rapport E/C augmentent de la matrice vers la surface des granulats. Cette perturbation, qui est plus significative sur quelques dizaines de microns autour de la surface du granulat entraîne un certain nombre de perturbations :

- Le relativement large espace laissé vacant à proximité de la surface du granulat combiné à la mobilité des ions résultant des composés anhydres, conduit, pendant l'hydratation, à une cristallisation préférentielle des hydrates correspondants aux ions les plus mobiles (Ca, Na, S): ettringite et portlandite.
- Un rapport E/C localement plus élevé induit moins de sites de nucléation, moins de germes et des cristaux plus gros, mieux formés et préférentiellement orientés.
- Finalement, comme les pores à remplir sont plus larges, la porosité, à tout âge, sera supérieure au reste de la matrice.

La conséquence principale de cette variation de microstructure est une résistance mécanique localement inférieure au reste de la matrice. Quand les granulats sont solubles dans la solution interstitielle en superficie, les ions provenant des granulats (en plus grande concentration dans la

zone de transition) peuvent se combiner avec les ions mobiles provenant des grains de ciment. [Olli 1995]

Ce phénomène de zone de transition et l'influence qu'il peut avoir sur les performances mécaniques du béton semblent, d'après Diamond [Diam 2001], concerner plus particulièrement les bétons à hautes performances.

Dans le cas des bétons fabriqués à partir de granulats recyclés, il a été montré dans différentes études que la présence d'ancien mortier autour des granulats améliore significativement les performances mécaniques de la zone de transition. En effet, on observe une bonne interaction entre l'ancien et le nouveau mortier et également une bonne résistance à l'abrasion [Kou 2011] [Evan 2007].

3.2.2 Propriétés de transfert (perméabilité / porosité)

Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est globalement plus poreuse qu'un béton naturel, et cela est d'autant plus vrai que le taux de remplacement est important [Evan 2007] [Gome 2002] [Topç 2004] [Rao 1996] [Queb 1996] [Hadj 1998] avec une diminution de la densité totale du matériau de l'ordre de 5 à 10% pour une substitution à 100% des gravillons naturels par des granulats recyclés. Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de 14% à 20,1%. Cependant il a été observé une diminution de porosité significative une fois que le béton a mûri quelques temps. En effet, Gomez-Soberon [Gome 2002] a montré que le taux de remplacement des granulats est directement corrélé au volume de pores total et à leurs tailles, mais que si cette influence est tout à fait vérifiée au jeune âge du béton, elle s'atténue à mesure que le béton vieillit. Ceci semble dû à la cristallisation de nouveaux produits qui réduisent à la fois le nombre et la taille des pores.

Il a été largement prouvé que les bétons fabriqués à partir de granulats recyclés sont nettement plus perméables que les bétons classiques, cela dit, il faut tout de même noter que cette perméabilité peut facilement être réduite en utilisant des fines (cendres volantes, fillers, fumée de silice... etc).

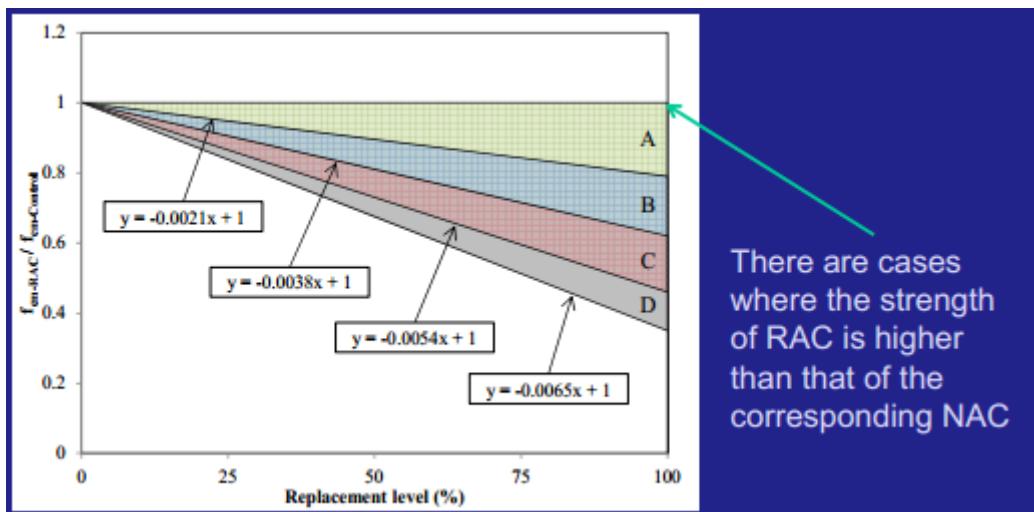
3.2.3 Propriétés mécaniques

2.2.1.1 Résistance à la compression

De manière générale, il a été souvent constaté [Butl 2013] [Duan 2014] [Paul 2014] que les bétons formulés à partir de granulats recyclés présentent des résistances à la compression inférieures aux bétons standards. Et cette diminution de performance varie fortement selon un certain nombre de paramètres, tels que le taux de remplacement de granulats, les conditions de préparation des granulats (saturés ou non), la qualité du béton parent, ou encore le rapport eau/ciment (E/C). Il est cependant important de noter que l'inverse a aussi été observé, avec des augmentations de performances mécaniques de l'ordre de 10 à 13% pour les bétons recyclés par rapport aux bétons naturels [Wang 2010] [Etxe 2007].

Il a été montré par exemple qu'à E/C élevé (entre 0,6 et 0,75), la résistance d'un béton recyclé est comparable à celle d'un béton standard jusqu'à un taux de remplacement aussi important que 75%. [Katz 2003]. Rao et al. [Rao 2005] ont également constaté que pourvu que le rapport E/C soit supérieur ou égal à 0.55, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même au taux de remplacement de 100%. Cette tendance est liée au fait qu'à rapport E/C élevé, la résistance en compression est liée à la qualité de la pâte et de l'interface pâte-granulats, moins résistantes que les granulats. En revanche, avec un rapport E/C réduit à 0.4, la valeur de la résistance chute de 25%. Le peu d'études réalisées jusqu'à présent cherchant à relier la résistance en compression aux conditions de préparation des granulats (séchés en étuve, séchés à l'air, imbibés surface sèche...) n'ont pas donné de résultats très concluants [Poon 2004] [Rao 2005]. De manière générale, on peut dire que plus le rapport granulats recyclés/granulats naturels augmente, plus la résistance à la compression diminue, mais qu'en ajustant ce ratio, on parvient toujours à atteindre les résistances requises. [Evan 2007] [Gome 2002] [Topç 2004] [Rao 1996] [Queb 1996]. De Brito a également constaté que la qualité du granulat recyclé joue un rôle très important dans la résistance en compression du béton dans lequel il est incorporé (Figure 1-2).

De plus, il est extrêmement important de noter que si, à 28jours, le béton naturel présente clairement une meilleure résistance à la compression, sur le long terme en revanche (un an), le béton recyclé présente le meilleur gain de performance, et peut aller jusqu'à dépasser le béton standard sur le très long terme (5 ans) [Kou 2011] [Evan 2007].



avec

Aggregate class	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Minimum oven-dried density (kg/m ³)	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	
Maximum water absorption (%)	1.5	2.5	3.5	5	6.5	8.5	10.5	13	15	No limit
Maximum LA abrasion mass loss (%)	40			45			50			

Figure 1-2. Résistance en compression relative minimum estimée pour des bétons formulés à partir de différentes qualités de granulats recyclés (A > B > C > D), à différents taux de substitution [Brit 2014] (RAC : Recycled Aggregates Concrete ; NAC : Natural Aggregates Concrete)

3.2.3.2 Résistance à la traction par flexion et par fendage

Les études réalisées concernant la résistance en traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certains ont obtenu une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% [Rao 2005] et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours [Ajdu 2002]. Ces auteurs ont également constaté que l'utilisation de divers adjuvants, tels que la fumée de silice par exemple, permet d'améliorer les performances du béton recyclé.

De la même manière que pour la résistance à la compression, il a été constaté que sur le long terme (5 ans), le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel. [Gome 2002]

3.2.3.3 Module d'élasticité

Différents auteurs se sont intéressés à la question du module d'élasticité, et tous sont d'accord pour dire qu'il se situe entre 50 et 70% du module d'élasticité d'un béton naturel, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats [Oliv 1996] [Ajdu 2002] [Rao 2005] [Kou 2007] [Choi 2012]. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés, mais il a été montré que cette porosité diminue avec le temps [Gome 2002] et donc que la différence de module d'élasticité s'amenuise.

4. Evolution du comportement du béton avec la température

Le matériau béton, de par la grande variété de ses composants et de sa microstructure, présente des propriétés qui évoluent fortement avec la température.

4.1 Modification de la microstructure de la pâte de ciment

4.1.1 Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie

Lorsqu'il est soumis à des températures élevées, le matériau béton subit un grand nombre de transformations physico-chimiques, dépendant de la température maximum atteinte [Ingh 2009]. Ces transformations selon Ingham sont résumées ci-après et concernent aussi bien la pâte de ciment (Figure 1-3) que les granulats.

- *Entre 70 et 80°C, la dissociation de l'ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}26\text{H}_2\text{O}$ entraîne une baisse de sa concentration dans la matrice cimentaire.*
- *Autour de 105°C commence la perte de l'eau physiquement liée entraînant une augmentation de la porosité capillaire et parfois l'apparition de microfissures.*
- *Entre 120 et 450°C le gel de CSH, responsable de la cohésion du matériau, se déhydrate.*

- *Entre 250 et 350°C* on observe une coloration rosée de certains granulats, due à l'oxydation des composés contenant du fer, qui a lieu aux alentours de 300°C. Parallèlement, la perte d'eau liée dans la matrice cimentaire, et les dégradations conséquentes deviennent plus significatives.
- *Entre 450 et 550°C* environ ont lieu différents phénomènes. En premier lieu la deshydroxylation de la portlandite Ca(OH)_2 , induisant une chute de sa concentration dans la matrice cimentaire. La coloration rose des granulats devient plus intense, sauf pour les silex, qui se calcinent entre 250°C et 450°C et par conséquent prennent une coloration blanche-grise.
- A 573°C la transition de l' α -quartz en β -quartz est accompagnée d'une brusque augmentation de volume du quartz (de 5% environ) ce qui induit l'apparition d'un réseau de fissures autour des grains de quartz dans les granulats.
- *Entre 600 et 800°C* a lieu la décarbonatation des carbonates. Tout dépend alors de la quantité de carbonates dans le matériau en question : si les granulats utilisés sont très calcaires, alors aura lieu une contraction considérable du béton, due à la libération de dioxyde de carbone ; le volume de contraction causera l'apparition de sévères microfissures dans la matrice cimentaire.
- *Entre 800 et 1200°C* la désintégration complète des composés calcaires dans les granulats et la matrice cimentaire, due à la fois aux phénomènes de dissociation et à la contrainte thermique, causent le blanchiment du béton et l'apparition de sévères fissures. Les granulats calcaires deviennent blancs.
- A 1200°C le béton commence à fondre
- A partir de 1300°C, le béton est fondu.

Les performances du béton après refroidissement varient en fonction de la température atteinte, de la vitesse de montée en température et de tous les facteurs pouvant influencer la perte d'hydratation de la surface. Au-delà de 600°C le béton est généralement endommagé au point de ne plus être suffisamment résistant structurellement [Peng 2008].

Castellote [Cast 2004] a réalisé une analyse thermo-diffractométrique pour suivre l'évolution et les transformations des principaux constituants de la pâte de ciment au cours du chauffage. On observe très bien la décomposition constante de 100 à 400°C, la décomposition soudaine de la portlandite à 500°C ainsi que l'apparition de chaux (CaO).

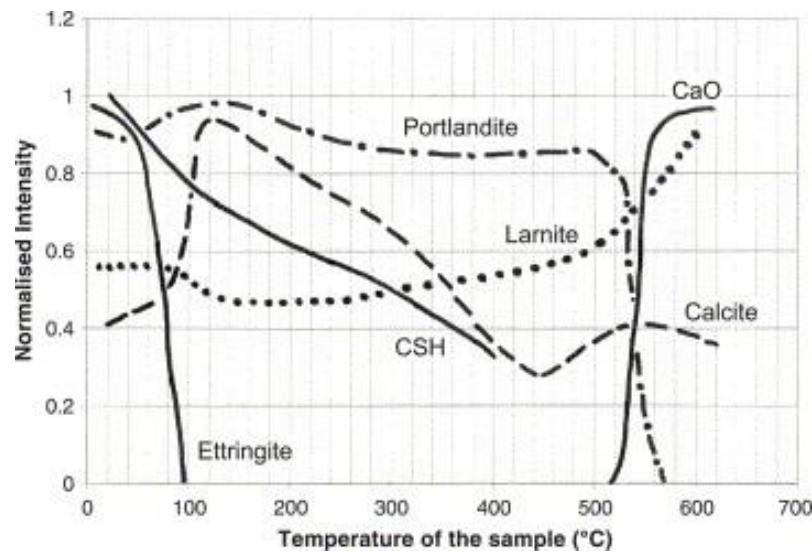


Figure 1-3. Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours du chauffage [Cast 2004]

De la même manière, Ye [Ye 2007] a réalisé un suivi par ATD (analyse thermo-différentielle) - ATG (analyse thermogravimétrique) qui permet d'illustrer les départs et les transformations ayant lieu au cours du chauffage. On y observe le départ de l'eau libre et d'une partie de l'eau physiquement liée autour de 100°C, la décomposition de la portlandite entre 400 et 500°C et le début du phénomène de décarbonatation à partir de 700°C. Ces résultats sont les mêmes que ceux décrits par Noumowe [Noum 1995] dans ses travaux de thèse.

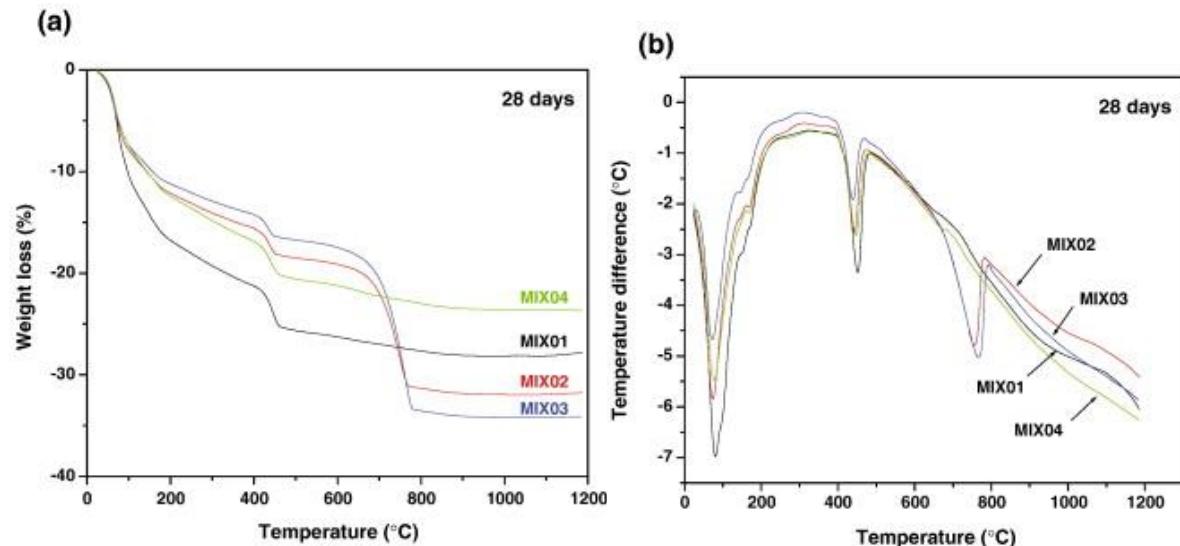


Figure 1-4. Analyses ATD (a) et ATG (b) de quatre pâtes de ciment [Ye 2007]

4.1.2 Evolution de la perte de masse

Au cours du chauffage, la masse globale du béton diminue en raison du départ de l'eau libre et adsorbée qu'il contient et de la décomposition de certains de ses constituants (présentés dans le

point 4.1.1). La Figure 1-5 représente l'évolution de la perte de masse et la vitesse de perte de masse du béton en fonction de la température.

De la température ambiante à 300°C environ, la perte de masse est gouvernée par le départ de l'eau libre et adsorbée et la décomposition d'une partie des hydrates. Elle est donc plus importante dans le cas des bétons présentant des rapports E/C élevés. Hager [Hage 2004] note dans cette gamme de température une cinétique lente jusqu'à 150°C , et ce particulièrement pour les BHP. Elle augmente progressivement entre 150°C et 200°C pour atteindre alors une cinétique brusquement plus élevée (Figure 1-6). Hager attribue cette augmentation au départ de l'eau chimiquement liée, qui commence alors à s'échapper du béton. Dans cette gamme de température, l'influence des granulats n'est pas déterminante, à l'inverse du rapport E/C.

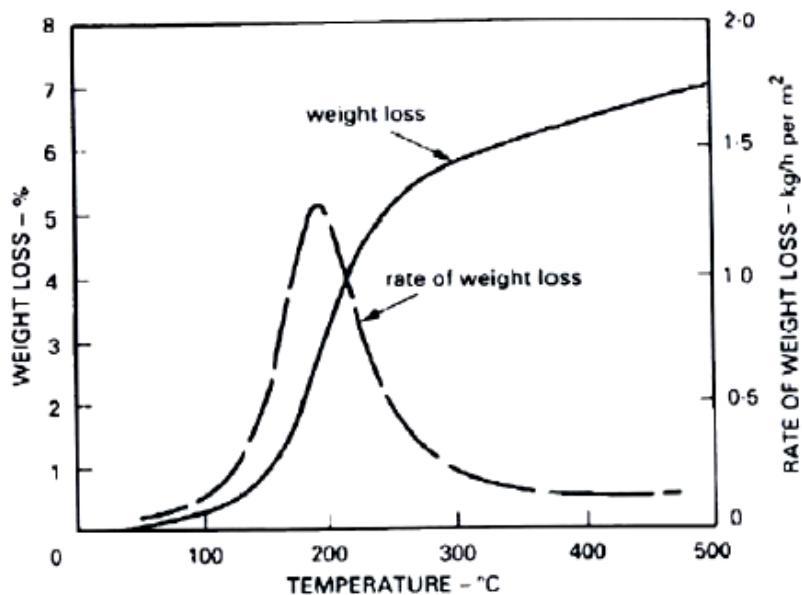


Figure 1-5. Évolution de la perte de masse du béton en fonction de la température [Khou 1988]

Pour un même granulat, la perte de masse du béton est significativement plus élevée pour un béton à E/C égal à 0,6 comparé à celle d'un béton à E/C égal à 0,3 [Pliy 2010]. En effet, la part d'eau libre est plus importante dans les cas des bétons ordinaires.

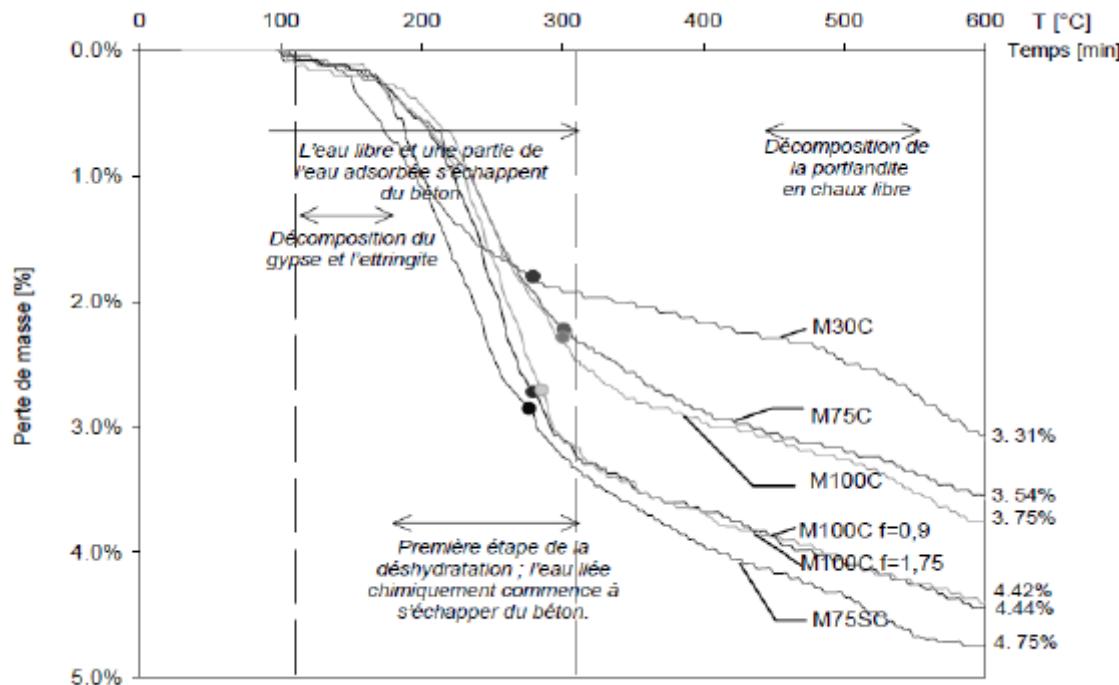


Figure 1-6. Evolution de la perte de masse de bétons chauffés à vitesse lente (1°C/min) en fonction de la température [Hage 2004]

Au-delà de 300°C, la perte de masse est gouvernée par le départ d'autres composés de la pâte de ciment. A partir de 600°C on observe une perte de masse liée à la décarbonatation (départ du CO₂), phénomène dans lequel la nature des granulats joue un rôle, puisqu'un béton de granulats calcaires présentera une perte de masse significativement plus élevée qu'un béton de granulats siliceux [Kodu 2003] [Xiao 2006] [Ario 2007].

4.1.3 Evolution de la porosité avec la température

Lors de l'élévation de la température, l'évolution de la porosité est principalement liée à la pâte de ciment et à l'interface pâte-granulat.

La porosité à l'eau permet de quantifier le volume des pores accessibles à l'eau, ces pores représentant la porosité capillaire avec un rayon des pores compris entre 0.1 mm et 2.5 mm d'après [Meht 95]. La porosité accessible à l'eau évolue légèrement avec la montée en température. Le projet National BHP 2000 [Irex 2005] a étudié l'évolution de cette caractéristique sur les différents bétons (ordinaires et à hautes performances) et n'a constaté que très peu d'évolution avec la température. Une augmentation de 2,3% est observée pour un béton ordinaire de granulats calcaires contre seulement 0,9% d'augmentation pour un béton à hautes performances de granulats calcaires entre 105 et 400°C. Cette relativement faible évolution est le résultat d'un équilibre entre deux phénomènes :

- La perte d'eau localisée entre les feuillets des hydrates induit un retrait et réduit ainsi le volume de l'espace libéré par l'eau entre les feuillets. Jusqu'aux environs de 300°C, la porosité est stable et parfois même décroît légèrement. Certains auteurs attribuent un tel phénomène à la recristallisation de la chaux amorphe [Pias 1984] [Tsim 1997].

- Au-delà de 300°C la porosité à l'eau augmente légèrement à cause de phénomènes de microfissurations [Ye 2007]

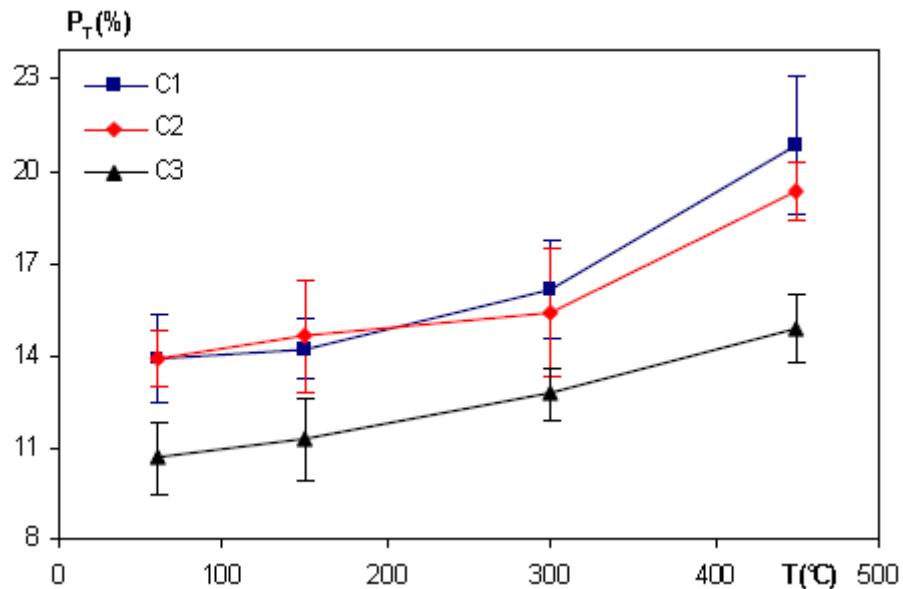


Figure 1-7. Évolution de la porosité de bétons chauffés à 150, 300 et 450°C [Pliy 2010]

Pliya [Pliy 2010] a constaté que l'évolution de la porosité se faisait en deux temps. La première phase, entre 60 et 300°C est liée à la perte d'eau liée. Au delà de 300°C, l'augmentation de la porosité est causée par l'ouverture de fissures engendrées par les déformations thermiques incompatibles de la pâte et des granulats. Quelle que soit la température de chauffage, la porosité des BO est toujours supérieure à celle des BHP.

4.2 Incompatibilité de déformation pâte – granulats

4.2.1 Déformation thermique des granulats

Le phénomène de déformation thermique des granulats survenant à haute température entraîne généralement une variation de la porosité. Dans la plupart des cas celle-ci augmente puisque la fissuration thermique entraîne l'élargissement de pores existants, mais également la création de nouveaux vides. Un autre phénomène cependant peut intervenir : la libre dilatation de grains dans des vides préexistants. Dans ce cas, une contraction thermique du volume poreux, soit une diminution de la porosité, est observée [Some 1992]. L'évolution de la microstructure des granulats va donc dépendre de la prépondérance d'un des phénomènes sur l'autre, et conduira soit à de la fissuration, soit à une densification. Cependant, les granulats utilisés pour la confection du béton sont en général peu poreux, et le phénomène de contraction thermique est rarement observé.

4.2.2 Fissuration de l'interface pâte – granulat

Lors de la montée en température, les granulats peuvent subir des phénomènes de dilatation, et ceux-ci entraînent l'apparition de contraintes intergranulaires, en compression ou en traction quand

la dilatation est empêchée par la pâte de ciment. Quand ces contraintes dépassent la résistance à la rupture, on observe l'apparition de fissures intergranulaires ou intragranulaires [Bere 1988].

Pour mieux illustrer les différentes déformations thermiques pouvant avoir lieu au sein du béton, il est plus aisément de s'appuyer sur l'exemple d'une inclusion sphérique [Fu 2004]. Deux cas sont possibles :

- Le coefficient de dilatation thermique de l'inclusion est plus grand que celui de la matrice dans laquelle elle se situe. L'inclusion se retrouve dans un état de compression hydrostatique et subit des contraintes à la fois en compression et en traction. Il en résulte l'apparition de fissures radiales, de l'interface de l'inclusion vers la matrice.
- Le coefficient de dilatation thermique de l'inclusion est inférieur à celui de la matrice dans laquelle elle se situe. L'inclusion est alors soumise à des contraintes en traction bi-axiale alors que la matrice reste dans un état de compression/traction. Il en résulte l'apparition de fissures tangentialles au niveau de l'interface, qui pénétreront ou non dans l'inclusion, en fonction de la résistance de celle-ci à la montée en température.

Dans le cas du béton, les coefficients de déformation thermique des différents constituants dépendent de la température et sont généralement incompatibles entre elles [Cast 2004]. De la température ambiante aux alentours de 500°C, la déformation thermique de la pâte de ciment est supérieure à celle des granulats [Nevi 1993]. A partir de 120°C environ, la pâte de ciment cesse de se dilater pour commencer à se contracter en raison de la déshydratation des CSH. Selon la teneur en quartz des granulats, leur coefficient de dilatation thermique peut augmenter sensiblement autour de 573°C, température à laquelle intervient la transformation allotropique du quartz α en quartz β . Les travaux de modélisation de Fu [Fu 2004] montrent que l'apparition des fissures radiales est plus importante dans les zones où la distance entre deux granulats est la plus faible. En effet, celles-ci se propageront préférentiellement dans la direction correspondant à la distance la plus courte avec un autre granulat. En revanche, les fissures tangentialles ne sont pas impactées par la distance entre granulats, et on ne peut donc pas supposer qu'un béton avec une proportion volumique de granulats plus faible présentera une meilleure résistance aux températures élevées.

4.3 Evolution des propriétés thermiques avec la température

La dégradation du matériau béton lorsqu'il est soumis à de hautes températures est fortement liée aux transferts thermiques et hydriques qui ont lieu en son sein. Le béton est un matériau hétérogène et ses propriétés thermiques dépendent de celles des différentes phases dont il est constitué (pâte de ciment durcie, granulats). Dans un contexte « haute température », tous les modes de transfert de chaleur, à savoir le rayonnement, la convection et la conduction, sont combinés. En ce qui concerne le matériau béton, le mode de transfert par conduction régi par la loi de Fourier est prépondérant. Les transferts thermiques sont décrits par la loi de Fourier suivante :

$$(\rho \cdot Cp) \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(q) = 0 \text{ avec } q = -\lambda \operatorname{grad}(T)$$

Avec ρ la masse volumique du béton en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, Cp sa chaleur spécifique en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T la température en K, q le flux de chaleur en $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ et λ la conductivité thermique du béton en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. En considérant λ constant dans tout le matériau, la loi de Fourier peut s'écrire :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \Delta T$$

Et la diffusivité thermique (en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

La diffusivité représente la vitesse à laquelle se propage la chaleur dans le matériau.

Cette loi décrit le fait que plus la conductivité thermique λ est élevée, plus le flux de chaleur est important, et plus la température sera homogène au sein du matériau. La chaleur spécifique est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour éléver d'un degré la température de l'unité de masse d'un matériau. On peut ainsi supposer qu'un matériau avec une conductivité faible et une chaleur spécifique élevée aura une meilleure résistance au feu. Cependant une propagation de la chaleur trop faible au sein du matériau peut également conduire à la génération de contraintes thermiques et de ruptures.

4.3.1 Conductivité thermique du béton

La conductivité thermique d'un matériau est définie comme l'énergie (ou la quantité de chaleur) transférée par conduction thermique à travers un matériau :

- En 1 seconde
- A travers une surface de 1m^2
- Sur une épaisseur de 1m
- Lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1K.

De manière générale, il est connu que la conductivité thermique du béton diminue lorsque la température de l'environnement augmente. Des relations entre la conductivité thermique et la température proposées par l'EUROCODE et le DTU sont résumées Figure 1-8.

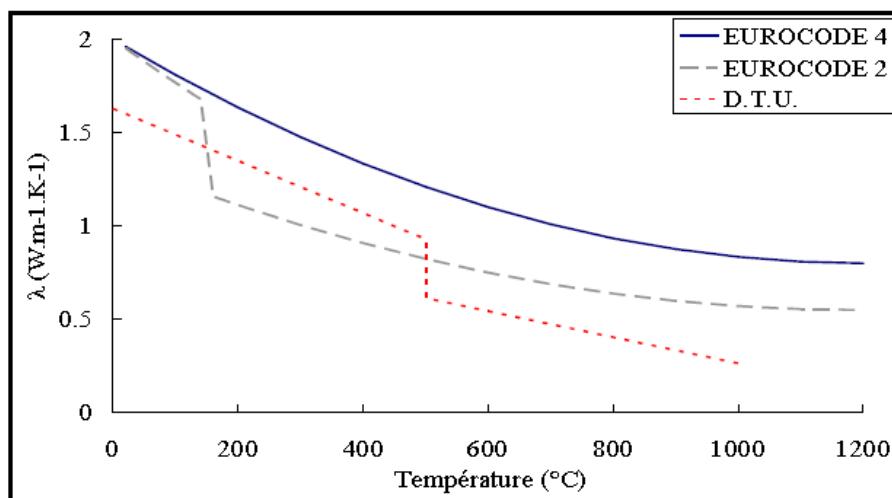


Figure 1-8. Evolution de la conductivité thermique du béton en fonction de la température [Xing 2010]

On constate que les variations de conductivité avec la température peuvent être très importantes, allant par exemple d'une diminution de 32% pour l'Eurocode 4 à 54% pour l'Eurocode 2 si l'on se place à 400°C. Cette variation est généralement attribuée à la dégradation du matériau [Mind 2009] : l'apparition de pores et de fissures entraîne la création de vides qui sont de très bons isolants thermiques, la conductivité de l'air étant égale à environ $0,02 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ contre $0,92 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour la pâte de ciment.

La conductivité thermique du béton dépend de celle de chacun de ses constituants selon des lois de mélange qui tiennent compte de la distribution spatiale et de la proportion volumique de chacun d'entre eux [Flynn 1999]. Du fait de la fraction volumique des granulats dans le béton ($\approx 70\%$), il est cependant admis que la conductivité thermique du matériau dépend essentiellement de celle des granulats [Baza 1996].

4.3.2 Chaleur spécifique du béton

La chaleur spécifique d'un matériau est définie comme la quantité d'énergie nécessaire pour éléver d'un degré une masse unitaire de matière. En d'autres termes, il s'agit de l'énergie absorbée ou restituée par le matériau pour :

- Elever ou abaisser sa température
- Se transformer lors d'une réaction endothermique (consommatrice d'énergie)
- Se transformer lors d'une réaction exothermique (restitution d'énergie)

De la même manière que la conductivité thermique, une fois le régime permanent atteint et les réactions endothermiques de la pâte terminées, la chaleur spécifique du béton dépend de celle de ses constituants, et donc principalement de celle des granulats qui constituent la plus grande proportion volumique [Mind 2009]. Elle varie entre 0,5 et 0,9 $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ quand la chaleur spécifique de la pâte de ciment peut aller de 0,7 à 1,7 $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à température ambiante. Durant le chauffage, ces valeurs peuvent être légèrement modifiées suite aux différentes transformations physico-chimiques ayant lieu : le départ de l'eau libre, la déshydratation des CSH et la décomposition de la portlandite dans la pâte de ciment et les changements de phase dans les granulats.

L'Eurocode 2 propose, pour le béton, une évolution polynomiale du second degré en fonction de la température, avec un pic de chaleur spécifique entre 100 et 200°C, caractéristique de l'évaporation de l'eau contenue dans le béton et dont la hauteur dépend de la teneur en eau du béton [Euro 2004] [Noum 1995].

$$\text{Eurocode 2 : } C = 900 + 80 \left(\frac{\theta}{120} \right) - 4 \left(\frac{\theta}{120} \right)^2 \text{ (J/kgK) pour } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C.}$$

Le DTU en revanche considère une valeur constante de la chaleur spécifique, telle que $C = 921 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

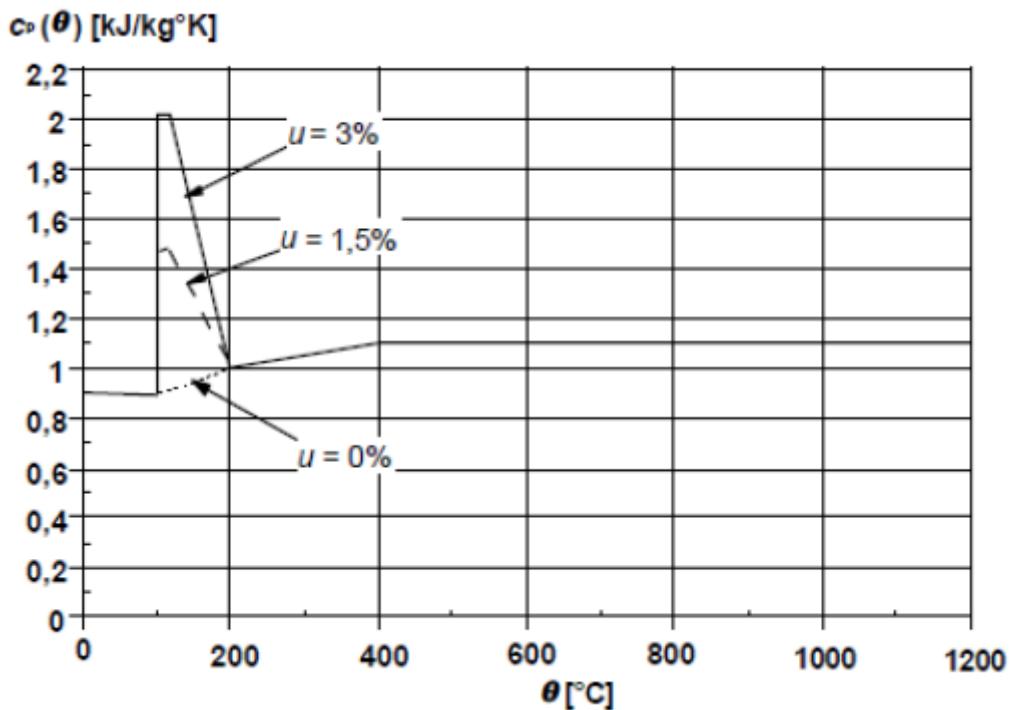


Figure 1-9. Evolution de la chaleur spécifique du béton en fonction de la température et de la teneur en eau (u) du béton exprimée en masse [Euro 2004]

Plusieurs auteurs ont réalisé des mesures de chaleur spécifique en fonction de la température sur différents bétons secs. Si les résultats divergent quelque peu, notamment à cause de la variété de nature des granulats utilisés, tous s'accordent à dire que la chaleur spécifique des bétons augmente avec la température [Öde 1968], [Coop 1977] et [Baza 1996]. Lorsque la mesure est effectuée en conditions isothermes, cette augmentation est attribuée à l'endommagement du béton et l'apparition de fissures ou de porosité. En effet, la chaleur spécifique de l'air étant supérieure à celle du béton, l'augmentation du volume d'air dans le matériau entraîne un accroissement de la valeur globale de chaleur spécifique. Si au contraire les mesures sont réalisées par calorimétrie (Figure 1-10), l'augmentation de chaleur spécifique peut être liée aux transformations physico-chimiques endothermiques ayant lieu dans la pâte pendant le chauffage.

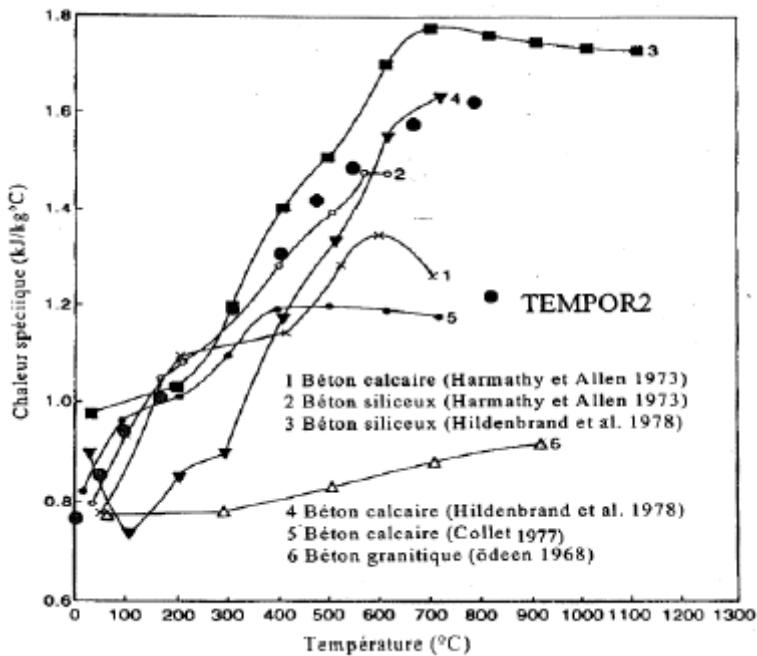


Figure 1-10. Evolution de la chaleur spécifique de différents bétons secs en fonction de la température. [Baza 1996]

4.4 Evolution des propriétés mécaniques avec la température

A température ambiante, le béton a la particularité de présenter un comportement dissymétrique, avec une très bonne résistance en compression contre une résistance en traction faible. Sous l'effet de la température, le matériau béton subit des modifications physico-chimiques irréversibles qui vont altérer ses performances mécaniques. L'interface entre la pâte de ciment et les granulats aura également un rôle non négligeable dans le maintien ou non des propriétés mécaniques du béton en fonction de la température.

Il est possible de mesurer les propriétés mécaniques du béton à chaud, et ainsi d'évaluer les capacités mécaniques du matériau pendant l'incendie, ou bien les propriétés dites « résiduelles », soit après refroidissement, qui permettent d'évaluer les propriétés mécaniques post-incendie. Les propriétés résiduelles sont généralement plus faibles que les propriétés à chaud, notamment à cause de la réhydratation de la chaux (CaO) avec l'humidité de l'air pendant le refroidissement qui s'accompagne d'une expansion volumique, et donc de l'apparition de fissures qui vont amoindrir la résistance mécanique du matériau.

Il est également important de noter que la vitesse de chauffage semble avoir un impact sur les performances résiduelles [Khou 1986]. En effet un chauffage lent permettra une très bonne homogénéité de la température au sein du matériau, et donc des transformations physico-chimiques plus complètes. De plus, la présence d'un gradient thermique dans le matériau peut entraîner des contraintes supplémentaires dues à des dilatations empêchées.

4.4.1 Résistance à la rupture en compression

La résistance à la compression à la rupture est l'une des caractéristiques les plus importantes du béton. Il est désormais établi qu'elle diminue avec la température.

Trois phases sont clairement observées dans l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température :

- De la température ambiante à 100°C – 200°C : on observe une diminution de 20 à 30% de la résistance [Hage 2004]. Ce phénomène peut s'expliquer comme suit : la dilatation et le départ de l'eau entraînent un écartement des feuillets de CSH et induit donc une réduction des forces de Van der Walls. Ce phénomène favorise la formation de groupements silanol (Si–OH - - - HO–Si) qui présentent des forces de liaison faibles. La liaison entre les feuillets d'hydrates ainsi affaiblie, la résistance au cisaillement entre les grains est amoindrie et la résistance en compression du béton également.
- De 100 à 250°C ou de 200°C à 350°C (selon les auteurs) : on observe un maintien et parfois une amélioration de la résistance en compression. Ce phénomène est interprété différemment selon les auteurs. Certains supposent que pendant le chauffage la condensation et la migration de l'eau liquide vers les zones plus froides du matériau entraînent une réhydratation partielle des CSH, et donc un accroissement de la résistance en compression [Hage 13]. D'autres supposent que le départ d'une partie de l'eau génère la formation de liaisons plus courtes et plus fortes, de siloxane (Si – O – Si), soit des énergies de surface plus importantes, qui contribuent au retrait de la pâte et à l'augmentation de la résistance [Dias 1990].
- Au-delà de 300°C : on observe une baisse constante de la résistance qui est principalement due à la déformation thermique différentielle entre la pâte et les granulats. Celle-ci génère l'apparition de fissurations à l'interface pâte-granulats qui, en se propageant dans la pâte, entraînent une diminution constante de la résistance en compression.

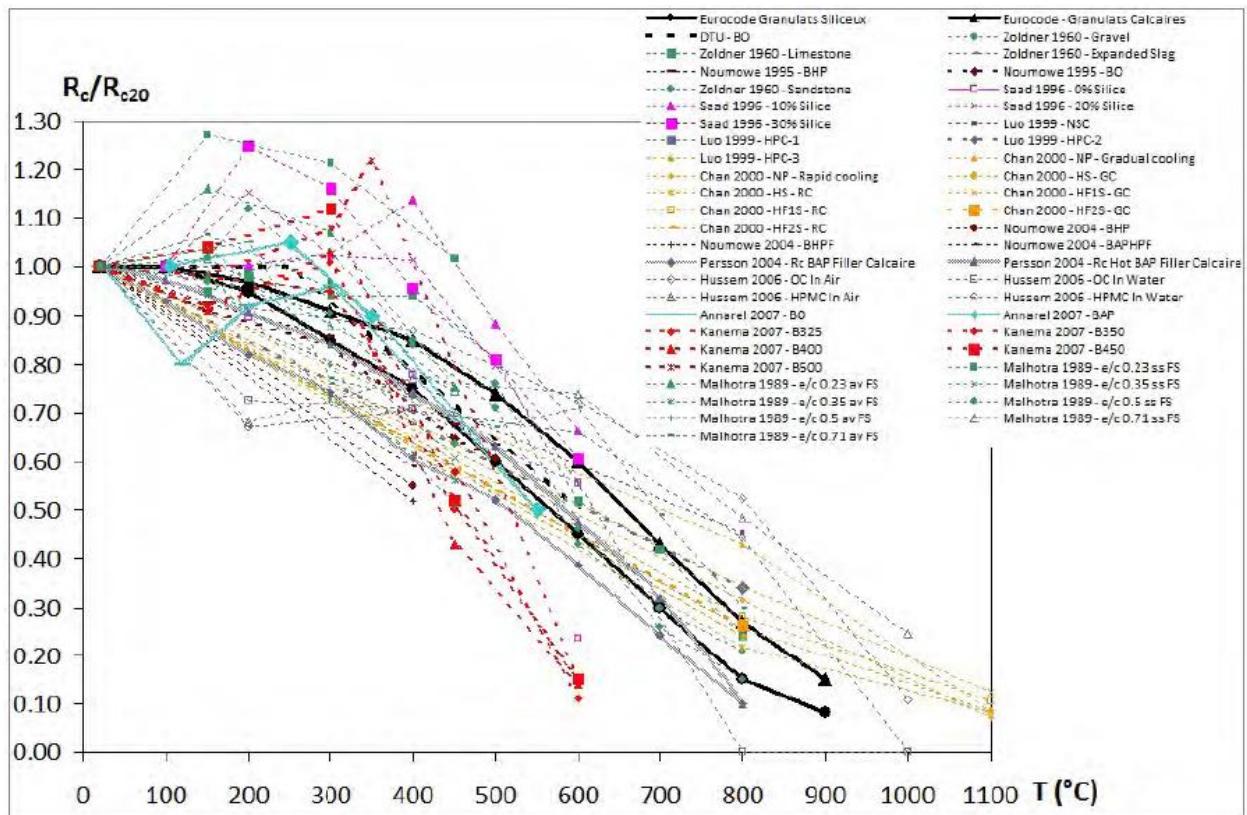


Figure 1-11. Résistances à la compression de bétons à chaud de bétons mesurée par différents auteurs [Fare 2009]

Plusieurs travaux ont montré l'influence de la nature minéralogique des granulats sur l'évolution des performances mécaniques avec la température. La Figure 1-11 illustre l'influence de la nature des granulats et des conditions de préparation sur les valeurs de résistance à la compression résiduelle après chauffage à haute température. L'Eurocode 2 distingue deux catégories de granulats, les calcaires et les siliceux. Des travaux récents ont cependant remis en cause cette classification en mettant en évidence l'hétérogénéité de stabilité thermique parmi les différents granulats siliceux [Xing 2011].

4.4.2 Résistance à la rupture en traction par fendage

La résistance en traction du béton est connue pour être dix à quinze fois plus faible que sa résistance en compression. De ce fait les résultats concernant son évolution en fonction de la température sont plus rares. Cependant, cette propriété permet de caractériser l'endommagement et déterminer l'ouverture des fissures. La plupart des essais réalisés sont des essais de traction par fendage ou par flexion. La traction directe est beaucoup plus rare car plus difficile à mettre en œuvre.

Différentes études ont été menées sur la résistance résiduelle en traction, et toutes s'accordent à dire qu'elle tend à diminuer avec la température. Cette chute de performance est quasi linéaire et significativement plus importante que la perte de résistance en compression [Hara 1972], [Noum 1995] [Li 2004], [Kane 2007] et [Chan 2006]. La perte de performance semble indépendante de la

vitesse de chauffe, et la résistance résiduelle en traction d'un béton ordinaire est légèrement plus faible qu'une résistance mesurée à chaud (Figure 1-12).

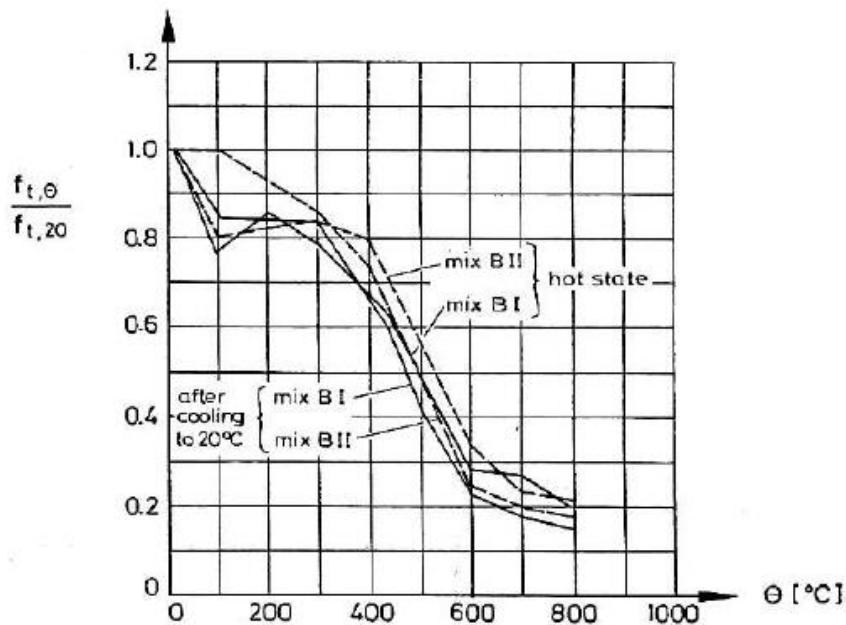


Figure 1-12. Evolution de la résistance en traction d'un béton en fonction de la température, mesurée à chaud et après refroidissement [Schn 1985]

L'Eurocode 2 [Euro 2004] propose une relation entre la résistance à la traction du béton et la température qui ne tient pas compte de la nature des granulats.

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}$$

Avec $k_{c,t}(\theta) = 1,0$ pour $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$

et avec $k_{c,t}(\theta) = 1,0 - 1,0(\theta - 100)/500$ pour $100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$

4.4.3 Module d'Young

Le module d'Young d'un matériau est sévèrement modifié par la température. Ces variations dépendent principalement de l'évolution de la microstructure de la pâte de ciment (déshydratation et fissuration de la matrice) [Hage 2004] et de la fissuration à l'interface pâte-granulat. Avec l'élévation de la température, on assiste à la rupture de liaisons internes qui entraînent une diminution du module d'élasticité puisque le matériau est de plus en plus déformable [Schn 1988].

En dessous de 300°C , et en raison du début de la perte d'eau libre, on observe souvent une légère augmentation de la résistance en compression mais une diminution du module. Au-dessus de 300°C en revanche, la résistance en compression et le module sont affectés de manière similaire [Mare 1972], [Nevi 1993].

De nombreux auteurs ont observé une diminution graduelle du module d'élasticité avec l'élévation de la température [Noum 1995] [Kane 2007]. Il a également été noté que la courbe d'évolution du module d'élasticité relatif du BHP est quasi superposable à celle du béton ordinaire [Noum 1995]. Hager [Hage 2004] a observé qu'à une vitesse de chauffage faible (1°C/min) le rapport E/C du béton n'a pas d'impact sur l'évolution du module d'élasticité, et ce jusqu'à 600°C. La Figure 1-13 illustre la variation du module d'élasticité en fonction de la température pour différents bétons [Bamo 2007].

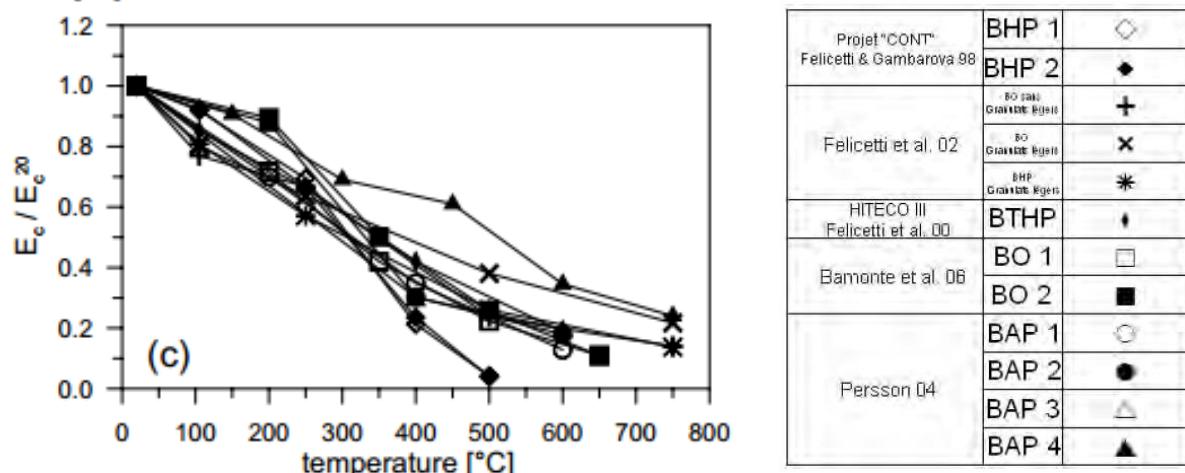


Figure 1-13. Evolution du module d'élasticité en fonction de la température [Bamo 2007]

4.5 Eclatement des bétons sous sollicitation thermique

Nous avons vu que l'évolution structurelle et micro structurelle du béton soumis à de hautes températures est gouvernée par un nombre important de facteurs expérimentaux : la température maximale atteinte, la vitesse de chauffe, l'état de contrainte, l'humidité externe...

4.5.1 Les différents types d'instabilités thermiques

Des incendies d'ouvrages en béton ont mis en avant les différents types d'endommagements pouvant survenir à haute température. On recense d'importantes dégradations, parmi lesquelles des pertes de résistance mécanique, mais également des détachements de matière. Deux hypothèses principales permettent d'expliquer le phénomène d'éclatement observé sur le béton chauffé : l'éclatement hydraulique par pression, et l'éclatement par dilatation thermique empêchée.

4.5.1.1 L'aspect thermo-hydrique

L'éclatement par pression hydraulique serait lié à l'augmentation de la pression de l'eau (sous forme vapeur et liquide) pendant le chauffage. Lors de la montée en température, l'eau (libre et adsorbée)

qui se trouve dans les pores du matériau passe sous forme gazeuse et migre à travers le réseau poreux. Une partie de cette eau est évacuée par la surface, tandis qu'une autre partie migre vers les zones plus froides de l'éprouvette, ou elle se condense. Les pores du matériau se remplissent alors d'eau liquide, et il se crée un « bouchon hydraulique » rendant toute migration difficile. Ce bouchon hydraulique entraîne l'augmentation de pression de vapeur saturante, conduisant à des phénomènes d'écaillage, comme illustré sur la Figure 1-14.

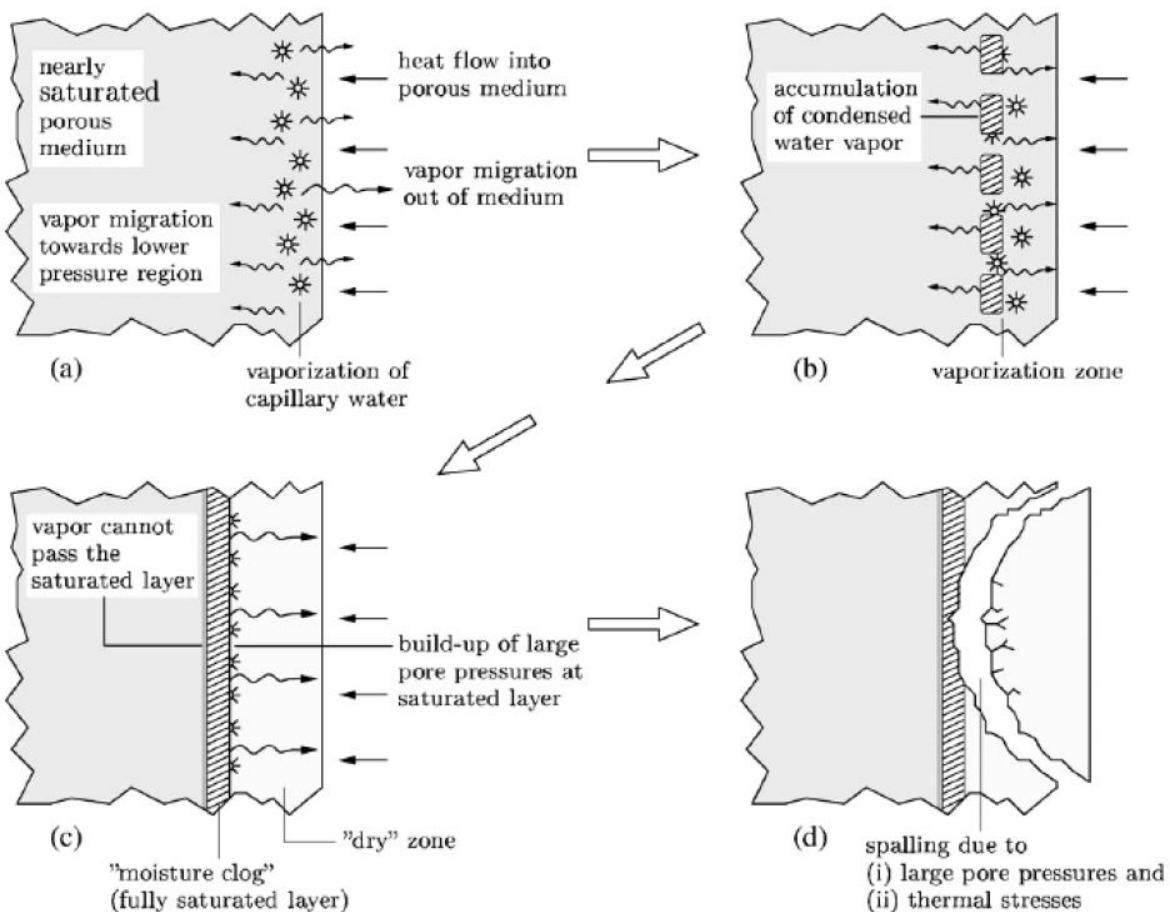


Figure 1-14. Illustration du mécanisme d'écaillage par pression hydraulique du béton [Zeim 2006]

Les bétons à hautes performances sont plus susceptibles d'éclater que les bétons ordinaires en raison de la grande compacité de leur matrice, et par conséquent de leur faible perméabilité. La montée en pression est alors d'autant plus forte.

2.2.1.1 L'aspect thermomécanique

Lorsque le béton est chauffé, les dilatations thermiques subies par les granulats entraînent, lorsqu'elles sont empêchées, des contraintes de compression parallèles à la surface chauffée. Ces contraintes conduisent à un endommagement du matériau par déclamination parallèle à la surface.

En réalité, ces deux processus (thermo-hydrique et thermomécanique) (Figure 1-15) sont acteurs dans le phénomène d'instabilité thermique du béton et agissent parallèlement pour conduire aux phénomènes d'écaillages observés sur les ouvrages en béton post-incendie.

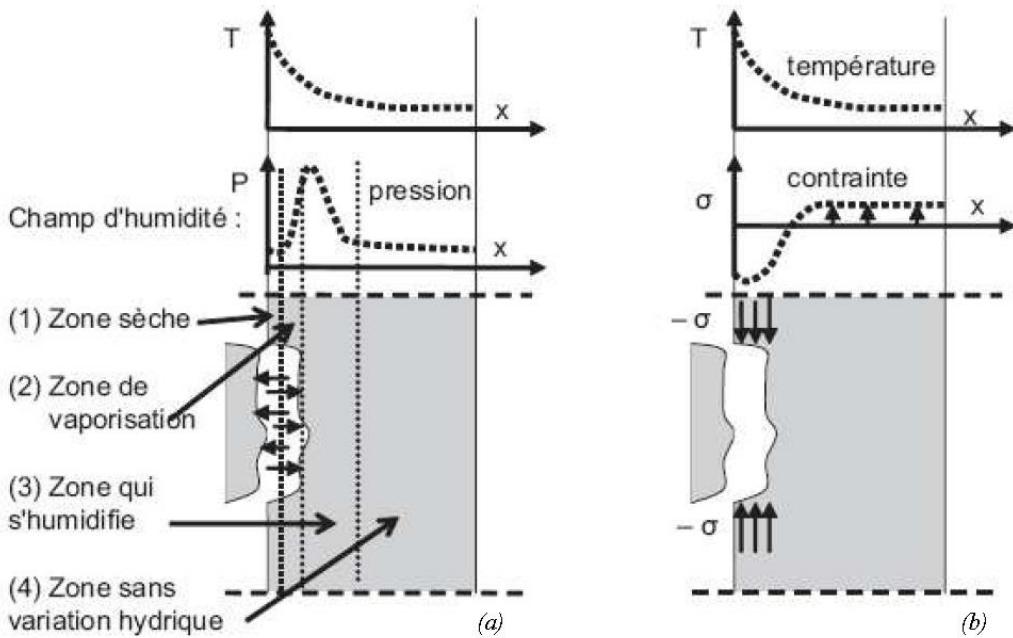


Figure 1-15. Principales hypothèses concernant l'éclatement du béton à haute température : (a) phénomènes de pression interne [Ande 1997] et (b) dilatations thermiques empêchées [Baza 1996] [Robe 2008]

5. Problématique du béton recyclé à haute température

La formulation du béton, et donc la nature et les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des granulats ont un impact certain sur la manière dont le granulat va se comporter et se dégrader avec la température. Les granulats recyclés présentent des caractéristiques particulières en raison de leur composition mi roche, mi mortier. Ils sont plus poreux, contiennent des hydrates, présentent plus de zones de transition interfaciales... Ces caractéristiques ayant un impact significatif sur le comportement du béton à haute température, il est indispensable d'étudier le béton recyclé à haute température afin de permettre une utilisation dans le bâtiment.

5.1 Etat de l'art et remarques sur les protocoles expérimentaux

Les études publiées sur le comportement au feu des bétons incorporant des granulats recyclés sont très récentes. L'étude la plus ancienne dont nous disposons sur le sujet est celle de Zega et al. [Zega 2006], et les plus récentes sont celles de Salaht et al. [Sala 2013] et de Xiao et al. [Xiao 2013].

Toutes les éprouvettes de béton utilisées pour les divers essais expérimentaux ont été soumises à des régimes de chauffage compris entre 4,5°C/mn et une sollicitation ISO 834. Cette vitesse de

chauffe relativement élevée peut engendrer un fort gradient thermique entre la surface et le centre des éprouvettes de béton. Dans leur étude expérimentale, Xiao et al. [Xiao 13] supposent qu'après exposition des échantillons à une température donnée, puis un maintien de cette température pendant un temps supérieur à 2h, la température est homogène dans toute l'éprouvette (Essai réalisé sur des éprouvettes cubiques 150*150*150mm et prismatique 100*100*400mm). Ce résultat est contredit par l'étude de Zega et al. [Zega 2006] lors de laquelle la température de 500°C est maintenue pendant 4h. On observe alors encore une différence de température de 50°C entre l'intérieur du four et la température au centre du béton (Figure 1-16).

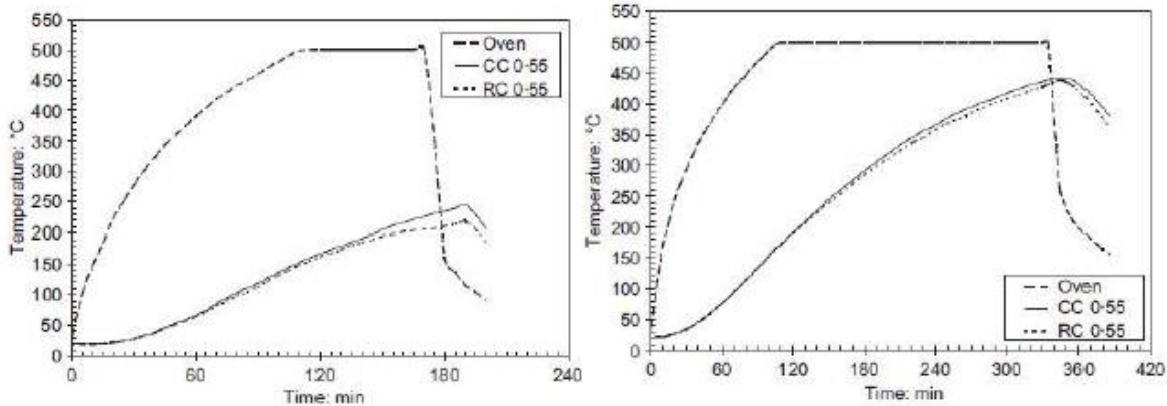


Figure 1-16. Evolution de la température dans le four et dans le béton pour 2 durées d'exposition : 500°C pendant 1h à gauche, puis 500°C pendant 4h à droite [Zega 2006]

Nous pouvons aussi souligner qu'il est parfois difficile de comparer les résultats sur les granulats recyclés en raison de l'hétérogénéité des protocoles expérimentaux, des températures de chauffage, des rapports E/C, des types de ciment, et de la qualité des granulats recyclés utilisés.

5.2 Instabilités thermiques observées après chauffage de bétons de granulats recyclés

L'observation d'éprouvettes cubiques (150*150*150mm) et prismatiques (100*100*400mm), après les essais réalisés par Xiao et al. [Xiao 2013] a montré qu'il n'y avait pas de fissures évidentes à la surface des éprouvettes cubiques jusqu'à la température de 700°C. Ce n'est qu'à partir de 800°C que des macro-fissures évidentes apparaissaient. En revanche, les auteurs observent sur les éprouvettes prismatiques des fissures dès 600°C. La taille et la forme de l'éprouvette semblent donc avoir une influence sur le phénomène de fissuration (Figure 1-17).

Il est intéressant de noter qu'aucun écaillage explosif n'a été observé lors des traitements thermiques appliqués aux bétons de granulats recyclés, et ce quelle que soit la forme des éprouvettes testées.

Aucun des articles consultés ne traite d'étude effectuée avec un chauffage lent. Si l'on tient compte des essais réalisés par Kanema [Kane 2007] qui montrent que le risque d'éclatement augmente avec la vitesse de chauffe, on peut émettre l'hypothèse qu'un béton de granulats recyclés soumis à un traitement thermique plus lent que dans les études citées présente un risque d'éclatement quasi nul.

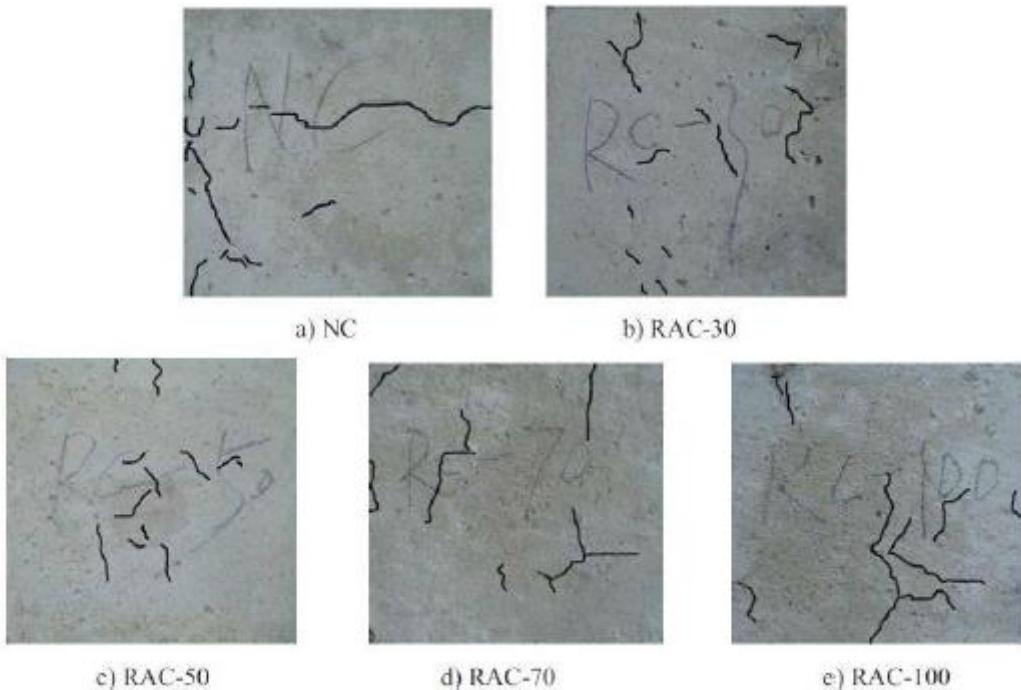


Figure 1-17. Surfaces des éprouvettes cubiques chauffées à 800 °C [Xiao 2013]

5.3 Comportement thermique et propriétés thermiques des bétons recyclés

A ce jour, nous ne disposons dans la littérature d'aucune étude sur le comportement thermomécanique du granulat recyclé. Le béton étant constitué à 80% de granulats (fraction volumique) leurs caractéristiques thermiques ont pourtant une influence certaine sur les bétons incorporant ce type de granulat.

Nous ne disposons pas non plus de bibliographie faisant état de l'évolution des propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique) et physiques (évolution de la porosité, de la perte de masse) du béton de granulat recyclé lorsqu'il est soumis à des températures élevées.

Une étude cependant a été menée sur l'influence du rapport E/C et du type de granulat contenu dans le béton d'origine du granulat recyclé sur l'évolution des températures dans les bétons [Zega 2009]. Les éprouvettes sont exposées à un chauffage à une vitesse de 4,5°C/min jusqu'à 500°C, puis maintenues à cette température pendant 1h. Des thermocouples placés dans le four et au centre des éprouvettes permettent de suivre l'évolution de la température (Figure 1-18).

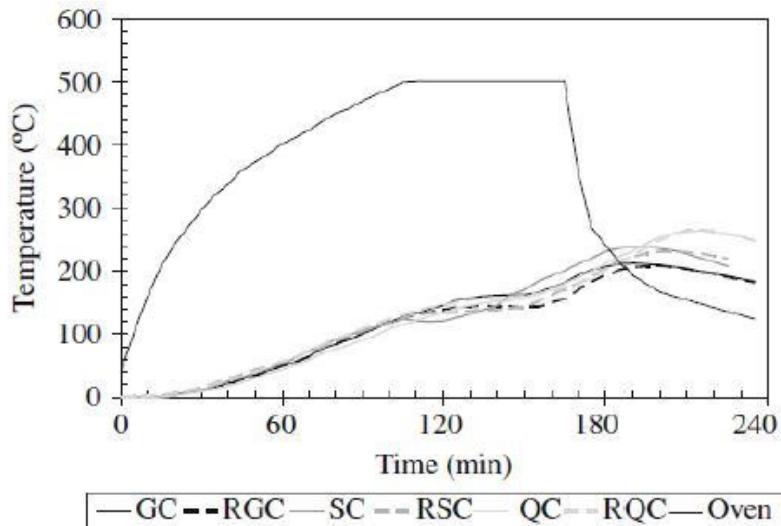


Figure 1-18. Températures enregistrées dans le four et à l'intérieur de d'éprouvettes de béton formulés à partir de granulats de nature différentes avec une E/C de 0.7 [Zega 2009].

On constate que les températures mesurées au centre des éprouvettes des bétons de granulats recyclés et des bétons classiques sont similaires jusqu'à 110 mn. Les différences de comportement débutent au-delà de 110 mn avec des paliers de différents niveaux aux alentours de 110-160 mn et 120°C-160°C. Le palier le plus long étant celui du RGC (Béton avec 75% de granulat recyclé d'origine calcaire), qui maintient la température de 140°C constante pendant 50mn (110mn-160mn). Au-delà de 160 mn, la température au centre des éprouvettes recommence à évoluer lentement pour le RGC et beaucoup plus vite pour le SC (Béton de granulat naturel siliceux).

Les auteurs n'ont pas fait de commentaire sur les paliers observés. Néanmoins, on peut supposer que ce phénomène est lié à la consommation de chaleur latente, due au départ de l'eau libre puis liée, qui intervient aux alentours de cette température.

5.4 Comportement mécanique résiduel des bétons de granulats recyclés

Il faut souligner qu'il est parfois difficile de comparer les résultats obtenus sur les granulats recyclés en raison de l'hétérogénéité des protocoles expérimentaux, des températures de chauffage, des rapports E/C et des types de ciment. Nous avons cependant essayé de croiser certains résultats obtenus lorsque cela était possible, afin d'avoir une idée sur les tendances globales de performances mécaniques résiduelles du béton de granulat recyclé.

5.4.1 Résistance résiduelle en compression

La Figure 1-19 illustre ratio $f_{c(T)}/f_{c20^\circ\text{C}}$ (résistance à la compression résiduelle à la température T / résistance à la compression à la température ambiante), pour des taux de substitution des gravillons donnés et en fonction de la température d'exposition.

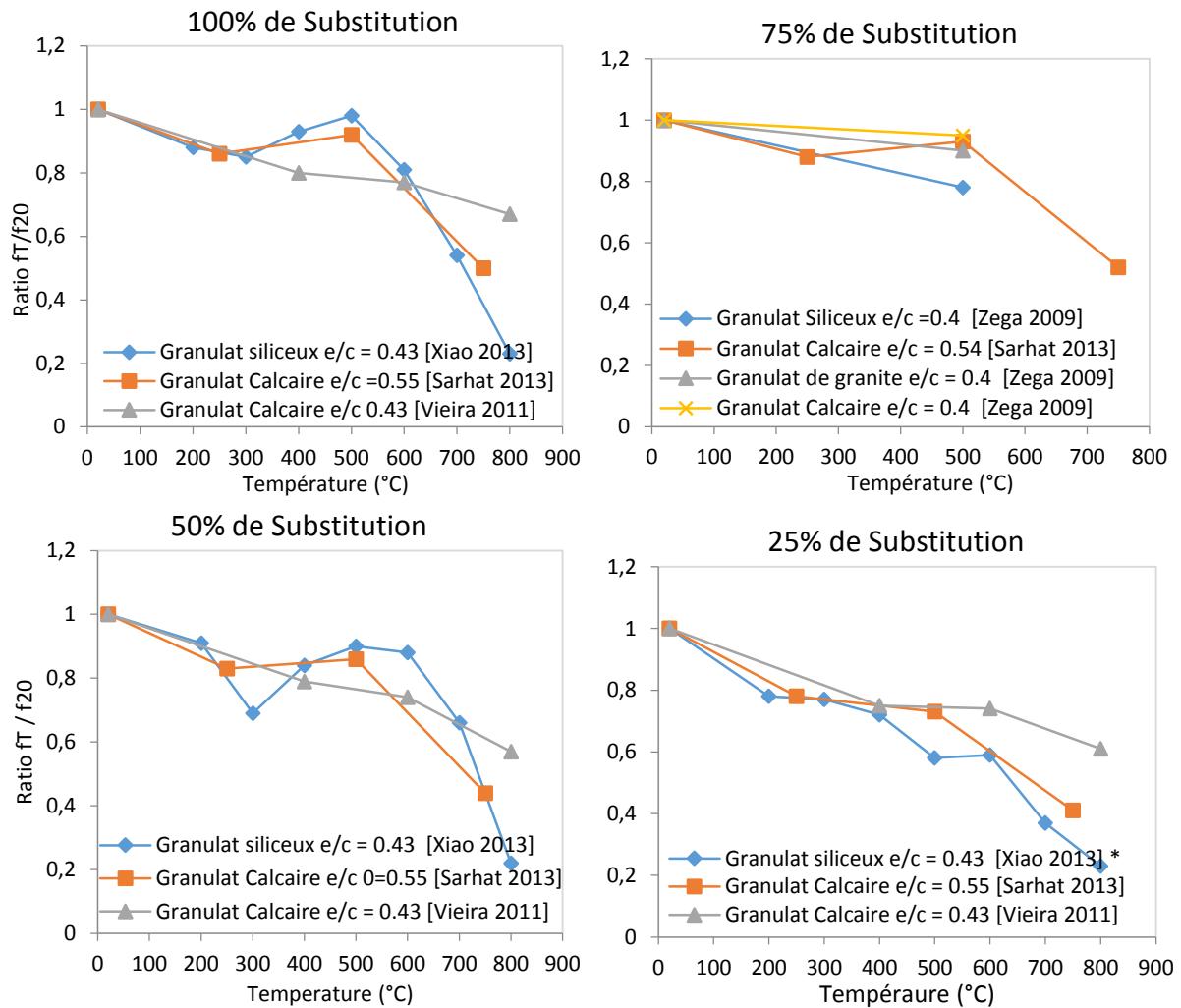


Figure 1-19. Etude comparative des résistances en compression résiduelles en fonction des taux de substitution et de la température

On remarque clairement une baisse dans l'allure générale des performances résiduelles avec toutefois une meilleure résistance à 800°C pour les granulats recyclés d'origine calcaire. On observe également une forte dispersion des résultats entre 300°C et 500°C, dispersion particulièrement remarquable pour des taux de substitution supérieurs à 50%.

Lorsqu'on s'intéresse au ratio de la résistance résiduelle en compression du béton de granulat recyclé sur la résistance à la compression résiduelle du béton classique ($f_{\text{recyclé}} / f_{\text{référence}}$), en fonction du pourcentage de substitution du granulat naturel par du granulat recyclé (Figure 1-20), l'étude de Vieira et al. [Vie 2011] semble indiquer que le taux de substitution n'a pas de réelle influence sur la résistance résiduelle en compression. Cette tendance n'est pas retrouvée dans les courbes obtenues avec les valeurs de Sarhat [Sarh 2013] et Xiao [Xiao 2013] qui obtiennent des performances mécaniques résiduelles des bétons recyclés qui semblent s'améliorer par rapport au béton de référence avec l'augmentation du taux de substitution.

Pour un chauffage à 500°C et 750°C, la résistance à la compression s'améliore avec le taux de substitution selon l'étude de Sarhat [Sarh 2013] effectuée sur des bétons avec des granulats naturels siliceux et des granulats recyclés d'origine calcaire, alors qu'elle diminue sur la courbe

donnée par l'étude de Xiao [Xiao 2013] à 800°C pour des bétons de granulats naturels siliceux et de granulats recyclés d'origine siliceuse.

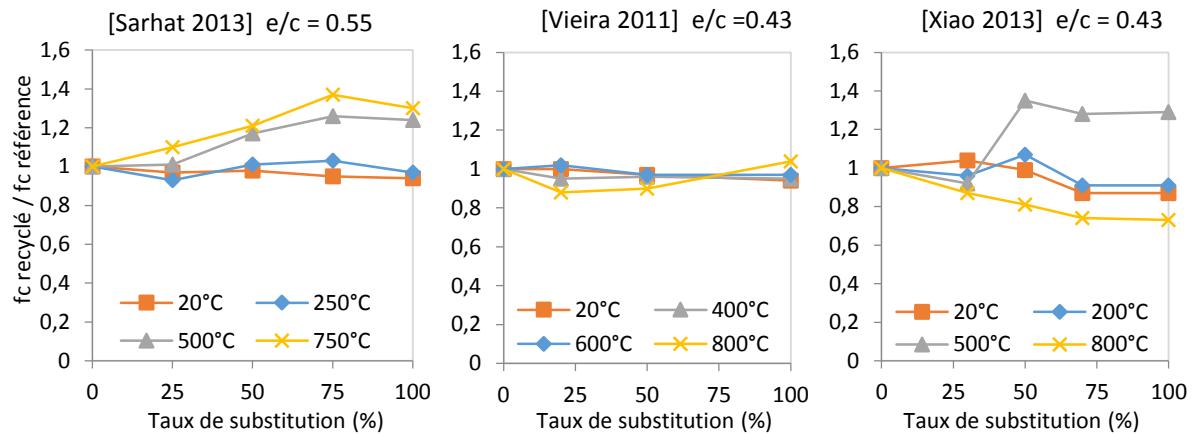


Figure 1-20. Résistance en compression résiduelle des bétons recyclés en fonction du taux de substitution

5.4.2 Résistance résiduelle en traction

Les courbes comparatives des résultats obtenus par Vieira [Vie 2011] et Salah [Sala 2013] sur des mesures de résistances résiduelles en traction par fendage nous donnent des résultats à peu près semblables selon les auteurs et pour différents taux de substitution (Figure 1-21).

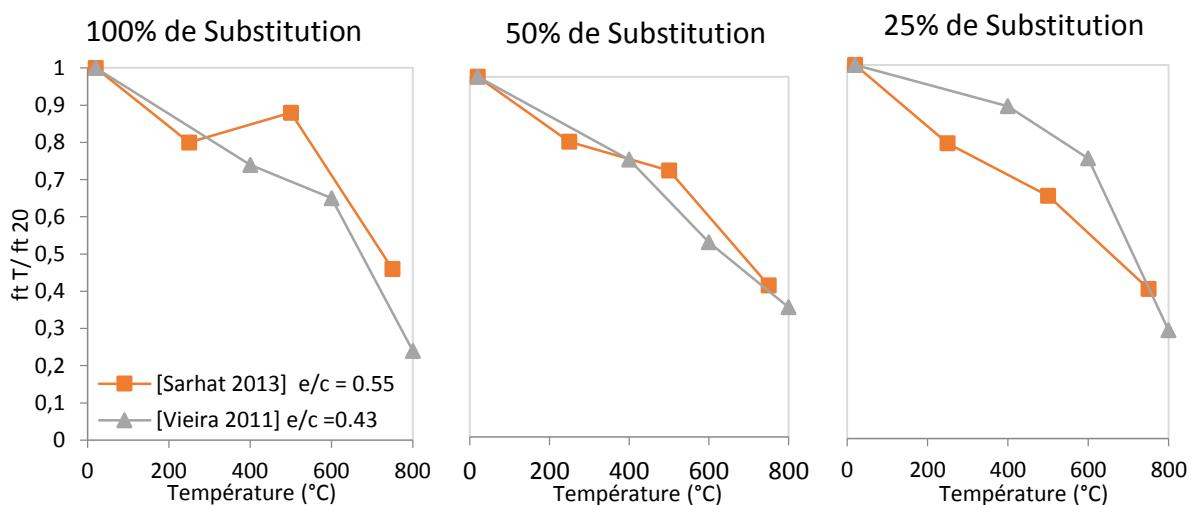


Figure 1-21. Résistances résiduelles en traction par fendage de bétons recyclés à différents taux de substitution en fonction de la température. [Sarh 2013] en rouge et [Vie 2011] en vert.

Sur la Figure 1-22, on observe que le gain sur la valeur de résistance en traction résiduelle par rapport à celle du béton de référence augmente avec le taux de substitution selon l'étude de Sarhat [Sarh 2013], effectuée sur des bétons de granulats naturels siliceux et de granulats recyclés d'origine calcaire. Selon l'étude de Vieira [Vie 2011] en revanche, les résultats sont assez dispersés. La différence de comportement peut être liée au protocole expérimental adopté

par les auteurs, ou bien à des différences de composition minéralogique des granulats recyclés. Il est aussi important de noter que si le granulat du béton naturel de référence et le granulat recyclé sont de nature minéralogique différente, on peut en effet s'attendre à une forte variabilité des résultats, la nature du granulat ayant une forte influence après 300°C [Xing 2011]

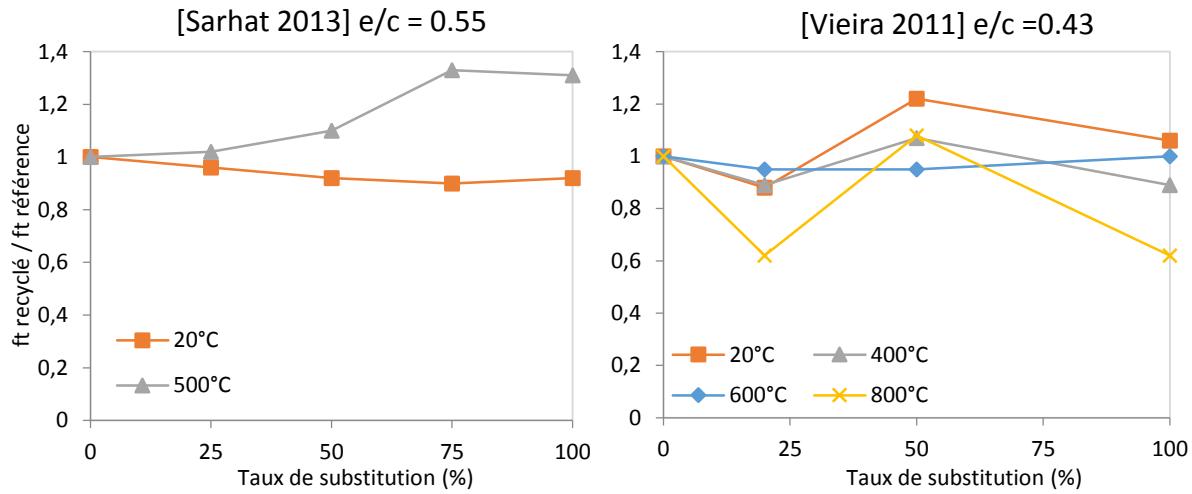


Figure 1-22. Résistances résiduelles en traction par fendage de bétons recyclés à différentes températures en fonction du taux de substitution

5.4.3 Module d'élasticité résiduel

La tendance est semblable lorsqu'on s'intéresse aux variations de module d'élasticité statique résiduel obtenues par les différents auteurs dont nous avons pu comparer les résultats. Les travaux de Sarhat montrent une plus faible perte du module avec la température à partir de 500°C lorsque le taux de substitution augmente [Sarh 2013]. L'étude de Vieira [Viei 2011] en revanche indique plutôt une légère augmentation de la perte de module lorsque le taux de substitution augmente (Figure 1-23).

Les deux études s'accordent en revanche à dire que pour un taux de substitution donné, le module d'Young résiduel diminue fortement avec la température (Figure 1-24).

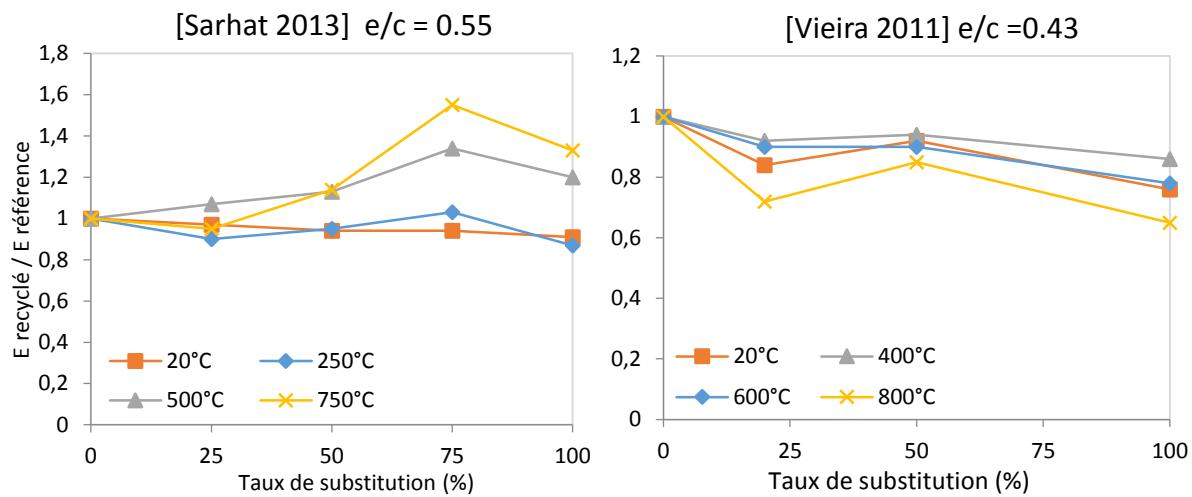


Figure 1-23. Evolution du module d'élasticité de bétons recyclés en fonction du taux de substitution et à différentes températures.

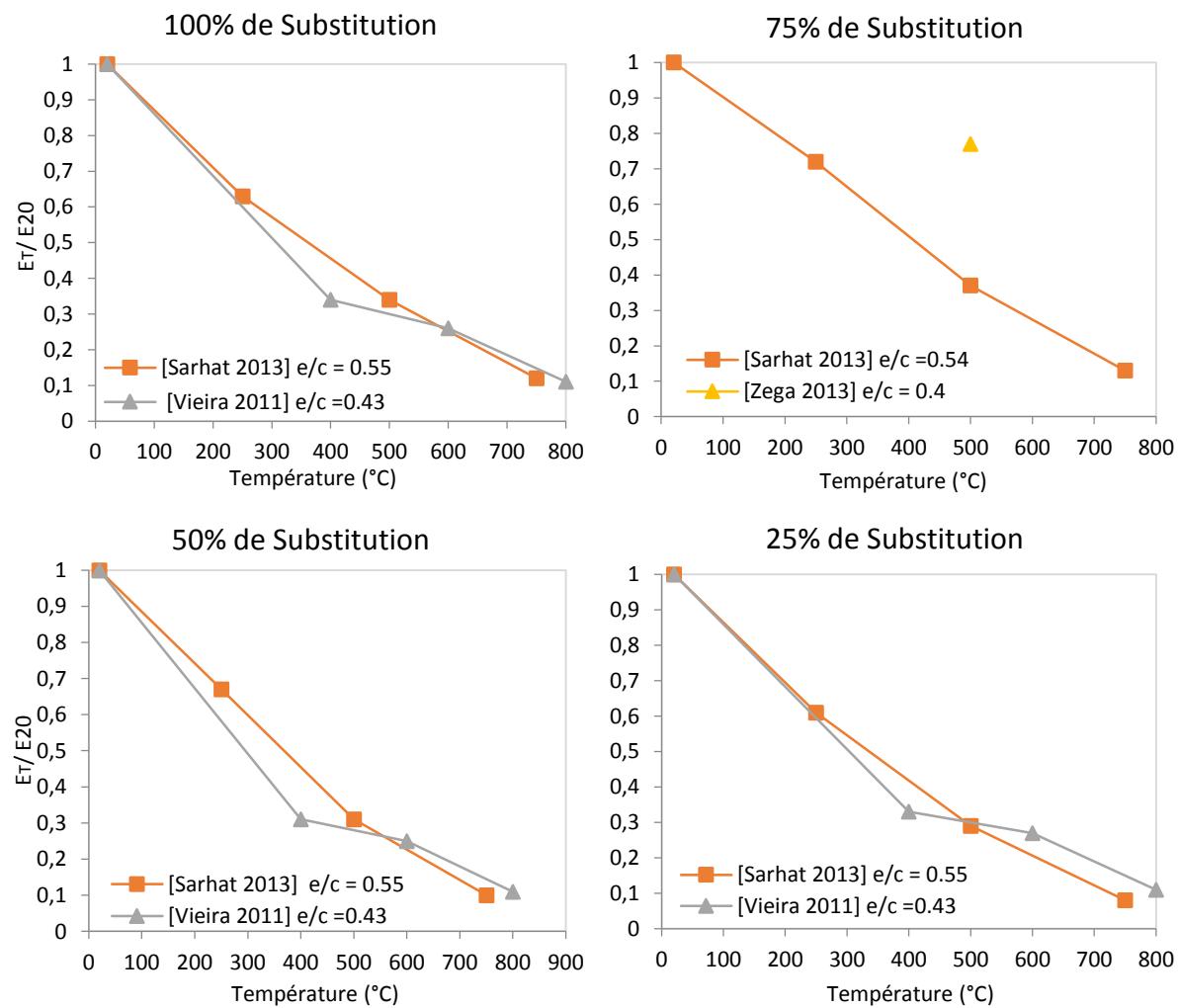


Figure 1-24. Evolution du module d'élasticité résiduel en fonction de la température, à taux de substitution donné

6. Conclusion de l'étude bibliographique

L'étude bibliographique porte sur deux sujets complémentaires mais distincts : les bétons recyclés d'une part et le comportement du béton à chaud d'autre part, pour conclure sur la problématique du béton recyclé soumis à de hautes températures.

A la lumière des différentes publications étudiées, plusieurs conclusions se dessinent :

- Sous l'effet de la température, la microstructure de la pâte de ciment et des granulats se modifie, impactant les performances mécaniques du béton. On observe en effet une déshydratation des CSH dans la pâte, la décomposition de la portlandite, la transformation allotropique du quartz dans les granulats siliceux ou encore la décarbonatation de la calcite dans les granulats calcaires...
- La nature des granulats, ainsi que leur texture ou porosité, impacte fortement le comportement du béton à haute température. Leur coefficient de dilatation thermique gouverne notamment les déformations intervenant au niveau de l'interface pâte / granulat.

Concernant le comportement des bétons recyclés à haute température, les études sont encore peu nombreuses, et les résultats parfois dispersés. On peut cependant en tirer quelques lignes générales :

- Comme le béton naturel, le béton recyclé présente des pertes de performances lorsqu'il est soumis à des températures élevées.
- Aucun écaillage explosif n'a été noté pour les formulations de béton recyclé dans les études auxquelles nous avons eu accès.
- La tendance globale va vers de meilleures propriétés résiduelles relatives pour les bétons recyclés en comparaison avec les bétons naturels.
- Les granulats recyclés d'origine calcaire offrent de meilleures performances que les granulats d'origine siliceuse. Cette tendance s'accorde avec les études menées sur l'influence de la nature des granulats sur le comportement à haute température du béton.

De manière générale, on observe une forte dispersion des valeurs notamment pour la résistance en compression et l'influence du taux de substitution sur les propriétés mécaniques. Cette dispersion est probablement due à la variété des cinétiques de chauffage, d'origines des granulats et de dimensions des éprouvettes testées.

Nous n'avons trouvé aucune étude sur le comportement thermomécanique des granulats, ni sur l'évolution des propriétés thermiques (conductivité, chaleur spécifique) et physiques (porosité, perte de masse) des bétons recyclés avec la température.

Aucun protocole de chauffage lent n'a été trouvé, ce qui peut poser un problème d'homogénéité de la température au sein du matériau, et donc rendre délicate l'interprétation des données.

Suite à cet état de l'art, il nous semble important de s'affranchir de la variabilité minéralogique du granulat d'origine pour mettre plus facilement en évidence les spécificités intrinsèques du granulat recyclé sur le comportement à haute température. L'étude bibliographique menée sur le comportement à hautes températures des bétons a en effet souligné l'influence de la teneur en eau des bétons et de la liaison pâte granulat. L'influence de ces paramètres est à relier aux différences de comportement élastiques et de capacités de transferts entre la nouvelle pâte et l'ancienne pâte adhérente au granulat. Nous envisageons de comparer, pour chacun des granulats étudiés, des

matrices de porosité différentes. La prise en compte de la variabilité et de l'hétérogénéité des granulats recyclés doit aussi être prise en compte. Nous comparerons ainsi un granulat recyclé « idéal » de laboratoire à un granulat issu d'une centrale de production. L'écart de comportement entre ces deux catégories de béton permettra d'analyser l'influence de la présence de « polluants».

Références bibliographiques

Study on waste generated and treated in Europe, UEPG, 2005

Use of recycled materials as aggregates in the construction industry (Vol 2), 2000, *The ETN Recycling in Construction*

Guide d'utilisation pour l'utilisation des matériaux régionaux d'île de France, Les bétons et produits de démolition recyclés.

[Abra 1971] M. Abrams. Compressive strength of concrete at temperature to 1600°F. ACI Special Publication, SP 25, Detroit, (1971)

[Ario 2007] O. Ario, Effects of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire safety journal*, 42, (2007) 516-522

[Alon 2004] C. Alonso, L. Fernandez, Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, *Journal of Materials Science* 39 (2004) 3015-3024

[Ande 1997] Y. Anderberg, Spalling phenomena of HPC and OC, International workshop on fire performance of high-strength concrete, NIST, Gaithersburg, MD, 1997

[Bamo 2007] P. Bamonte and R. Felicetti, On the tensile behavior of thermally-damaged concrete, Proceedings of the 6th International conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure

[Bamo 2007] P. Bamonte, S. Cangiano, R. Felicetti, P.G. Gambarova, R. Billi, F. Busnelle, M. Quaglia, Thermomechanical characterization of concrete mixes suitable for the rehabilitation of fire-damaged tunnel linings, studied and researched, 27 (2007)

[Baza 1996] Z.P. Bazant and M.F. Kaplan, Concrete at high temperature: material properties and mathematican models, Longman Group Limited, London, 196 pages, (1996)

[Bere 1988] P. Berest, Ph. Weber, *La thermomécanique des roches : manuels et méthodes*, BRGM Editions, Orléans (1988)

[Brit 2014] J. de Brito, Properties of recyced concrete, presentation lors du Workshop “Recycling concrete into concrete: a scientific and industrial perspective”, Juillet 2014

[Butl 2013] L. Butler, J. S. West, S. L. Tighe, Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength, *Construction and Building Materials* 47 (2013) 1292–1301

[Chan 2006]n 2006] Y.F. Chang, Y.H. Chen, M.S. Shen, G.C. Yao, Residual stress-strain for concrete after exposure to high temperatures, *Cement and concrete research*, 36, (2006) 1999-2005

[Cast 2004] M. Castellote, C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas and J. Campo, Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete research*, 34, (2004) 1633-1644

[Choi 2012] Won-Chang Choi, Hyun-Do Yun, Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading, *Engineering Structures*, 41 (2012) 285–293

[Coop 1997] H.W. Cooper, G. Simmons, The effect of cracks on the thermal expansion of rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, 36, (1977) 404-412

[Debi 2010] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai, R. Degeimbre, Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 32 (2010) 421-426

[Diam 2001] S. Diamond and J. Huang, The ITZ in concrete – a different view based on image analysis and SEM observations, *Cement and Concrete Composites*, 23 (2001) 179-188

[Dias 1990] W.P.S Dias, G.A. Khouri, P.J.E. Sullivan, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, *ACI Material Journal*, 87, (1990) 160-166

[Duan 2014] Zhen Hua Duan, Chi Sun Poon, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Materials and Design* 58 (2014) 19–29

[Etxe 2007] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 735–742

[Euro 2004] European Committee for Standardization, EN 1992-1-2, in Eurocode 2 Design of Concrete Structures, Brussels, CEN, (2004)

[Evan 2007] L. Evangelista, J. de Brito, Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 397–401

[Fare 2009] Hanaa FARES, Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2009)

[Ferr 2011] L. Ferreira, J. de Brito, M. Barra, Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, 63 (2011) 617 –627

[Flynn 1999] D.R. Flynn, Response of high performance concrete to fire conditions: review of thermal properties and measurement techniques, NIST, (1999)

[Fu 2004] Y.F. Fu, Y.L. Wong, C.A. Tang, C.S. Poon, Thermal induced stress and associated cracking in cement-based composite at elevated temperature – Part I: Thermal cracking around single inclusion, *Cement and Concrete Composites*, 26, (2004) 99-111

[Gome 2002] Jose M.V. Gomez-Soberon, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1301– 1311

[Hage 2004] I. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004

[Hage 2013] I. HAGER, Behaviour of cement concrete at high temperature, *bulletin of the polish academy of sciences technical sciences*, Vol. 61, No. 1, 2013

[Hans 1983] T.C. Hansen, H. Narud, Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregates, *Concrete International*, 5 (1983) 79-83

[Hara 1972] T. Harada, J. Takeda, S. Yamane, F. Furumura, Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, International Seminar on Concrete for Nuclear Reactor, ACI Special Publication, Detroit, 1, (1972) 377-406

[Ingh 2009] Jeremy P. Ingham, Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures, materials characterization, 60 (2009) 700–709

[Irex 2005] Irex, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à haute température, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (2005)

[Kane 2007] M. Kanéma, Influence des paramètres de formation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2007)

[Khal 2004] F.M. Khalaf, A.S. De Venny, Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in concrete: review, Journal of materials in civil engineering, 16 (2004) 331-340

[Khou 1986] G.A. Khoury, B.N. Grainger, P.J.E. Sullivan, Strain of concrete during first cooling from 600°C under load, Magazine of concrete research, 38 (1986) 3-12

[Khou 1988] G.A. Khoury, G.P.E. Sullivan, Research at Imperial College on the effect of elevated temperature on concrete, Fire Safety Journal, 13, (1988) 69-72

[Kou 2007] S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan, Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, J. Mater. Civ. Eng. 19 (2007) 709-717

[Kou 2011] Shi-Cong Kou, Chi-Sun Poon, Miren Etxeberria, Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete, Cement & Concrete Composites 33 (2011) 286–291

[Kou 2012] S.C. Kou, C.S. Poon, Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, Construction and Building Materials 35 (2012) 69–76

[Kodu 2003] V.K.R. Kodur, M.A. Sultan, Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 15, (2003) 101-107

[Lamo 2002] J.F. Lamond, Sr R.L. Campbell, A. Giraldi, N.J Jenkins, T.R. Campbell, W. Halczak, Removal and reuse of hardened concrete, ACI Mater J. 99 (2002) 300-325

[Li 2004] M. Li, C.X. Qian, W. Sun, Mechanical properties of high-strength concrete after fire, Cement and Concrete Research, 34, 1001-1005 (2004)

[Mare 1972] J.C. Marechal, Variations in the modulus of elasticity and Poisson's ratio with temperature, ACI Special publication SP34, 1, Detroit (1972)

[Mind 2009] J-C. Mindegua, Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (2009)

[Naga 2004] S. Nagataki, A. Gokce, T. Saekic, M. Hisada, Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Research 34 (2004) 965–971

[Nevi 1993] A.M. Neville, Properties of concrete, 3rd ed. UK, Longman House (1993)

[Noum 1995] A. Noumowé, Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton : cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de doctorat, INSA Lyon (1995)

[Noum 2009] Albert N. Noumowe, Rafat Siddique, G. Debicki, Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C), *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1855–1861

[Oliv 1996] M. Barra de Oliveira and E. Vazquez, The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, *Waste Management*, 16 (1996) 113-117

[Olli 1995] J.P. Ollivier, J.C. Maso, and B. Bourdette, Interfacial Transition Zone in Concrete, *Advanced Cement Basic Materials*, 2, (1995) 30-38

[Padm 2009] A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 829–836

[Paul 2014] Paula Folino, Hernán Xargay, Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression, *Construction and Building Materials* 56 (2014) 21–31

[Peng 2008] Gai-Fei Peng, Zhi-Shan Huang, Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 593–599

[Pias 1984] J. Piasta, Z. Sawicz, L. Rudzinski, Changes in the structure of hardened paste due to high temperature, *Materials and Structures*, 100, (1984) 291-196

[Pliy 2010] P. Pliya, Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2010)

[Poon 2004] C.S Poon, Z.H Shui, L. Lam, H. Fok, S.C. Kou, Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 31-36

[Poon 2004] C.S Poon, Z.H. Shui, L. Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 461-468

[Rao 2007] Akash Rao, Kumar N. Jha, Sudhir Misra, Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, *Resources, Conservation and Recycling* 50 (2007) 71–81

[Rile 2004] Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Rilem publications SARL, 2004

[Robe 2008] F. Robert, H. Coline, G. Debicki, La durabilité des bétons face aux incendies, *La durabilité des bétons*, Presse de l'Ecole Nationale de Ponts et Chaussées (2008) 707-765

[Sarh 2013] Salah R. Sarhat and Edward. G. Sherwood, Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperature, *Journal of Material in Civil Engineering*, 25, (2013) 1721-1730

[Schn 1985] U. Schneider, Properties of materials at high temperatures – concrete, RILEM TC 44-PHT, 1985

[Schn 1988] U. Schneider. Concrete at high temperature: A general review. *Fire safety Journal*, 13 (1988) 55-68

[Some 1992] W.H. Somerton, Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems, Elsevier (1992)

[Stud 2005] *Study on waste generated and treated in Europe*, 2005

[Tam 2005] Vivian W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1195–1203

[Tam 2008] Vivian W.Y. Tam, Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, *Resources, Conservation and Recycling* 52 (2008) 821–828

[Topç 2004] İlker Bekir Topçu, Selim Sengel, Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1307–1312

[Tsim 1997] M. Tsimbrovska, P. Kalifa, D. Quenard, J.F. Daïan, High performance concrete at elevated temperature: permeability and microstructure, *Trans. Of the 14th Int. Conf. on Structural Mechanic in Reactor Technology*, Lyon, France (1997)

[Use 2000] Use of recycled materials as aggregates in the construction industry, *The ETN Recycling in Construction*, Vol 2, (2000)

[Vieir 2011] J.P.B. Vieira, J.R. Correia, J. de Brito, Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates, *Cement and Concrete Research* 41, (2011) 533-541

[Wang 2010] Wang XT, Yang DJ. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading. *Civil engineering in china – current practice and research report* (2010) 787–90.

[Xiao 2006] J. Xiao, On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibers at elevated temperatures, *Fire safety journal*, 41, (2006) 115-121

[Xiao 2013] J. Xiao, Y. Fan, M.M Tawana, Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures, *Berlin – Structural Concrete* 14, 2, (2013)

[Xing 2010] Zhi XING, Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, *Thèse de doctorat*, Université de Cergy-Pontoise (2011)

[Ye 2007] G. Ye, X. Lui, G. De Schutter, L. Taerwe, P. Vandeveld, Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature, *Cement and concrete research*, 37, (2007) 978-987

[Zega 2006] C. J. Zega and A. A. Di Maio, Recycled concrete exposed to high temperatures, *Magazine of Concrete Research*, 58, No. 10, (2006) 675–682

[Zega 2009] Claudio Javier Zega, Angel Antonio Di Maio, Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2047–2052

[Zeim 2006] M. Zeiml, D. Leithner, R. Lackner, H. Mang, How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 929-942

[Zhao 2014] Zengfeng Zhao, Re-use of fine recycled concrete aggregates for the manufacture of mortars, *Thèse de doctorat*, Ecole de Mines de Douai et Université Lille 1.

Chapitre 2. Caractérisation des granulats recyclés

1. Introduction

Ce chapitre porte sur la caractérisation de granulats recyclés issus de béton déconstruit ou de béton naturel coulé et concassé au laboratoire.

Dans un premier temps, nous cherchons à évaluer les méthodes de caractérisation des granulats naturels, appliquées aux granulats recyclés. Nous nous intéressons particulièrement aux méthodes de mesure de masse volumique et d'absorption d'eau. La connaissance précise de ces données est indispensable pour fiabiliser les formulations et maîtriser la quantité d'eau efficace dans le mélange. .

Par la suite, nous déterminerons les caractéristiques physiques (granulométrie, porosité...) des granulats qui composeront les bétons étudiés par la suite. Nous étudierons leur pétrographie et leurs compositions minéralogiques au moyen d'analyses par diffraction des rayons X et par des analyses TD et TG.

2. Evaluation des méthodes de mesure des propriétés physiques des granulats recyclés – Etude réalisée dans le cadre du Projet National Recybeton

En préalable à la caractérisation de nos granulats recyclés, nous avons souhaité tester l'utilisation de la norme EN 1097-6 qui concerne les mesures de masse volumique et de mesures de cinétique d'absorption d'eau sur les granulats de béton recyclé.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Projet National RECYBETON. Nous travaillons donc avec les granulats, gravillons et sable, fournis pour l'étude. Nous cherchons à évaluer d'une part l'applicabilité de la norme actuelle à l'étude des granulats recyclés et d'autre part à quantifier leur cinétique d'absorption sur les 10 premières minutes et sur la durée d'un mois. Nous proposons par ailleurs une méthode alternative de mesure de l'absorption d'eau des sables recyclés dont la répétabilité est aussi évaluée.

2.1 Problématique – objectifs de l'étude

Les granulats recyclés peuvent présenter des caractéristiques un peu moins bonnes que les granulats naturels en termes de porosité, friabilité et variabilité. Il semble donc essentiel, pour pouvoir les utiliser, de déterminer avec précision leur masse volumique et coefficient d'absorption d'eau à 24h. Par ailleurs, l'absorption d'eau n'étant pas instantanée, il est également important d'estimer une cinétique d'absorption pour les granulats recyclés.

Il n'existe à ce jour aucune norme spécifique pour la mesure d'absorption d'eau des granulats recyclés, et la norme EN 1097-6 [1], qui décrit le protocole de mesure de masse volumique des granulats naturels, peut présenter quelques problèmes lorsqu'on cherche à l'appliquer aux granulats recyclés. En effet, elle ne tient compte ni de la possible influence des fines, ni de la difficulté de détermination de l'état dit « saturé surface sèche ». Non seulement cet état est assez difficile à estimer, mais les granulats recyclés étant plutôt friables, l'action mécanique d'un chiffon entraîne la

perte de fragments difficilement récupérables. Concernant le sable, la norme EN NF 1097-6 prévoit un protocole expérimental présentant quelques difficultés d'application dans la pratique. Cette étape entraîne fréquemment une perte non négligeable de la prise d'essai et compromet la fiabilité des résultats. De plus, la norme considère « l'état saturé surface sèche » atteint lorsqu'il y a affaissement du cône de sable par glissement des grains lorsque le moule est soulevé. Or, la forme anguleuse du sable et la présence de fines induisent une « cohésion » supplémentaire qui s'oppose au glissement du sable même lorsque la surface est sèche. Ceci peut entraîner une sous-estimation du coefficient d'absorption pour les sables riches en fines [ZHA 14]. La cinétique d'absorption des granulats recyclés n'a été que très rarement évaluée, cependant Tam et al. [TAM 08] ainsi que Djerbi et al. [DJE 12] ont proposé une adaptation du protocole expérimental plus adapté aux gravillons recyclés mais aucune procédure n'a été validée sur les sables recyclés. Il n'y a pas non plus dans la littérature de résultats concernant les cinq premières minutes de l'absorption.

2.2 Démarche expérimentale

Nous avons choisi de réaliser les mesures de masse volumique et coefficient d'absorption à 24h en suivant la méthode au pycnomètre décrite dans la norme EN 1097-6. Le séchage est effectué à l'aide d'un tissu absorbant pour les gravillons et selon la méthode du cône pour le sable. Cette dernière a été comparée avec une technique de séchage sur entonnoir Büchner inspirée de la norme allemande DIN V 18004 [2] pour les sables légers.

Des essais ont été menés sur plusieurs lots différents, obtenus par quartage de 75 kg de granulats, selon la norme NF EN 932-2 [3]. La répétabilité a été testée sur un même lot, trois fois de suite. La porosité des granulats recyclés étant liée à la fraction volumique de pâte, elle peut donc varier selon la classe granulaire des granulats recyclés, nous réalisons la mesure en distinguant les coupures granulaires suivantes : 0/4 – 0,063/4 – 4/10 – 10/20.

Tableau 2-1. Récapitulatif des essais réalisés

	Gravillons [4-10] et [10-20]	Sable [0-4] et [0,063-4]
masse volumique	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6 / méthode séchage sur entonnoir Büchner
coefficient d'absorption	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6 / méthode séchage sur entonnoir Büchner
cinétique d'absorption	méthode au pycnomètre norme EN 1097-6 / méthode norme granulats légers	méthode séchage sur entonnoir Büchner

2.3 Essais sur gravillons

2.3.1 Masse volumique réelle, norme EN 1097-6

Le mode opératoire retenu pour réaliser de telles mesures est la mesure au pycnomètre, décrite dans la norme EN 1097-6 :

- Dans un premier temps, le pycnomètre est rempli entièrement d'eau jusqu'au trait de jauge, et le tout est pesé avec précision, on obtient la masse **M3**
- Les granulats sont introduits dans le pycnomètre, que l'on remplit à nouveau d'eau jusqu'au trait de jauge. Le système est alors pesé avec précision → **M2**
- Les granulats sont ensuite soigneusement séchés à l'aide d'un linge propre, de manière à obtenir des granulats saturés, surface sèche. (La norme précise qu'ils doivent être séchés jusqu'à perdre leur aspect brillant). Ils sont alors pesés et l'on obtient la masse **M1**
- Chaque prise d'essai est ensuite placée à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante, masse que l'on nommera **M4**.

La masse volumique réelle est ensuite donnée par la formule suivante :

$$\rho_{rd} = \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)} * \rho_w$$

La masse volumique réelle saturée surface sèche est calculée grâce à la formule suivante :

$$\rho_{ssd} = \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)} * \rho_w$$

ρ_w étant la masse volumique de l'eau à la température de l'essai exprimée en kilogramme par mètre cube.

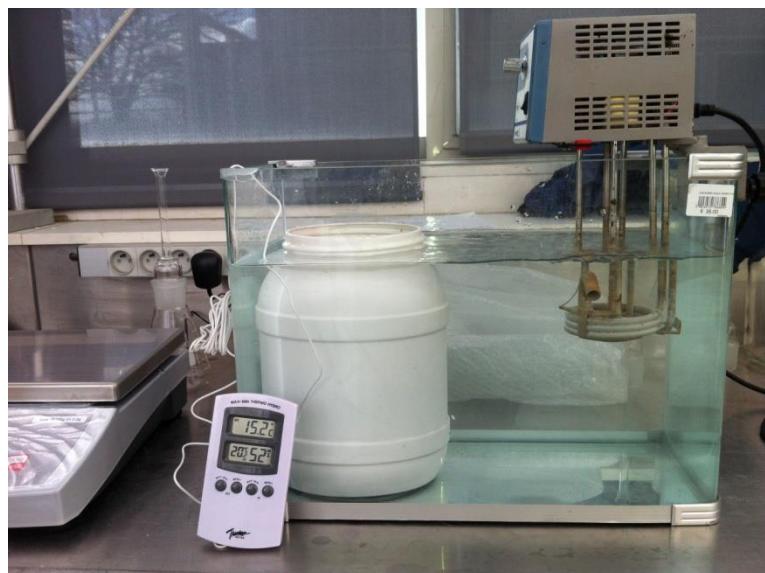


Figure 2-1. Photographie du bain thermostaté

Avant l'essai, les granulats sont pré-séchés à l'étuve à 105°C, et ce jusqu'à masse constante.

Les granulats sont alors immergés dans l'eau pendant 24h à 20 +/- 1°C jusqu'à conduction de l'essai (Figure 2-1).

Après 24h, une prise d'essai représentative est placée dans un pycnomètre, et le tout est pesé afin de mesurer avec exactitude la masse volumique de l'échantillon (Figure 2-2).

La suite de la manipulation se fait dans les conditions de la norme, citées plus haut.

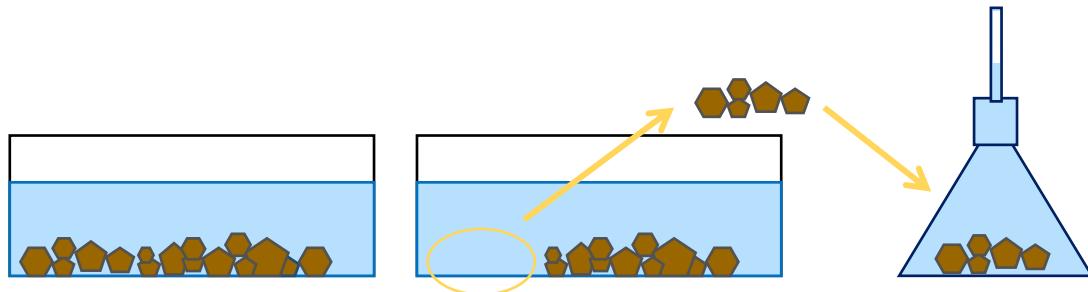


Figure 2-2. Schéma explicatif, méthode de mesure de masse volumique selon la norme EN 1097-6

Afin de tester la répétabilité de la mesure, une même prise d'essai a été testée trois fois de suite dans les mêmes conditions, pour chaque granulométrie (Tableau 2-2).

Tableau 2-2. Récapitulatif des mesures de masses volumiques ρ_{rd} obtenues avec la méthode normée pour une prise d'essai unique

Granulométrie	nb d'essais	ρ_{rd} (g.L ⁻¹)	écart type (g.L ⁻¹)	écart type relatif (%)
[4-10]	3	2,27	0,003	0,13
[10-20]	3	2,24	0,006	0,27
[4-20]	3	2,22	0,004	0,18

Par la suite, 5 prises d'essais différentes pour chaque coupure granulaire ont été testées. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2-3 ci-dessous.

Tableau 2-3. Récapitulatif des mesures de masse volumique ρ_{rd} obtenues avec la méthode normée

Granulométrie	nb d'essais	ρ_{rd} (g.L ⁻¹)	écart type (g.L ⁻¹)	écart type relatif (%)
[4-10]	5	2,26	0,03	1,33
[10-20]	5	2,24	0,01	0,45
[4-20]	5	2,24	0,05	2,25

On constate qu'avec une prise d'essai unique, l'écart type est bon, mais que lorsqu'on étudie des prises d'essai différentes, la mesure perd en précision, due à l'hétérogénéité des prises d'essai prélevées. On observe une légère influence de la granulométrie, mais la différence reste très modeste (dans l'écart type).

2.3.2 *Coefficient d'absorption à 24 H*

L'essai de mesure de masse volumique selon la norme EN 1097-6 permet de déterminer par calcul, et donc sans manipulation supplémentaire, le coefficient d'absorption des granulats étudiés.

De la même manière que précédemment, on a pu évaluer la répétabilité de la mesure en testant la même prise d'essai 3 fois de suite (Tableau 2-4) :

Tableau 2-4. Récapitulatif des mesures de coefficient d'absorption d'eau avec la méthode normée pour une prise d'essai unique

Granulométrie	nb d'essais	WA 24 (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
[4-10]	3	6,16	0,26	4,22
[10-20]	3	5,83	0,10	1,72
[4-20]	3	6,69	0,12	1,79

Par la suite, 5 prises d'essais différentes pour chaque coupure granulaire ont été testées. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2-5 ci-dessous.

Tableau 2-5. Récapitulatif des mesures de coefficient d'absorption d'eaux avec la méthode normée

Granulométrie	nb d'essais	WA 24 (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
[4-10]	5	6,16	0,70	11,36
[10-20]	5	5,84	0,55	9,42
[4-20]	5	6,49	1,26	19,41

Les mesures de répétabilité présentent un écart type correct, mais un peu plus élevé pour la fraction [0-4]

Concernant les mesures réalisées sur différents lots, on constate ici aussi un écart type très élevé dû à une hétérogénéité des prises d'essais, mais également à une manipulation trop importante des granulats notamment lors de l'étape de séchage. Les granulats de petit diamètre sont les plus affectés, car dans leur cas, une quantité de matière plus importante est perdue lors de l'étape de séchage.

On observe une très légère influence de la granulométrie sur les valeurs d'absorption, mais ici encore, cette différence entre dans l'écart type et pourrait être attribuée au manque de précision de la mesure.

2.3.3 Répétabilité hétérogénéité du lot

Les essais de répétabilité donnent un faible écart type relatif pour les mesures de masse volumique ($<0,3\%$), mais beaucoup plus important pour les mesures de coefficient d'absorption d'eau ($>5\%$).

Les résultats sont particulièrement variables pour les plus petites fractions granulaires, plus friables que les [10-20].

On constate en revanche que lorsque les mesures sont réalisées sur des prises d'essai différentes, l'écart type augmente considérablement. Il est de plus de 2.3 % pour les mesures de masse volumique, et supérieur à 10 % pour les mesures de coefficients d'absorption d'eau. Ces écarts sont essentiellement dus à l'hétérogénéité des prises d'essais, et ici la fraction granulaire n'a pas d'influence significative.

2.4 Essais sur sable recyclé

La norme EN NF 1097-6 prévoit pour le sable un protocole expérimental présentant quelques difficultés d'application dans la pratique. En effet l'étape de séchage des granulats est prévue à l'aide d'un « faible courant d'air chaud » qui, s'il est efficace quand le sable est encore très mouillé, se révèle beaucoup plus délicat quand on s'approche de l'état saturé surface sèche. Cette étape entraîne fréquemment une perte significative de la prise d'essai et met en péril la fiabilité des résultats.

Nous avons donc décidé de comparer le protocole de la norme avec une technique de séchage sur entonnoir Büchner. Les procédures d'essai des deux protocoles sont décrites puis les résultats et la représentativité des valeurs obtenues par les deux procédés sont comparés. Enfin, l'influence des fines [0-0,063] sur les résultats est étudiée.

2.4.1 Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche selon la norme EN 1097-6

La norme préconise pour le sable un essai au pycnomètre, qui se différencie de celui appliqué pour les gravillons par un protocole de séchage différent. En effet dans le cas des granulats [0,063-4], une fois la mesure au pycnomètre réalisée, celui-ci est vidé sur un plateau. La prise d'essai imbibée doit être étalée de manière à obtenir une couche régulière au fond du plateau. Le sable est alors exposé à un courant d'air chaud afin d'évaporer l'humidité en surface. Pour s'assurer que l'état saturé surface sèche est atteint, on utilise la technique du moule tronconique et du pilon.

La norme ne considère pas la fraction [0-0,063] qui doit être préalablement retirée de l'échantillon. Pour cette étude, nous avons cependant choisi de conserver cette fraction. Les difficultés de mise en œuvre de cette procédure pour les sables légers sont notamment liées à la perte des fines lors du

séchage des grains sous courant d'air chaud, mais également au contrôle de l'énergie de compactage de l'échantillon dans le moule tronconique. Selon la norme EN 1097-6, cette procédure n'est pas applicable aux sables légers dont la problématique peut être comparable à celle des sables recyclés.

2.4.2 Séchage jusqu'à l'état saturé surface sèche sur dispositif Büchner

Cette méthode consiste à verser le contenu du pycnomètre (sable + eau) dans un entonnoir Büchner de 170mm fixé sur une fiole reliée à une pompe à membrane. Un papier filtre saturé est placé sur le fond de l'entonnoir (Figure 2-3). L'activation de la pompe entraîne l'élimination de l'eau vers la fiole, et approche le sable de l'état saturé surface sèche. Cet état est généralement atteint après 10 minutes de pompage à un débit de 12 L.min⁻¹ (Figure 2-34).

Afin de s'assurer de l'état d'humidité du sable, on réalise le test préconisé dans la norme, à l'aide du moule tronconique et du pilon.

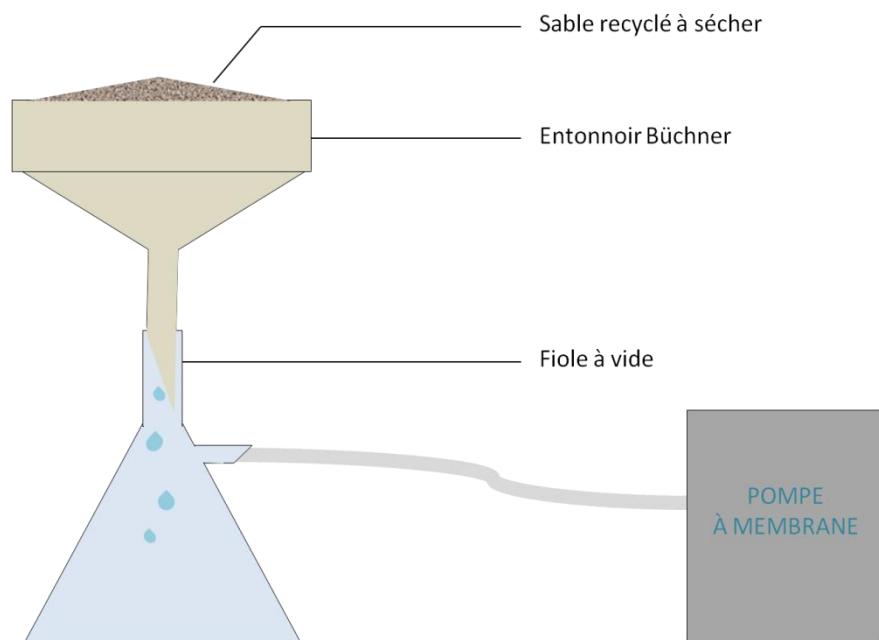


Figure 2-3. Schéma du montage expérimental de séchage sur Büchner

L'appréciation de l'état saturé surface sèche reste aussi subjectif que dans la méthode de la norme, mais on s'affranchit ici de toute perte de matière due au courant d'air chaud ou à l'utilisation d'un papier absorbant.

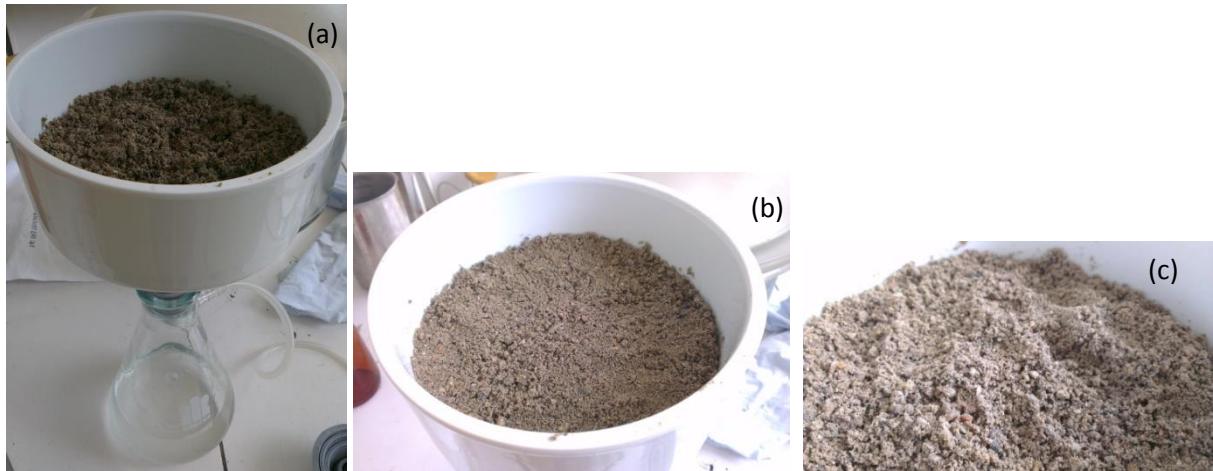


Figure 2-4. Photographies montrant l'évolution de l'état hydrique du sable a : au démarrage du pompage, b : après 5 minutes de pompage, c : après 10 minutes de pompage.

2.4.3 Comparaison des deux méthodes de séchage de sable

Le tableau 2-6 présente les valeurs d'absorption et de masse volumique obtenues sur trois échantillons de fraction [0-4].

Tableau 2-6. Comparaison des valeurs de masse volumique et coefficient d'absorption d'eau obtenues pour le sable recyclé avec la méthode normée et la méthode Büchner

méthode	nb d'essais	Masse vol. (kg/L)	Coeff abs (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
norme	3	2.17	7.8	0.72	9.23
Büchner	3	2.07	12.75	0.35	2.75

La méthode de séchage sur entonnoir Büchner entraîne très clairement une dispersion des résultats plus faible que dans le cas de la méthode préconisée par la norme pour le sable naturel. On note également des résultats d'absorption très différents selon la méthode utilisée : les valeurs obtenues par la méthode normée sont bien inférieures à celles issues de l'essai Büchner. La forme anguleuse du sable et la présence de fines induisent une cohésion supplémentaire qui s'oppose au glissement du sable, même lorsque la surface est sèche. Ceci semble entraîner une sous-estimation du coefficient d'absorption, d'autant plus importante que le sable est riche en fines, par un séchage excessif du sable.

En ce qui concerne le dispositif Büchner, une surestimation de l'absorption pourrait éventuellement s'expliquer par de fortes tensions superficielles à la surface des fines, supérieures à la dépression appliquée par la pompe. Des essais d'ouvrabilité de mortiers sont menés et décrits au paragraphe 6 afin d'analyser la validité des valeurs obtenues.

2.4.4 Comparaison des résultats avec et sans fines (méthode Büchner)

Les mesures effectuées avec et sans la fraction fine [0-0,063] avec la méthode Büchner (Tableau 2-7) montrent une augmentation du coefficient d'absorption de plus d'1 % en présence de la fraction fine. Une surestimation de l'absorption pourrait éventuellement s'expliquer par de fortes tensions superficielles à la surface des fines, supérieures à la dépression appliquée par la pompe.

Tableau 2-7. Comparaison des valeurs de masse volumique et coefficient d'absorption d'eau obtenues pour le sable recyclé avec et sans fines

fines	nb d'essais	Masse vol. (kg/L)	Coeff abs (%)	écart type (%)	écart type relatif (%)
sans	3	2.07	11.24	0.31	2.76
avec	3	2.07	12.75	0.35	2.75

2.5 Cinétique d'absorption

On cherche à déterminer la cinétique d'absorption des granulats afin d'évaluer en combien de temps la majeure partie de l'absorption se fait, soit le temps que les granulats mettront à atteindre leur état « inerte » vis-à-vis de l'eau du milieu.

La cinétique a été évaluée dans un premier temps à court terme, sur les dix premières minutes, avec une mesure réalisée toutes les minutes. Nous avons ensuite effectué une mesure de cinétique à long terme, sur 30 jours.

Nous comparerons ici deux méthodes expérimentales : la méthode décrite par la norme NF EN 1097-6 pour les granulats naturels, et la méthode adaptée aux granulats légers, qui peut sembler plus pertinente dans le cas des granulats recyclés. L'état saturé surface sèche est obtenu pour les gravillons selon le procédé de la norme et avec le dispositif Büchner pour les sables.

2.5.1 Description des protocoles expérimentaux

2.5.1.1 Méthode norme EN 1097-6 (granulats naturels)

La norme prévoit le protocole expérimental suivant :

1. A $t = 0$, les granulats sont immergés dans un bain thermostaté à $20 \pm 1^\circ\text{C}$
2. A $t = \text{temps choisi pour la première mesure}$, une prise d'essai représentative est retirée du bain thermostaté et testée à la méthode du pycnomètre
3. La prise d'essai testée est séchée selon la norme, afin de mesurer sa masse saturée surface sèche, puis mise à l'étuve jusqu'à masse constante afin d'obtenir la masse sèche
4. Les étapes 2 et 3 sont répétées autant de fois que le nombre de points désirés, et avec autant de prises d'essai différentes.

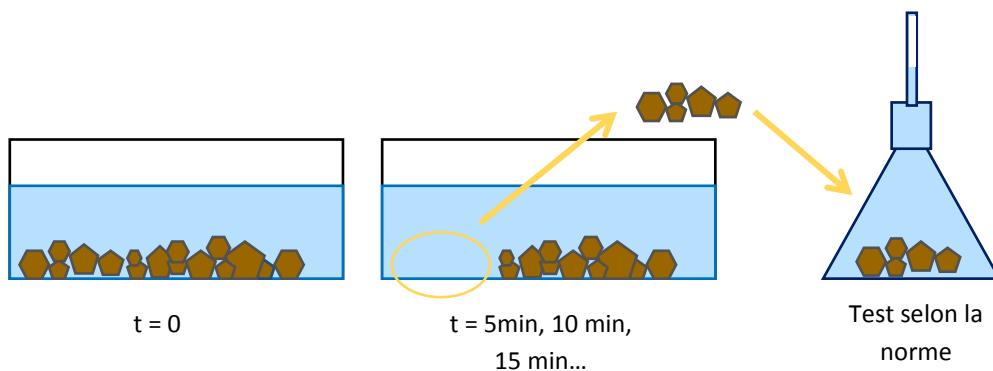


Figure 2-5. Schéma explicatif de la méthode de mesure de cinétique selon la norme EN 1097-6

Pour chaque granulométrie d'étude, dix cinétiques d'absorption ont été réalisées. Cependant, l'hétérogénéité des prises d'essai entraîne une dispersion des résultats trop importante pour permettre une exploitation satisfaisante des résultats.

2.5.1.2 Méthode norme EN 1097-6 (granulats légers)

Cette méthode alternative, qui s'approche de celle décrite dans la norme NF EN 1097-6, granulats légers, annexe C, consiste à pré-sécher les granulats à l'étuve, à les insérer dans le pycnomètre. A $t=0$, l'eau est ajoutée au pycnomètre, qui est complété jusqu'au trait de jauge à la première échéance, soit une minute. Le niveau de l'eau sera alors réajusté jusqu'au trait à chaque temps t de mesure choisi. L'étape de séchage et l'erreur qu'elle entraîne sont alors minimisées puisque réalisées une seule fois, au lieu de une fois par temps de mesure comme le préconise la norme.

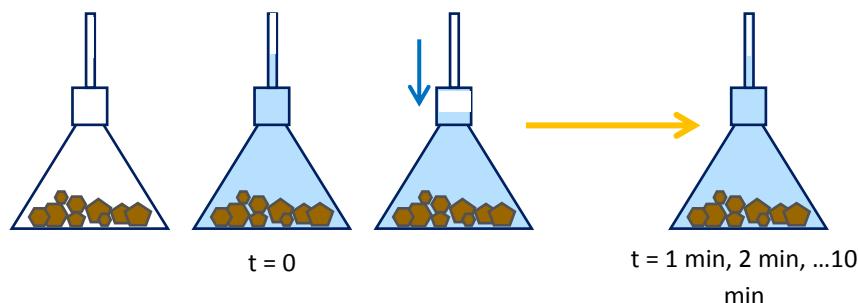


Figure 2-6. Schéma explicatif de la méthode de mesure de cinétique décrite par Tam et al. [2]

Le calcul du coefficient d'absorption d'eau à chaque t donné est le suivant :

$$WAi = WAf - \frac{(Mf - Mi)}{m \text{ (prise d'essai sèche)}} * 100$$

- Mf = masse pycnomètre + masse granulats + eau finale
- Mi = masse pycnomètre + masse granulat + eau à $t = ti$

- WAf = coefficient d'absorption mesuré à la dernière échéance

L'intérêt principal de cette méthode sur la première est le fait que l'on utilise une unique prise d'essai pour les différents temps testés. On s'affranchit donc de la variabilité induite par l'hétérogénéité des lots de granulats prélevés.

2.5.2 Cinétique d'absorption d'eau sur gravillons

2.5.2.1 Résultat de la cinétique à court terme

Les résultats obtenus sont résumés dans la Figure 2-7.

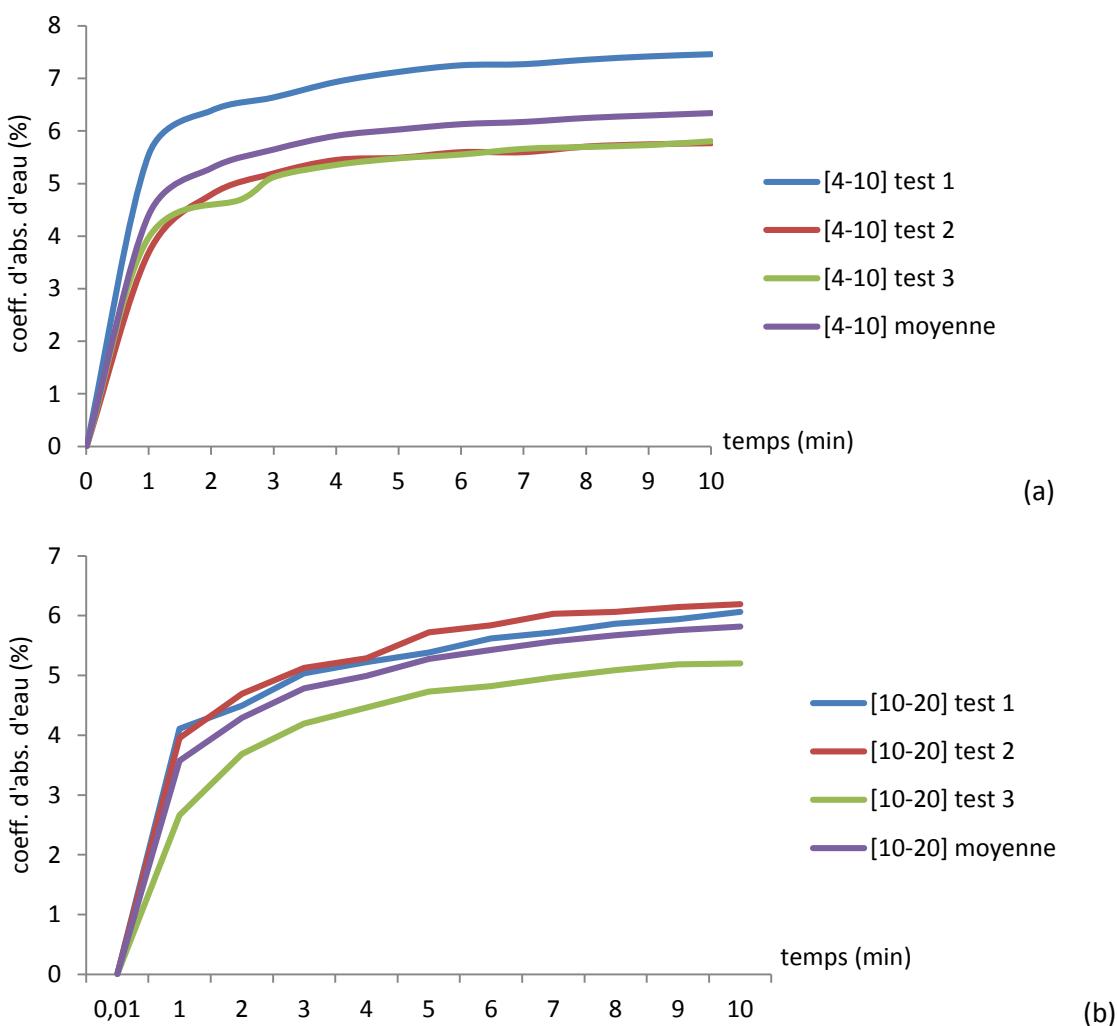


Figure 2-7. Cinétique d'absorption des granulats recyclés de granulométrie (a) [4-10] et (b) [10-20] sur 10 minutes

Au bout de 10 min, 92 % de la valeur d'absorption à 24 h est atteinte. Au bout de 5 minutes, soit environ la durée du malaxage, elle n'est atteinte qu'à 85 % seulement. L'ajout lors du malaxage de l'eau correspondant à l'absorption à 24h peut ainsi conduire à une plus grande ouvrabilité que celle souhaitée.

2.2.1.1 Résultat de la cinétique à long terme

L'absorption ne semblant pas être terminée dans les dix premières minutes, des essais à long terme ont été réalisés sur les trente premières minutes, puis après une heure, deux heures, un jour, deux jours, une semaine et un mois (Figure 2-8)

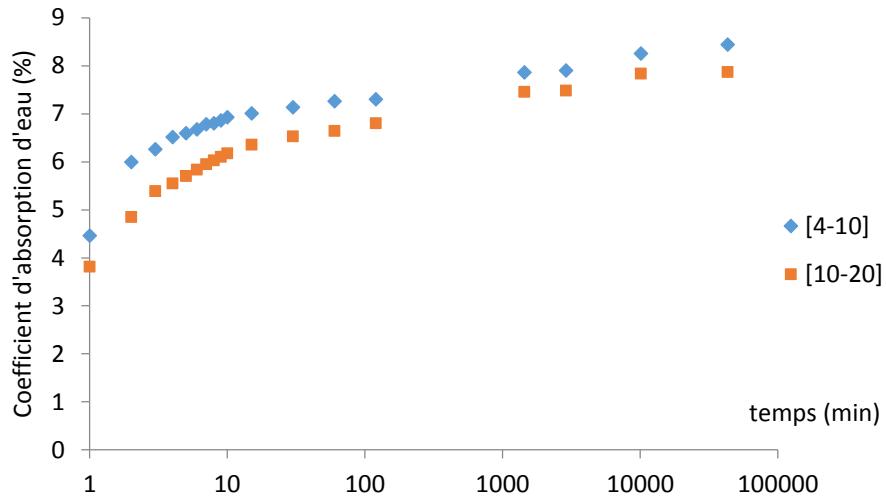


Figure 2-8. Cinétique d'absorption des granulats recyclés de granulométrie [4-10] et [10-20] sur un mois

Si la majeure partie de l'absorption se fait dans les quelques premières minutes, on constate ici qu'après plus d'un mois elle se poursuit encore légèrement. Cette propriété est à prendre en compte notamment lorsque les granulats sont stockés à l'extérieur et donc exposés à l'humidité. La prise en compte de WA24 pour le calcul de l'eau d'apport des granulats lors de la formulation des bétons peut alors conduire à une trop forte correction en eau, et à une moins bonne maniabilité que celle attendue.

2.5.3 Cinétique d'absorption d'eau du sable recyclé

La cinétique d'absorption a été réalisée dans les conditions décrites précédemment pour les gravillons. Le séchage en revanche se fait selon le protocole Büchner décrit plus haut.

Les résultats obtenus sont résumés dans la Figure 2-9 suivante :

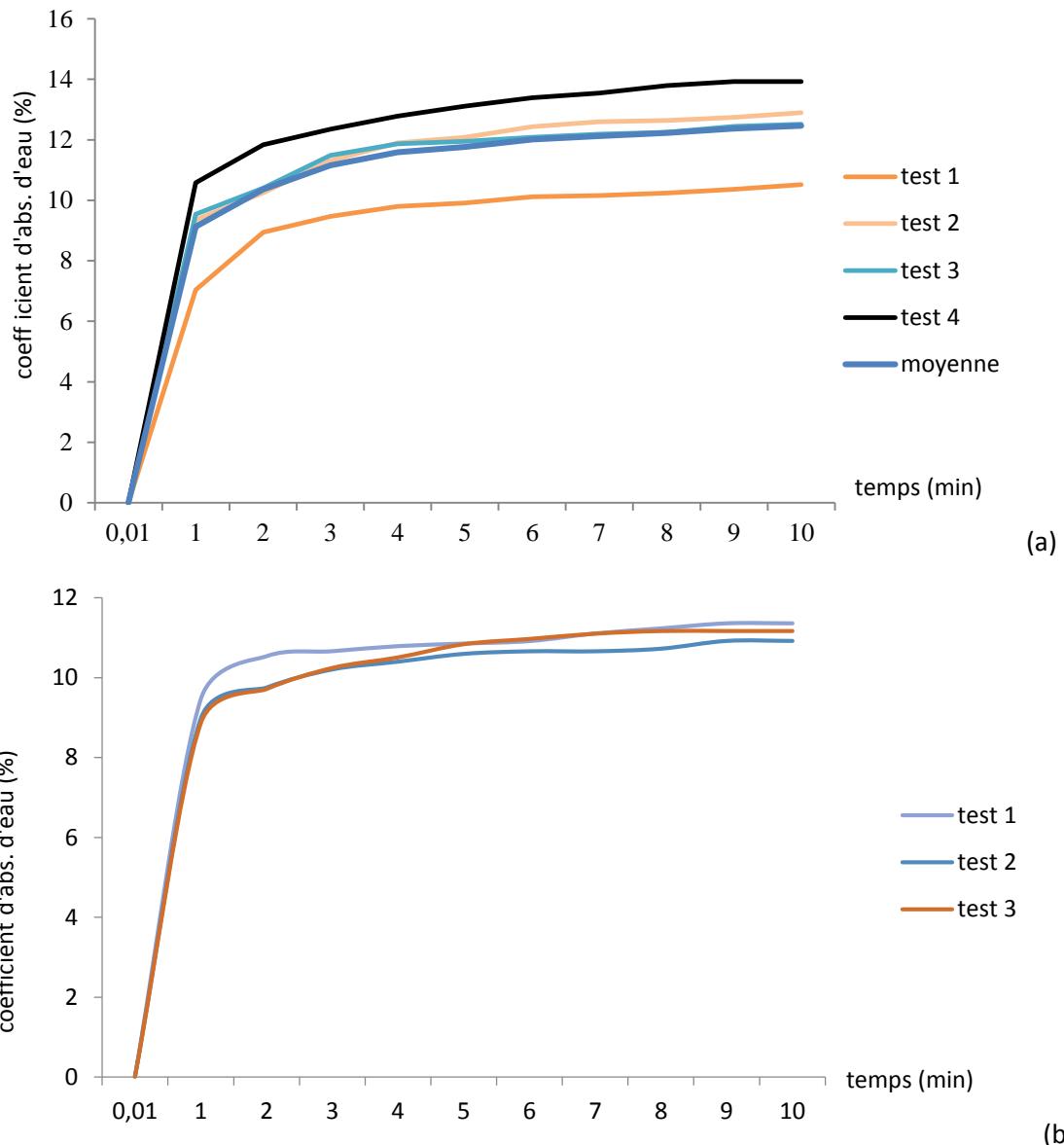


Figure 2-9. Cinétique d'absorption du sable recyclé (a) avec fines et (b) sans fines sur 10 minutes

On constate qu'en moyenne, l'absorption d'eau à 10 minutes est légèrement inférieure à 12 % sans fines, et légèrement supérieure à 12 % en présence de fines, soit égale à la valeur d'absorption à 24 h obtenue précédemment. La présence de fines entraîne une plus grande variabilité entre les différents essais. Sans fines au contraire, on observe une très bonne précision de l'essai, même avec des prises d'essais différentes.

De la même manière que pour les gravillons, des essais de répétabilité sur une même prise d'essai ont été réalisés. Les résultats obtenus sont résumés dans la Figure 2-10 ci-après :

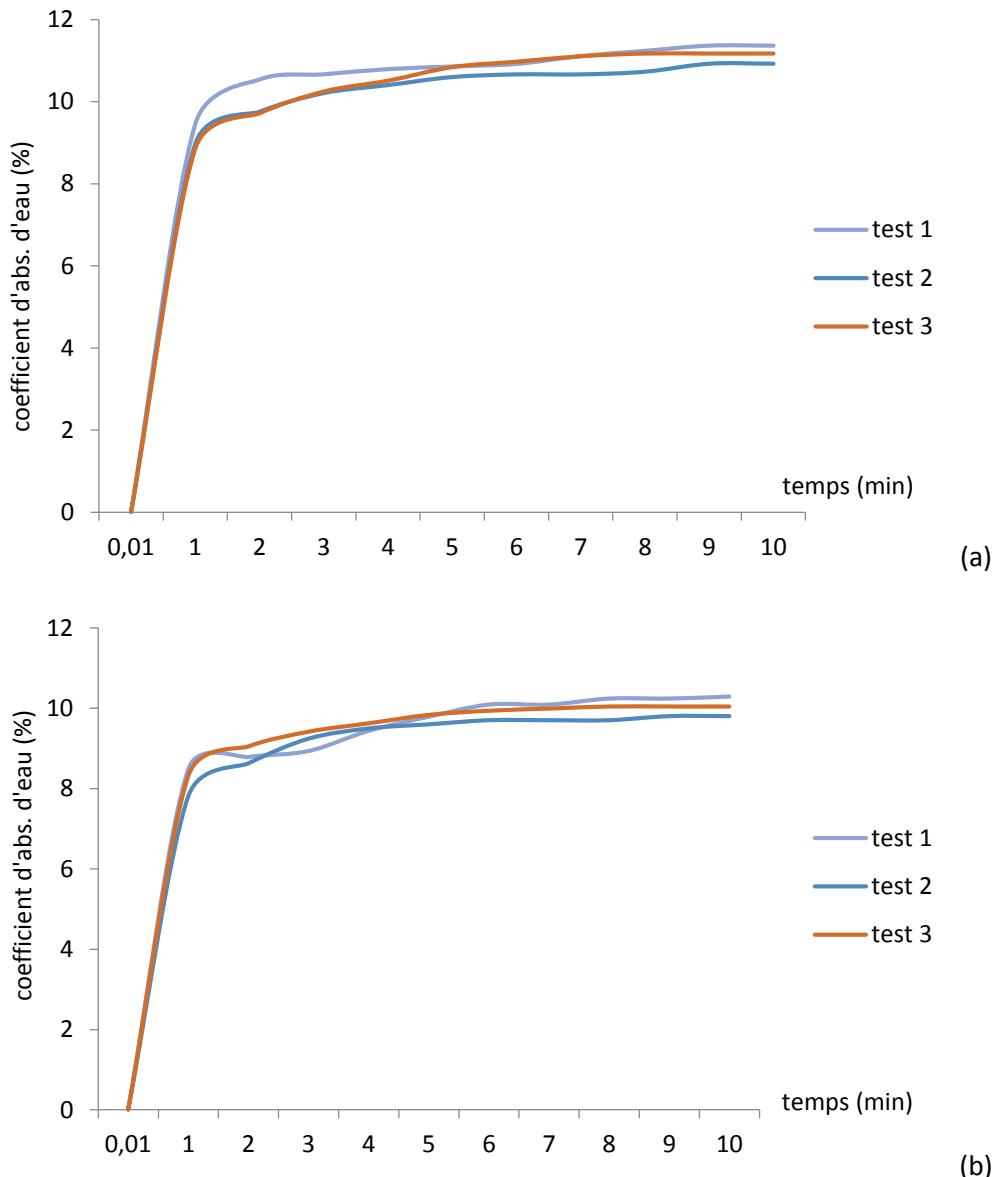


Figure 2-10. Répétabilité des mesures de cinétique d'absorption du sable recyclé (a) avec fines et (b) sans fines sur 10 minutes

Lorsqu'on s'affranchit de la variabilité entre les différents échantillons, on observe une très bonne répétabilité de l'essai, avec ou sans fines. Ceci est lié au dispositif de séchage Büchner utilisé pour les sables. Les différents résultats obtenus indiquent que la méthode décrite dans la norme pour les granulats légers est plus adaptée à la mesure de la cinétique d'absorption des granulats de béton recyclé.

Dans le cas du sable, on observe une meilleure fiabilité des résultats avec la méthode de séchage sur entonnoir Büchner (l'écart type du coefficient d'absorption est inférieur à 3 %), et l'essai est très répétable.

La présence de fines induit toutefois une plus grande variabilité et un coefficient d'absorption plus élevé.

2.6 Etude de l'ouvrabilité des mortiers

Afin de valider les résultats obtenus, nous réalisons des essais rhéologiques sur mortiers de sable recyclé. Ceux-ci seront comparés à des mortiers réalisés dans les mêmes conditions avec du sable normalisé dont on connaît l'absorption.

Deux méthodes de pré-saturation du sable seront testées et comparées :

- Immersion du sable pendant 24h
- Ajout de la quantité exacte d'eau d'absorption 24 h avant l'essai

Dans les deux cas, le sable est pré-séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante.

La formulation de mortier choisie est la suivante :

Ciment = 450 g

Sable = 1350 g (normalisé) ou 1057 g (sable recyclé) afin de rester à volume de sable constant

E/C = 0.7 soit Eau efficace = 315 mL

La valeur d'absorption utilisée pour le sable recyclé est celle mesurée sur entonnoir Büchner à 24 h (12%). Pour le sable normalisé, l'absorption est le 0,2 %.

On évaluera la maniabilité du mortier au mini cône, ainsi que son maintien sur 90 min. L'étalement est mesuré à $t=0$, puis toutes les trente minutes pendant 90 minutes. Le mortier est malaxé à nouveau pendant 1 minute à grande vitesse avant chaque mesure.

2.6.1 Méthode 1 – immersion 24 H

Les sables, recyclé et normalisé, sont placés dans des bacs, et totalement recouverts d'eau. Ils sont laissés ainsi durant 24h, puis égouttés sur tamis à travers des tissus absorbants. Leur teneur en eau totale est alors mesurée, valeur à laquelle est soustraite la valeur d'absorption, afin d'obtenir la teneur en eau de surface, utile pour l'hydratation et la maniabilité.

$$\text{eau de surface} = \text{eau totale} - WA24$$

2.6.2 Méthode 2 – ajout de la quantité d'eau d'absorption

Les sables, recyclé et normalisé, sont pesés puis placés dans des bidons étanches. Une quantité d'eau correspondant au coefficient d'absorption à 24h est ajoutée aux bidons. Ceux-ci sont fermés de façon étanche, puis roulés sur eux-mêmes durant une dizaine de minutes. Ils sont conservés pendant 24 h en position horizontale avant le gâchage.

Le sable est utilisé tel quel, aucune mesure d'eau de surface n'est effectuée avant l'essai. L'eau ajoutée est l'eau efficace imposée par la formulation.

L'essai de maniabilité est réalisé au mini-cône (Figure 2-11). Après une étape de malaxage précisément définie, le mortier recyclé est inséré dans un mini-cône posé à la surface d'une table parfaitement plane. Le mini cône est alors soulevé de façon orthogonale à la table et au moins deux rayons du monticule de mortier affaissé sont précisément mesurés.



Figure 2-11. Essai au mini-cône

Les résultats résumés dans la Figure 2-12 sont les valeurs moyennes obtenues sur 3 mesures (écart type sur la courbe).

On constate en premier lieu sur le graphique (a), que la valeur d'absorption du sable recyclé mesurée par entonnoir Büchner n'a pas été surestimée, puisque les étalements obtenus ne sont pas plus élevés (inférieurs à 3cm) que ceux des sables normalisés dont on connaît précisément l'absorption. Les deux étalements ne peuvent toutefois être totalement comparables puisque les courbes granulométriques des deux sables diffèrent. Le graphique (b) indique que la méthode d'immersion est certainement la plus efficace pour saturer le sable en eau, étant donné que le maintien est meilleur dans ce cas-là. On peut supposer que lorsqu'on emploie la méthode qui consiste à ajouter la quantité exacte d'eau d'absorption, celle-ci ne pénètre pas complètement dans les pores du sable, et continue d'être absorbée pendant le malaxage. Ceci expliquerait la perte de maniabilité plus rapide observée pour les deux types de sable.

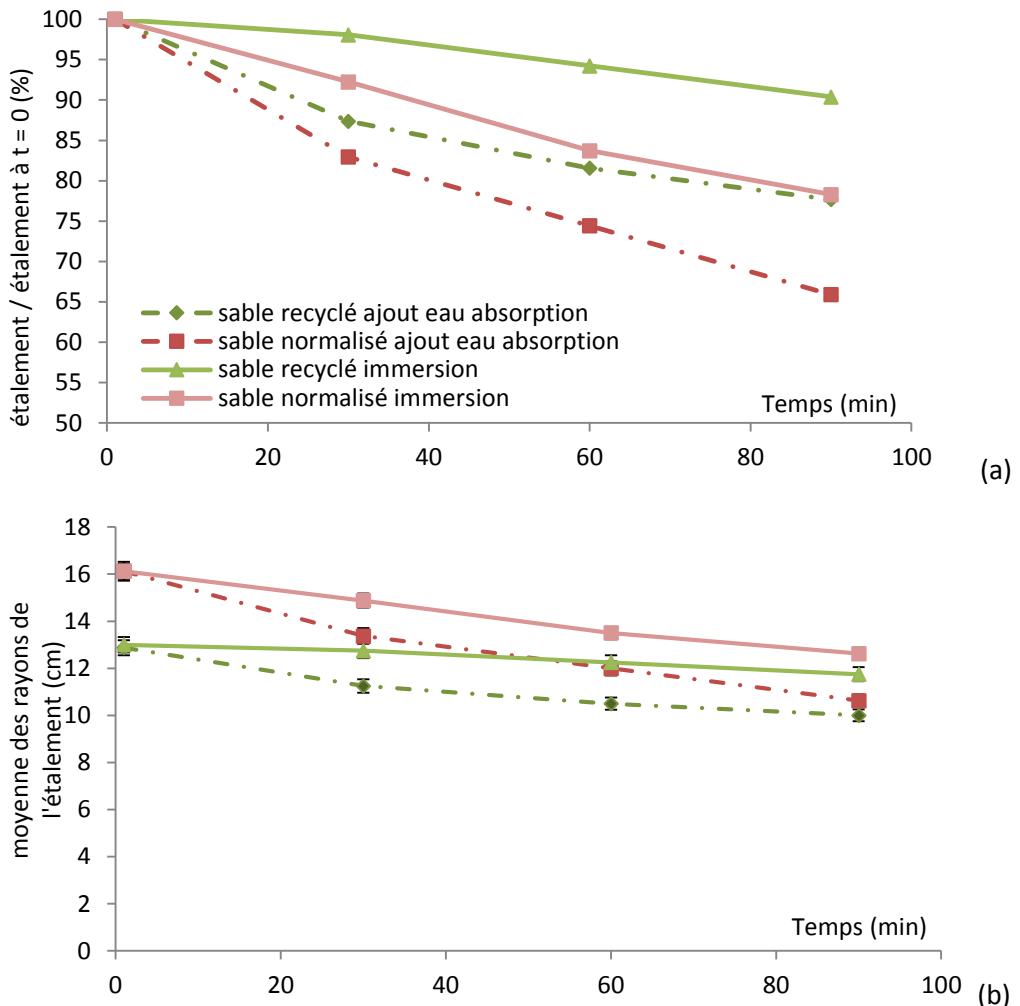


Figure 2-12. Évolution de la maniabilité des mortiers de sable recyclé et normalisé (a) en valeurs absolues et (b) en valeur relatives par rapport à l'étalement initial

2.7 Conclusion sur l'évaluation des méthodes de caractérisation des propriétés physiques

Les différents essais réalisés montrent, dans le cas des gravillons recyclés, une bonne répétabilité des mesures de masse volumique et de coefficient d'absorption lorsqu'on suit la norme pour les granulats naturels. Ils ont aussi confirmé le peu d'influence de la classe granulaire (4/10 ou 10/20) sur les valeurs d'absorption. L'étude du sable recyclé présente plus de points délicats, et une variabilité importante des résultats est observée selon la méthode employée. La présence ou non de fines, ainsi que la méthode de détermination de l'état saturé surface sèche ont une influence non négligeable sur la valeur d'absorption finale.

Les mesures de cinétique ont indiqué une plus grande fiabilité des résultats avec l'adaptation de la méthode destinée aux granulats légers. On retiendra que 80 % de la valeur d'absorption à 24 h est atteinte dans les cinq premières minutes, mais que celle-ci continue encore pendant plusieurs semaines. Les valeurs d'absorption des sables obtenues avec un séchage sur entonnoir Buchner sont plus élevées que celles obtenues par la méthode de la norme. Enfin, les résultats des essais de maniabilité sur mortiers basés sur la valeur Buchner n'ont pas montré de « sur-fluidité » par rapport

à un mortier de sable dont l'absorption est connue. La valeur « Buchner » semblerait donc donner une estimation réaliste de l'eau « prisonnière » du sable pendant le malaxage. L'étude sur l'ouvrabilité a par ailleurs montré que l'immersion du sable pendant 24 h avant son utilisation permet un meilleur maintien de la maniabilité.

En se basant sur les résultats de l'étude du PN RECYBTON, nous choisirons dans la suite de l'étude de caractériser les propriétés physiques des gravillons selon la méthode du pycnomètre adaptée de l'annexe C de la norme EN 1097-6 pour les granulats légers.

Les résultats de cinétiques nous indiquent que l'absorption se fait majoritairement dans les 5 premières minutes, mais qu'elle continue ensuite encore légèrement. On choisira pour la confection de nos bétons d'utiliser des granulats saturés à l'eau pendant 24 h, afin d'éviter une reprise en eau trop importante pendant le malaxage. Suite aux résultats des essais sur mortiers, nous choisissons de procéder à une saturation des granulats par immersion.

3. Origine des granulats

3.1 Les granulats recyclés de laboratoire (GRL)

Le premier type de granulat recyclé étudié est un granulat que nous appellerons « de laboratoire » (Figure 2-13). Il a été obtenu à partir d'un béton dit « parent » qui a été formulé et coulé au laboratoire, et dont nous maîtrisons parfaitement la composition. Il s'agit d'un béton ordinaire ($E/C = 0,6$), formulé à partir de granulats naturels silico-calcaires (nomenclature dans le reste du manuscrit : BSC 0.6) la formulation de ce béton est présentée dans le tableau 3.3.



Figure 2-13. Granulats Recyclés de Laboratoire (GRL)

Nous avons calculé qu'il nous fallait environ 325 L de béton pour obtenir la quantité de granulats nécessaire à l'élaboration des bétons recyclés, compte tenu des essais prévus. Nous avons évalué 40 % de pertes lors du concassage. Cette marge de sécurité suffisante mène à la fabrication de 520 L de béton naturel. Ce béton a été conservé pendant au moins 90 jours dans des sacs étanches, puis concassé une première fois à l'aide d'une presse hydraulique afin d'obtenir des morceaux de 10 cm maximum de diamètre, et une seconde fois à l'aide d'un concasseur de laboratoire à mâchoires. Nous avons visé la granulométrie [4-20]. La courbe granulaire des granulats ainsi obtenus est représentée Figure 2-17.

3.2 Les granulats recyclés industriels (GRI)

Nous avons fait le choix de comparer les granulats recyclés de laboratoire, avec de vrais granulats issus de déchets de démolition. Ces granulats ont été obtenus et concassés par la plateforme de recyclage *Picheta* installée à Pierrelaye (95) (Figure 2-14), et proviennent initialement de la démolition de la cité des 4000, sur la commune de la Courneuve (93). Une coupure granulaire 4/20 nous a été fournie, et la courbe granulométrique est visible Figure 2-17.



Figure 2-14. Centrale de tri Picheta dans le Val d'Oise

En dehors de leur provenance géographique, nous n'avons aucune information sur les caractéristiques de ces granulats et du béton dont ils proviennent, mais nous nous plaçons ici dans les conditions réelles d'utilisation de déchets de déconstruction. Il est important de noter que parmi ces granulats se trouvent des déchets de démolition non cimentaires (bois, plastique, verre, bitume) de taille centimétrique et à hauteur d'environ 1 % massique. Cette valeur a été obtenue après le quartage d'un échantillon de 75 kg de granulats selon la norme EN 932-2 [3].



Figure 2-15. Les granulats recyclés industriels (GRI)

3.3 Les granulats naturels de référence (GSC)

Tous les résultats d'essais de caractérisations des bétons recyclés sont comparés à ceux obtenus lors d'une campagne d'essai identique menée sur des bétons de granulats naturels. Ces granulats naturels sont des granulats alluvionnaires semi concassés silico-calcaires, composés à 70 % de silex et 30 % de calcaires (Figure 2-16). Ils proviennent de la carrière GSM (Italcementi Group) d'Achères dans les Yvelines (78). Leur classe granulaire est de 6.3/20.

Ces granulats naturels ont également été utilisés dans la formulation du béton « parent », destiné à être concassé pour obtenir des granulats recyclés de « laboratoire »



Figure 2-16. Les granulats silico-calcaires naturels (GSC)

4. Caractérisation physique des granulats

4.1 Granulométrie

Les analyses granulométriques des gravillons sont indispensables dans la formulation des bétons afin d'obtenir la meilleure compacité possible lors de la fabrication des mélanges.

Les courbes granulaires (Figure 2-17) ont été déterminées sur des échantillons représentatifs de granulats et selon les conditions décrites dans la norme NF P18-545 [3].

Ces courbes permettent d'illustrer une caractéristique très commune aux granulats recyclés : leur friabilité. En effet, dans le cas des deux types de granulats, la coupure granulaire obtenue juste après le concassage était de [4-20] mm, or on constate que le simple fait de les transporter et de les tamiser a conduit à la création de 5 % d'éléments inférieurs à 4mm dans le cas de GRL et jusqu'à 10 % dans le cas des GRI.

Nous déterminons par la méthode de Dreux Gorisse la composition du squelette granulaire du béton, soit 65% de gravillons et 35% de sable pour les BRL, et 67% de gravillons et 33% de sable pour les GRI. Ces valeurs seront utilisées dans la formulation de nos différents bétons.

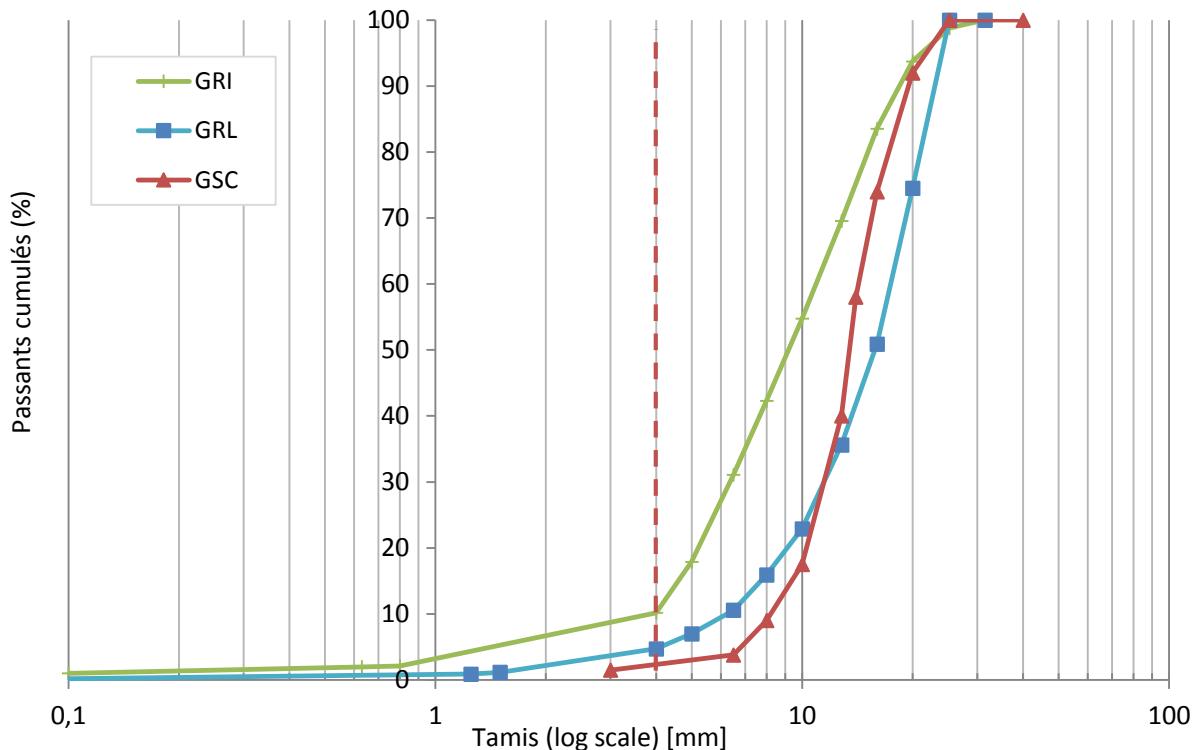


Figure 2-17. Analyse granulométrique des granulats recyclés GRL et GRI, selon la méthode Dreux-Gorisso [Dre 2002]

4.2 Détermination de la quantité de mortier attaché aux granulats d'origine

Les caractéristiques particulières des granulats recyclés sont principalement dues au mortier dont ils sont en partie composés. Plusieurs auteurs ont cherché à développer des méthodes afin de quantifier précisément cette gangue de mortier autour des granulats recyclés [Tam 2007] [Zhao 2014].

Dans cette étude, les granulats d'origine sont des silico-calcaires, et pour cette raison nous n'avons pu utiliser la technique de dissolution de la pâte de ciment dans l'acide, les calcaires étant également sensibles à ce type d'attaque chimique [Zhao 2014]. Nous avons donc choisi d'appliquer une technique décrite dans la norme EN 12370 [2], traitant du vieillissement accéléré des pierres naturelles, et plus particulièrement de leur résistance par un essai de cristallisation des sels.

Le principe est le suivant : comme illustré Figure 2-18, le sulfate de sodium est soluble dans l'eau au-delà de 30°C à une concentration de 2 mol.L⁻¹. A cette température et au-delà, la solution de sulfate de sodium s'insère dans les pores accessibles à l'eau de la pâte de ciment entourant les granulats recyclés. Lorsque l'on descend en température, le sulfate de sodium prend ses formes hydratées : la mirabilite et l'heptahydrate, respectivement 10 fois et 7 fois hydratés. Sulfate hydraté naturel de sodium de formule : Na₂SO₄ · 10 H₂O, la mirabilite contient 19,3 % de Na₂O, 24,8 % de SO₃ et 55,9 % d'eau. Elle cristallise dans le système monoclinique, sous forme de prismes aplatis. Elle est incolore et transparente, parfois opaque, blanche avec des reflets jaunes, bleus ou verts. La formation de cristaux de mirabilite dans les pores fragilise la pâte de ciment qui devient extrêmement friable.

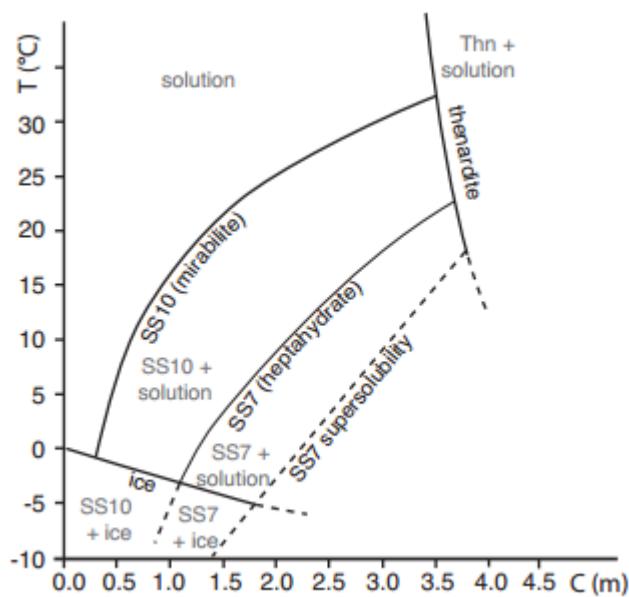


Figure 2-18. Diagramme de phases du sulfate de sodium [DENE 2014]

Le protocole suivant a été appliqué :

- Un lot représentatif de 1 kg de granulats est obtenu par quartage
- Les granulats sont séchés à l'étuve à 80°C jusqu'à masse constante.
- Une solution de sulfate de sodium NaSO₄ (concentration massique 30 %, soit 2 mol.L⁻¹) est préparée (afin d'assurer une dissolution complète du sulfate de sodium dans l'eau la solution est portée à 50°C et placée sous agitation)
- Un kg de granulats est pesé précisément et placé dans un récipient ouvert avec un litre de solution de NaSO₄ (M initiale)
- Le tout est laissé pendant deux heures à 5°C afin de permettre une bonne saturation des granulats et une bonne cristallisation de la mirabilite.
- L'apparition de cristaux est observée (Figure 2-19).
- Les granulats sont mis à sécher à l'étuve à 80°C pendant 24 h.
- Un tamisage sur une grille de maille 4 mm permet de s'affranchir des morceaux de mortier déjà détruit par la cristallisation des sels
- Le cycle est répété autant de fois que nécessaire pour détruire la gangue de mortier dans son ensemble.
- Les granulats sont rincés des débris de mortiers, séchés à l'étuve à 80°C pendant jusqu'à masse constante, et pesés afin de déterminer leur masse finale (M après séparation).



Figure 2-19. Résultat de la cristallisation du sulfate de sodium au contact des granulats de laboratoire

Pour chacun des granulats recyclés, 2 prises d'essai de 1 kg de gravillons chacune, obtenues par quartage selon la norme EN 932-2 [3], ont été testées. A la fin du cycle de refroidissement et cristallisation du sulfate de sodium la gangue de mortier autour des granulats n'était pas complètement détruite, cependant elle était devenue extrêmement friable, et il a suffi de quelques secondes d'action mécanique pour la faire se détacher. L'aspect final des granulats est représenté sur la

Figure 2-20.

Chaque lot a été pesé avant et après le retrait du mortier, et les résultats sont résumés dans le Tableau 2-8. Le pourcentage de pâte dans les GRL est compris entre 40 et 50%, alors que dans les BRL il est inférieur avec une valeur variant entre 30 et 40%. L'écart type pour l'ensemble des mesures est inférieur à 5%.

Tableau 2-8. Pourcentage massique de mortier dans les granulats recyclés

	GRL test 1	GRL test 2	GRI test 1	GRI test 2
M initiale (g)	1000	1000	1000	1000
M après séparation (g)	505	578	658	634
% massique de mortier	49,5 %	42,2%	34,2%	36,6%

On constate que les granulats recyclés de laboratoire contiennent plus de mortier que les granulats recyclés industriels. Ce résultat peut être dû à la moindre manipulation des GRL, au type de concasseur utilisé, ou à la formulation du béton parent si le volume de pâte n'est pas le même.



Figure 2-20. Aspect des granulats après retrait de la gangue de mortier, à gauche : GRL, à droite : GRI

4.3 Masse volumique, coefficient d'absorption d'eau et porosité

4.3.1 Mesure de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau des granulats recyclés

La masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau d'un granulat sont deux paramètres fondamentaux, responsables des caractéristiques mécaniques du matériau – et donc du béton – et déterminant la quantité d'eau de gâchage nécessaire lors de la mise en œuvre. Les granulats recyclés ont la particularité d'être entourés d'une gangue de mortier, qui leur confère une plus grande porosité, soit par conséquence une masse volumique plus faible et un coefficient d'absorption d'eau plus élevé que les granulats naturels. Il est donc spécialement important de déterminer ces paramètres lorsqu'on travaille avec ces granulats particuliers.

La masse volumique et le coefficient d'absorption d'eau des granulats (Tableau 2-9) ont été déterminés selon les conditions décrites dans la norme EN NF 1097-6 [1], méthode au pycnomètre pour les granulats naturels, et selon l'annexe C, adaptée pour les granulats légers, dans le cas des granulats recyclés.

Tableau 2-9. Masse volumique et coefficients d'absorption d'eau des granulats recyclés

	GRL [4-20]	GRI [4-20]	GSC [6.3-20]
Masse volumique (g.cm ⁻³)	2,3	2,3	2,5
WA 24 (% massique)	7,0	6,4	2,5

Les granulats recyclés présentent une masse volumique 10 % inférieure aux granulats naturels de référence. Leur coefficient d'absorption d'eau, quant à lui, est deux fois et demie supérieur à celui des GSC. Ces tendances sont dues à la présence de mortier dans les granulats recyclés. On constate d'ailleurs que les GRL présentent un coefficient d'eau légèrement supérieur à celui des GRI, résultat qui s'accorde avec la plus grande quantité de mortier évaluée pour les GRL.

4.3.2 *Mesure de la porosité à l'eau sous vide des granulats recyclés*

La mesure de porosité à l'eau sous vide permet de quantifier le volume de pores ouverts (accessibles à l'eau) dans un échantillon, mais ne permet pas d'obtenir la distribution en taille des pores.

La porosité des granulats a été mesurée à température ambiante. Pour chacun des deux types de granulat, nous avons choisi de mesurer l'influence de la coupure granulaire sur la valeur de porosité. Trois tailles granulométriques ont été définies : [4-10], [10-20] et [20 – d_{max}]. Dans cette optique, 10 gravillons de chaque coupure granulaire ont été prélevés d'un échantillon représentatif obtenu par quartage, et caractérisé par porosimétrie à l'eau sous vide. La porosité totale accessible à l'eau d'un type de granulat est obtenue en effectuant la moyenne des valeurs obtenues pour chaque coupure granulaire en tenant compte des proportions respectives de chaque coupure. La valeur de porosité obtenue est la moyenne de 10 mesures effectuées sur des granulats différents issus d'un échantillon représentatif selon le protocole suivant :

- Les granulats sont séchés à l'étuve à 80°C jusqu'à masse constante. Leur masse sèche est relevée.
- Ils sont placés dans un dessiccateur hermétique auquel on impose un vide de 0.1 Bar. Les échantillons sont ainsi gardés sous vide pendant 12 h.
- De l'eau préalablement dégazée est introduite très progressivement dans le dessiccateur de manière à remplir tous les pores des granulats, sans y introduire de bulles d'air.
- Une fois l'échantillon saturé, il est maintenu immergé dans l'eau pendant 24 h, à la suite de quoi ses masses « hydrostatiques » et « saturées surface sèche » sont relevées.

La porosité est alors calculée selon l'équation suivante :

$$\text{porosité} = \frac{m_{sss} - m_{sèche}}{m_{sss} - m_{sss}^{imm}} \times 100$$

Où m_{sss} est la masse saturée surface sèche de l'échantillon, $m_{sèche}$ sa masse à la sortie de l'étuve, et m_{sss}^{imm} sa masse saturée mesurée dans l'eau.

Tableau 2-10. Porosité à l'eau sous vide des granulats recyclés

	GRI	GRL	GSC
$4 < d_{max} < 10$	13 %	19 %	-
$10 < d_{max} < 20$	16 %	19 %	-
$d_{max} > 20$	13 %	18 %	-
moyenne	14 %	18,7 %	6,5 %

Les valeurs élevées obtenues sont essentiellement dues à la présence de mortier, le granulat silico-calcaire naturel ayant une porosité comprise entre 3 et 4% [Xing 2010]. Le Tableau 2-10 récapitule les résultats et nous permet de constater que la coupure granulaire n'a finalement aucun impact sur la valeur finale de porosité. Les GRL présentent une porosité plus élevée, de 4% en moyenne. Les granulats recyclés de laboratoire ont une porosité plus élevée que celle de leur béton parent qui est de 16%. Les fractions volumiques respectives de pâte et de granulats ne sont donc pas conservées pendant les opérations de concassage et criblage du béton parent.

Les mesures de quantité de pâte ont montré que les granulats de laboratoire présentaient en moyenne environ 20 % de pâte de plus que les granulats recyclés industriels. Cette valeur se répercute sur les valeurs relatives de porosité, qui sont environ de 20 % plus élevées pour les GRL que pour les GRI.

5. Caractéristiques pétrographique et minéralogique des granulats recyclés

5.1 Pétrographie des granulats recyclés par microscopie optique à lumière polarisée

La caractérisation pétrographique des granulats est réalisée par microscopie optique, à l'aide d'un microscope pétrographique polarisant. Il s'agit d'utiliser les propriétés optiques des matériaux constitutifs des roches afin de les identifier.

Les échantillons observés avec ce type de technique sont des roches préparées sous forme de lames minces, soit de fines lamelles de 30 µm d'épaisseur collées sur des lames de verre. Le fonctionnement du microscope repose sur l'utilisation d'un faisceau de lumière polarisée. La lumière présente une double nature, particulière - soit constituée de photons - et ondulatoire, et ses ondes électromagnétiques vibrent selon toutes les directions de l'espace. Une fois passée dans le polariseur, les ondes de la lumière, alors dite « polarisée non-analysée » (ou LPNA), ne vibrent plus que selon un seul plan, toutes les autres directions ayant été filtrées [Hebe 1998]. Il est alors possible de faire passer cette lumière à travers un second filtre, appelé analyseur, et d'obtenir une lumière dite « polarisée analysée » (ou LPA). De la même manière que le polariseur, l'analyseur ne laisse passer qu'un plan de vibration du faisceau lumineux, plan qui a la particularité d'être perpendiculaire à celui qui a précédemment traversé le polariseur. On comprend alors qu'en l'absence de lame mince

entre l'analyseur et le polariseur, aucune lumière n'arrivera à l'œil de l'opérateur. La présence d'un échantillon, en revanche, dévierra la lumière qui le traverse et permettra alors l'arrivée à l'œil de l'observateur d'un faisceau lumineux caractéristique du matériau étudié. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé le microscope optique polarisant Olympus BX 50 du laboratoire Géoscience et Environnement de Cergy (GEC).

Les échantillons étudiés ont été obtenus après réduction d'un échantillon de 75 kg par quartage. Six lames minces ont été réalisées par type de granulats. Les quatre types de granulats suivants ont été étudiés au microscope polarisant.

- Des granulats recyclés industriels, composés d'un ou plusieurs granulats naturels enrobés de mortier (GRIgm)
- Des granulats recyclés industriels n'étant composés à première vue que de mortier (GRIm)
- Des granulats recyclés de laboratoire, composés d'un ou plusieurs granulats naturels enrobés de mortier (GRLgm)
- Des granulats recyclés de laboratoire n'étant composés à première vue que de mortier (GRLm)

Les douze granulats sélectionnés après quartage, sont supposés représentatifs de l'ensemble des granulats utilisés. Les lames minces réalisées ont été colorées à l'aide d'une résine bleue afin de faciliter l'observation.

A faible grossissement, l'observation des échantillons GRIgm indique la présence d'un granulat de silex à grains très fins, entouré d'une matrice (mortier) contenant une multitude de grains de quartz et de calcite. Ceux-ci peuvent être poly- ou mono cristallins. On observe également la présence de grains d'oxyde de fer allant jusqu'à quelques mm de diamètre. A fort grossissement (Figure 2-21 b), on observe la présence de grains de glauconite (100 à 200 μm), phyllo silicate d'altération se formant en milieu marin. Sa richesse en fer de valence II⁺ est directement responsable de sa couleur verte.

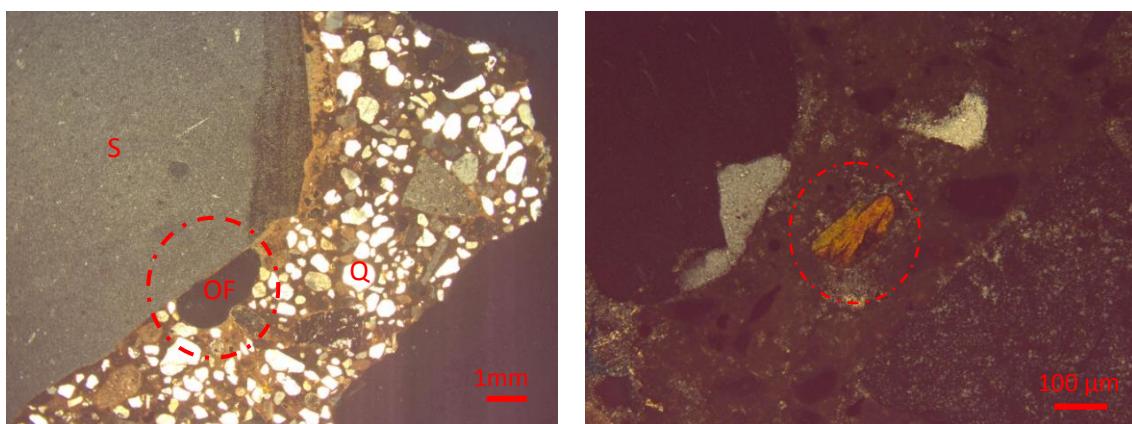


Figure 2-21. À gauche : GRIgm, silex (S), quartz (Q) et oxydes de fer (OF) en LPA, à droite: GRIgm, grain de glauconite (LPNA)

Les échantillons classés GRIm sont à première vue uniquement des morceaux de mortier, mais pour certains d'entre eux, la réalisation des lames minces a révélé la présence d'un ou plusieurs gros granulats au cœur du spécimen. L'observation des échantillons à faible grossissement révèle la présence de grains relativement gros de silex et de carbonates. On distingue également la présence de micrite (boue carbonatée), d'algues et de grès (Figure 2-22). Les cristaux de quartz et de calcite (grains de sable) sont majoritairement roulés (arrondis), indiquant vraisemblablement une origine alluvionnaire.

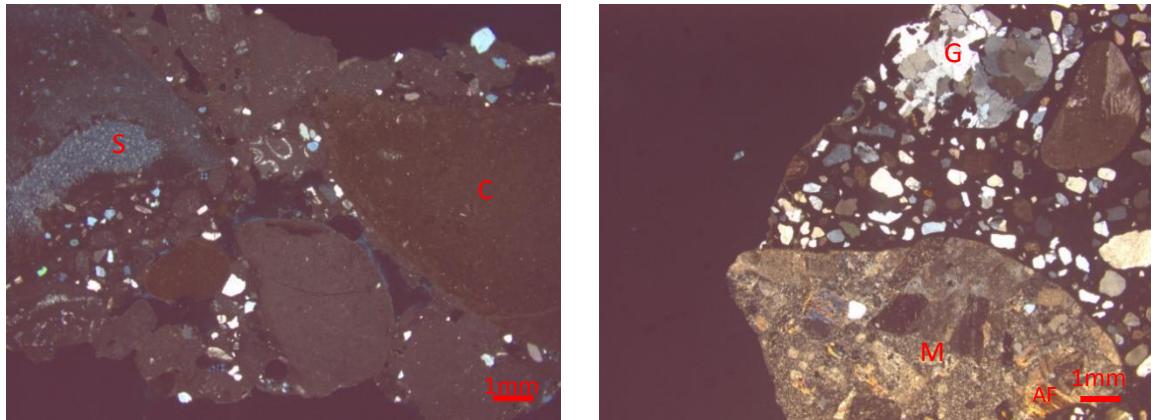


Figure 2-22. À gauche : GRIm (LPA), à droite : GRCm (LPA) - micrite (M), grès (G), algue fossilisée (AF), carbonates (C), silex (S).

A un grossissement plus élevé, et en lumière polarisée non analysée, on peut observer la porosité de la matrice (en bleu sur l'image), plus particulièrement en périphérie des grains, aux interfaces pâte/granulat.

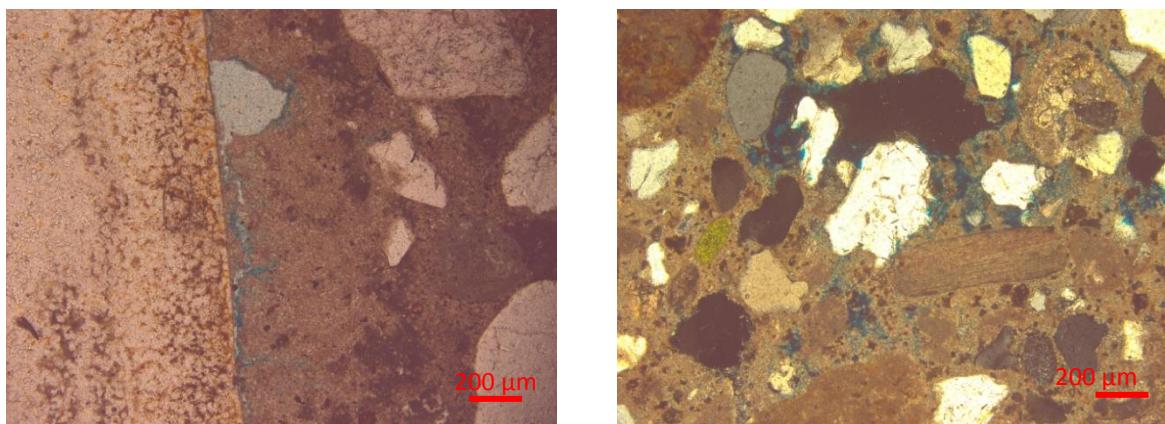


Figure 2-23. À gauche : GRIm, porosité en périphérie des grains ; à droite : GRIm porosité à l'interface pâte/granulat

Les granulats recyclés de laboratoire sont composés essentiellement de fragments de silex et de carbonates, de diamètre de l'ordre du centimètre, enrobés dans une matrice « mortier » composée en grande partie de sable, soit de petits grains de quartz de taille inférieure à 4 mm, concassés et/ou roulés, mono- et polycristallins.

Les morceaux de mortier issus des granulats recyclés de laboratoire ont également révélé la présence de plus gros granulats au cœur de la pâte lors de la réalisation des lames minces. Ici aussi, on observe

des silex, des carbonates (dont de la micrite), et une matrice « mortier » composée de grains de quartz de diamètre inférieur à 1 mm et de pâte de ciment.

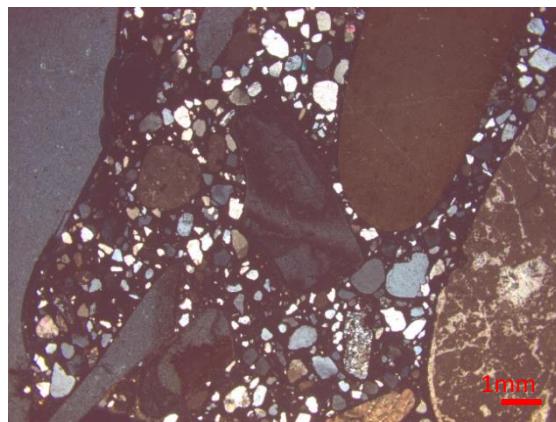


Figure 2-24. GRLgm silex, carbonate et grains de quartz

Cette étude pétrographique permet de conclure sur la similarité des granulats contenus dans les mortiers entourant nos deux types de granulats recyclés. En effet, nous retrouvons dans les deux cas des sables silico-calcaires roulés, composés principalement de silex, quartz et carbonates. On peut alors supposer une origine alluvionnaire. Vu le contexte géographique, il s'agit probablement de granulats de Seine.

5.2 Analyse minéralogique par diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une technique qui fournit des informations sur la structure des matériaux cristallisés, et permet ainsi de les identifier. Nous avons décidé de caractériser nos deux granulats recyclés via la diffraction des rayons X afin de déterminer s'ils présentent une différence de composition qui pourrait avoir un impact sur leur comportement dans le béton.

Les corps cristallins peuvent être considérés comme des assemblages organisés de plans atomiques plus ou moins denses. Ce sont des plans réticulaires et les distances inter-réticulaires qui les séparent sont caractéristiques de la phase cristalline qu'ils composent. Lors d'une mesure, le matériau est irradié par un faisceau parallèle de rayons X monochromatiques, qui est diffracté suivant les angles spécifiques liés aux distances inter-réticulaires suivant la loi de Bragg :

$$\sin \theta = \frac{n \cdot \lambda}{2 \cdot d_{hkl}}$$

Où λ est la longueur d'onde du faisceau de rayons X, d est la distance inter-réticulaire, θ est l'angle d'incidence du faisceau et n est l'ordre de diffraction.

Un détecteur permet de collecter les rayons diffractés lors du balayage angulaire de la surface irradiée de l'échantillon. On obtient alors un diagramme de diffraction (ou diffractogramme) de l'échantillon étudié. La mesure des angles correspondant aux pics de diffraction permet de

déterminer, grâce à la loi de Bragg, les distances inter-réticulaires, et donc les phases composant l'échantillon. On peut ainsi remonter à la structure cristalline du matériau.

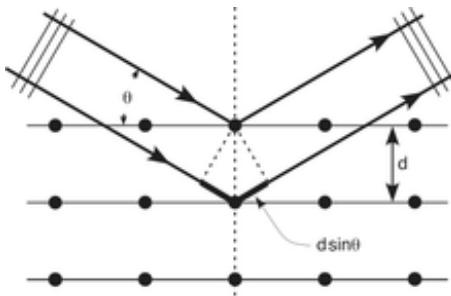


Figure 2-25. Principe de la loi de Bragg

Les essais ont été réalisés sur un diffractomètre « Philips PW 1730 » utilisant la raie $\text{K}\alpha$ du Cuivre. Pour chaque type de granulats recyclés, la gangue de mortier de cinq granulats issus d'un échantillon représentatif a été réduite en poudre afin d'être étudiée.

Les diffractogrammes des granulats sont présentés sur les Figure 2-26 et Figure 2-27

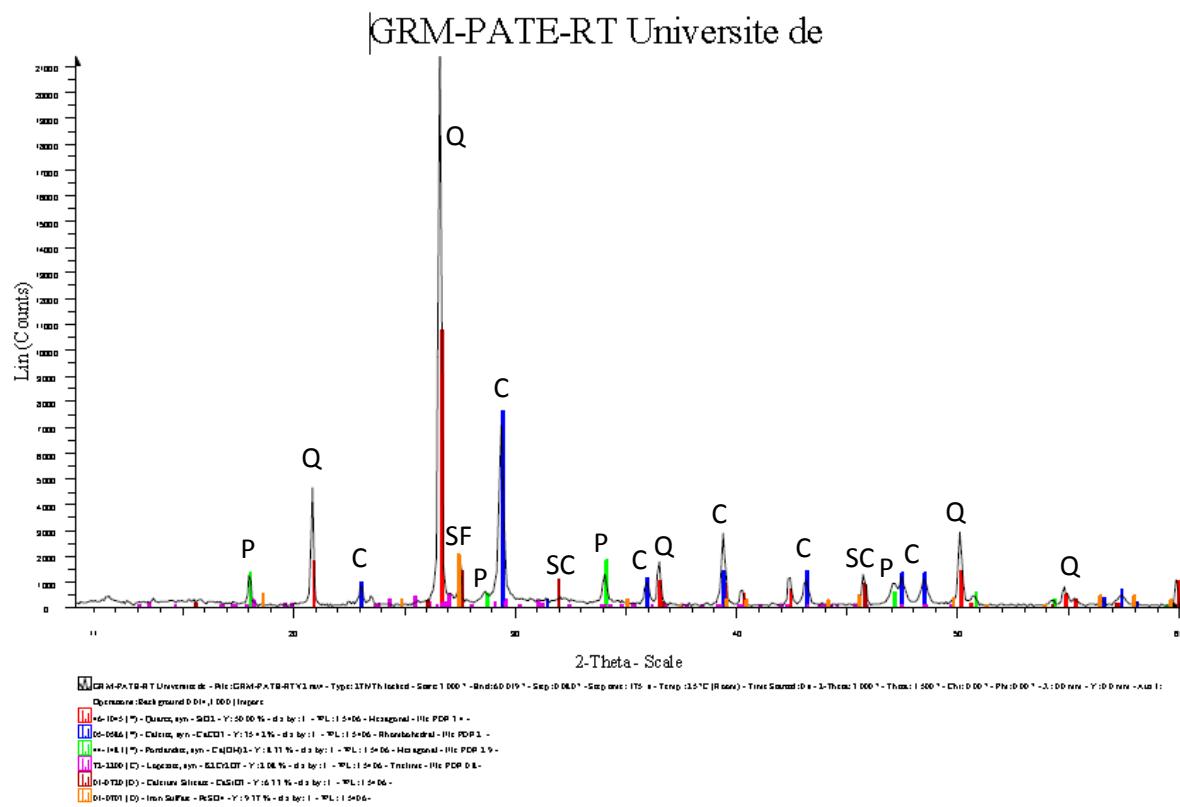


Figure 2-26. Diffractogramme du mortier entourant les Granulats Recyclés de Laboratoire

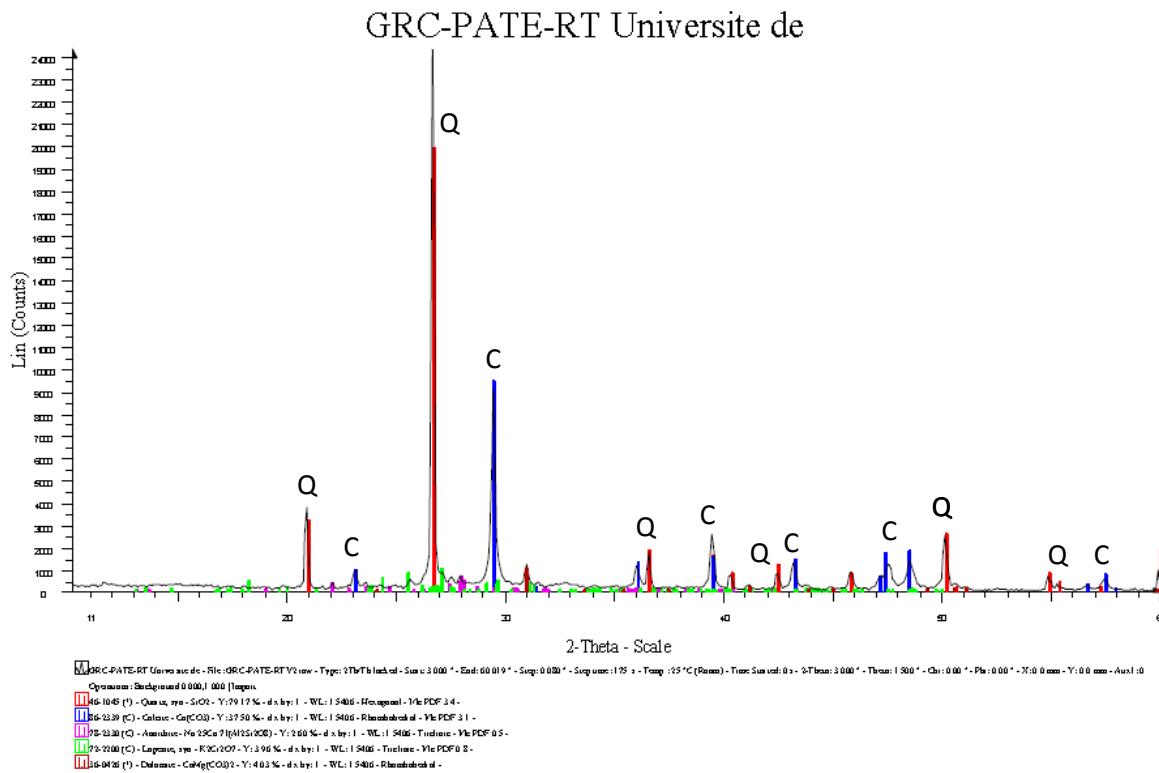


Figure 2-27. Diffractogramme du mortier entourant les Granulats Recyclés Industriels

Légende : Q - quartz ; C - calcite ; P - portlandite ; SF - sulfate de fer ; SC - silicate de calcium

Le mortier entourant les GRL est constitué principalement de quartz et de calcite, espèces cristallines présentes dans le sable, et contient sous forme de traces de la lopezite et des sulfates de fer. L'analyse révèle également la présence de portlandite et de silicates de calcium. La présence de ces derniers nous permet de supposer que les réactions d'hydratation ne sont pas toutes terminées et continuent encore dans la pâte entourant les GRL.

Les GRI contiennent également majoritairement du quartz et de la calcite, phases cristallines du sable contenues dans le mortier. On y trouve également, dans des proportions bien moindres, de l'anorthite (silicate, pôle calcique de la série des feldspaths plagioclases), de la lopezite et de la dolomite, espèces minérales également présentes dans le sable du mortier. L'absence de portlandite nous laisse supposer qu'avec le temps celle-ci a pu être dissoute ou carbonatée. L'absence de silicates de calcium nous confirme que les réactions d'hydratation sont complètement terminées.

5.3 Analyse thermogravimétrique (ATG) et thermo-différentielle (ATD) des granulats

L'analyse thermogravimétrique est une technique d'analyse qui permet de déterminer des changements de phase via la variation de masse en mode transitoire lors du chauffage d'un matériau. Les analyses ATD- ATG de cette étude sont réalisées sur un appareil STA 449 F1 Jupiter de chez Netzsch.

Pour chaque type de granulats, trois granulats issus d'un échantillon représentatif sont pré-séchés à 80 °C jusqu'à masse constante. Leur gangue de mortier est alors retirée et broyée en une fine poudre à l'aide d'un vibro-broyeur à disque automatique type RS200 de chez Retsch. Ils sont ensuite conservés dans des sachets en plastique hermétiques jusqu'à conduction de l'analyse. Une masse de 60 mg environ est placée sur la thermo-nanobalance de la machine et est pesée avec précision ($\pm 0,025 \mu\text{g}$) tout au long de l'essai. La vitesse de chauffage est de 10°C/min jusqu'à 800°C.

Les mesures d'ATD-ATG réalisées sur le mortier entourant les granulats recyclés sont représentées sur les Figure 2-28Figure 2-29.

Une perte de masse associée à un pic en ATD témoigne du départ d'un composé. Au contraire un pic en ATD sans perte de masse associé est témoin de la transformation d'un composé, sans perte de matière.

Les trois grandes phases de perte de masse autour de 200°C, 450°C et 700°C sont respectivement dues au départ de l'eau (libre et liée), à la deshydroxylation de la portlandite et au début du phénomène de décarbonatation. Le pic observé un peu avant 600°C et qui n'est associé à aucune perte de masse témoigne de la transformation polymorphique du quartz α en quartz β .

Les deux granulats étudiés présentent le même type de profil, avec des phénomènes de déhydrations et de décarbonatation. La seule différence intervient à 450°C, stade de deshydroxylation de la portlandite, où on observe un pic endothermique en ATD et une perte de masse plus importante dans le cas des GRL. Cette observation complète les analyses DRX qui n'indiquent pas la présence de portlandite dans les GRI. La confrontation de ces deux résultats permet de dire qu'on trouve de la portlandite dans les GRI, mais à un taux non détectable par DRX.

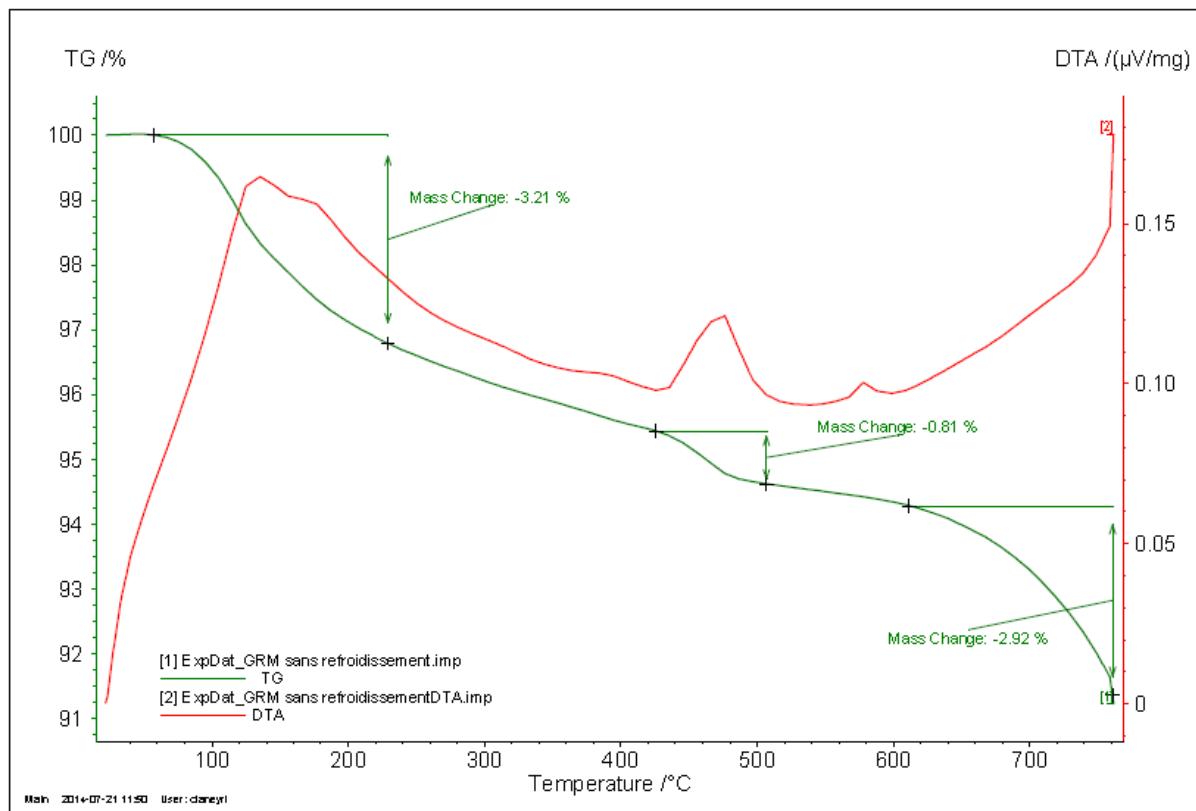


Figure 2-28. Analyses ATD et ATG des granulats recyclés de laboratoire

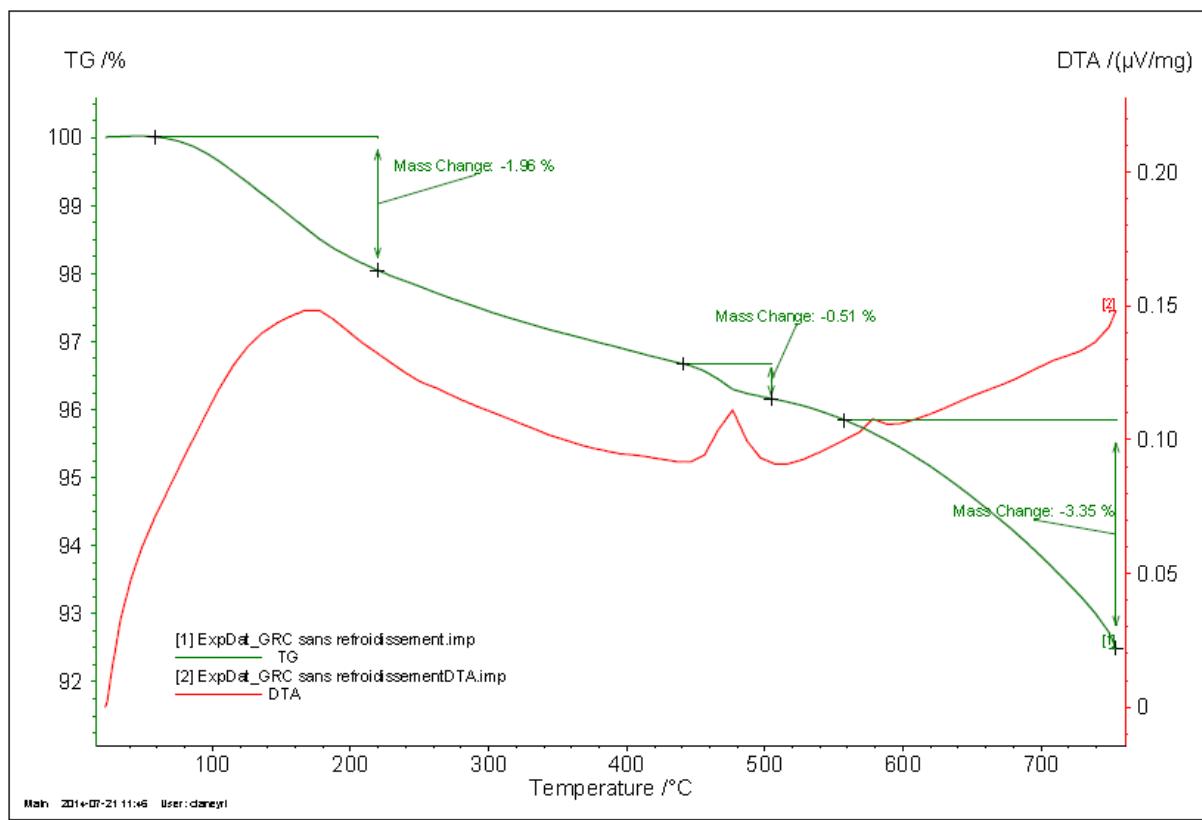


Figure 2-29. Analyses ATD et ATG des granulats recyclés industriels

6. Conclusion

L'évaluation des méthodes de mesure de masse volumique et coefficient d'absorption des granulats naturels appliquées aux granulats recyclés ont indiqué, pour les gravillons, une plus grande fiabilité des résultats avec l'adaptation de la méthode destinée aux granulats légers. Les résultats indiquent que 80 % de la valeur d'absorption finale est atteinte en cinq minutes, mais que celle-ci se poursuit encore légèrement pendant plusieurs semaines. L'étude du sable recyclé présente plus de points délicats, et les résultats varient de façon non négligeable selon la méthode employée. La présence ou non de fines, ainsi que la méthode de détermination de l'état saturé surface sèche ont une influence significative sur la valeur de coefficient absorption d'eau finale. La valeur obtenue par séchage sur entonnoir Büchner semble cependant donner une estimation réaliste de l'eau « prisonnière » du sable pendant le malaxage.

L'étude bibliographique a souligné l'influence de la nature des granulats d'origine sur le comportement du béton les incorporant, et particulièrement à haute température. Les granulats de référence, les granulats recyclés de laboratoire et les granulats recyclés industriels, possèdent tous des granulats d'origine de même nature pétrographique à savoir silico-calcaire. L'étude des caractéristiques des granulats recyclés a montré dans quelle mesure la présence de mortier attaché au granulat d'origine modifiait les propriétés physiques des granulats recyclés. Leur densité est en effet plus faible de près de 10 % que celles du granulat naturel étudié. De la même manière, leur

porosité accessible à l'eau sous vide s'en trouve augmentée (elle se situe entre 14 et 19 %) et est environ trois fois supérieure à celle des granulats de référence (autour de 6 %). La présence de mortier leur confère également un coefficient d'absorption d'eau particulièrement élevé, de l'ordre de 6 à 7 % contre seulement 2 % pour des granulats naturels, et cette caractéristique à elle seule impacte fortement la mise en œuvre du béton.

Les deux granulats recyclés étudiés, le granulat recyclé de laboratoire (GRL) et le granulat recyclé industriel (GRI) sont proches en plusieurs points : ils sont tous les deux d'origine silico-calcaire, ont une granulométrie semblable, et une absorption d'eau similaire, mais le pourcentage de mortier attaché au granulat d'origine est plus élevé dans le cas du GRL que du GRI. Ce résultat se reflète dans les valeurs de porosité, légèrement plus élevées pour le GRL que le GRI. Cette tendance peut également être due à la compacité de la matrice entourant les granulats, mais si celle-ci est connue pour le GRL (avec un rapport E/C de 0,6), elle est inconnue dans le cas du GRI. Les analyses DRX de la pâte de ciment autour des granulats ont permis de constater que le GRL contient de la portlandite et des silicates de calcium qui peuvent laisser présager des réactions d'hydratation supplémentaires. Aucune trace de ces deux composés n'a été observée dans le GRI. On suppose que la portlandite a été complètement carbonatée, et que les réactions d'hydratation sont toutes complètement terminées. Enfin, nous avons trouvé parmi les GRI des déchets de démolition non cimentaires (bois, plastique, bitume, verre...) dont la taille est de l'ordre du centimètre et dont les caractéristiques, très éloignées de celles du béton, peuvent influencer le comportement de celui-ci, notamment à température élevée.

Références bibliographiques

- [1] Norme NF EN 1097-6 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau
- [2] DIN V 18004 clause 5. Particle density, effective particle density and water absorption of lightweight aggregates
- [3] EN 932-2 Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats — Partie 2 : Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire
- [4] NF P 18-545 Granulats - Éléments de définition, conformité et codification (2011)
- [5] EN 12370 Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance par un essai de cristallisation des sels (1999)
- [Barr 1996]** M. Barra de Oliveira, E. Vazquez, The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, *Waste Management*, 16 (1996) 113-117
- [Dene 2014]** Mélanie Denecker, Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti: méthodes indirectes d'identification pour l'approche expérimentale, Thèse de Doctorat, 2014
- [DJE 12]** A. Djerbi Tegguer, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Construction and Building Materials* 27 (2012) 112-116
- [Dre 2002]** G. Dreu, J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, huitième édition, Edition Eyrolles, 2002
- [Hebe 1998]** R. Hébert, Guide de pétrologie descriptive – utilisation du microscope optique polarisant et applications aux roches magmatiques, Fernand Nathan, 1998
- [Poon 2004]** C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, H. Fok, S.C. Kou, Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 31–36
- [Rodr 1999]** C. Rodriguez-Navarro, E. Doehne, Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern, *Earth surface processes and landforms*, 24, 191-209, (1999)
- [Tam 2007]** Vivian W.Y. Tama,*, C.M. Tamb, K.N. Lea, Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, *Resources, Conservation and Recycling* 50 (2007) 82–101
- [Tam 2008]** Tam V. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 364–369
- [Xing 2010]** Zhi Xing, Anne-Lise Beaucour, Ronan Hebert, Albert Noumowe, Béatrice Ledesert, Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 392–402
- [Zhao 2014]** Z. Zhao, Valorisation de fines de concassage de bétons pour la fabrication de mortiers, Thèse de doctorat, école des Mines de Douai et Université de Lille 1 (2014)

Chapitre 3. Influence des granulats recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques de bétons ordinaires et à hautes-performances

1. Introduction

Ce chapitre porte sur l'influence des gravillons recyclés, et l'influence de la compacité de la matrice sur le comportement de bétons recyclés. Deux types de gravillons recyclés sont étudiés, un gravillon recyclé de laboratoire (GRL) obtenu à partir d'un béton formulé et concassé au laboratoire, et dont la composition est connue, et un gravillon recyclé industriel (GRI) provenant d'un vrai chantier de démolition. Pour chaque type de granulat, deux bétons sont réalisés, un béton à matrice ordinaire, et un béton à matrice hautes performances, avec des rapports Eau / Ciment (E/C) respectivement de 0,6 et 0,3. Ces bétons sont comparés à des bétons de référence de granulats silico-calcaires de même formulation.

Les caractéristiques de ces six bétons sont déterminées dans les mêmes conditions expérimentales afin de distinguer l'influence des granulats dans une même matrice cimentaire et l'influence de la compacité de la matrice en fonction de la nature des granulats. Sont présentées les caractéristiques physico-chimiques (densité, porosité), les propriétés thermiques (conductivité, diffusivité et chaleur spécifique) et les propriétés mécaniques (résistance en compression uni-axiale, résistance en traction par fendage et module d'élasticité dynamique) des différents bétons à température ambiante.

2. Préparation et conditionnement des bétons

Afin d'être en mesure de comparer les essais réalisés sur nos différents bétons, les conditions de préparation et de conservation ont été homogénéisées et sont décrites ci-après.

2.1 Formulations et composition des bétons

2.1.1 *Le ciment*

Pour toutes les formulations de l'étude, nous avons utilisé un ciment produit par la cimenterie Calcia de Villiers au Bouin du groupe Italcementi. Il est référencé CEM I 52.5 N CE CP2 NF, et sa classe vraie est de 61.3 MPa. Il a une masse volumique absolue de 3130 kg.m⁻³, et une surface Blaine de 3590 cm².g⁻¹. Sa composition chimique est donnée dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1. Composition du ciment CEM I 52.5 N déterminé par fluorescence X

Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
(%)	20.23	4.29	2.35	0.25	0.02	63.67	3.88	2.80	0.69	0.14

2.1.2 *Le superplastifiant*

Le superplastifiant n'a été utilisé que dans la confection des bétons à matrice E/C = 0,3, afin de leur conférer une fluidité suffisante pour la mise en œuvre. Nous avons choisi le superplastifiant ©CIMFLUID 3002, adjuvant à base de polycarboxylates modifiés, produit par l'entreprise AXIM du

groupe Italcementi. Il appartient à la famille des Superplastifiants / Hauts Réducteurs d'Eau / Retardateur de Prise et est préconisé pour l'obtention de béton à niveau de fluidité élevé, typiquement de classe S4 ou S5. Il est incorporé dans l'eau de gâchage.

2.1.3 *L'eau*

Nous avons utilisé l'eau du réseau de distribution en eau potable de la communauté d'agglomération de Cergy-Pontoise. Dans les formulations ici étudiées, sa masse volumique a été rapportée à 1000 kg.m^{-3} .

2.1.4 *Les granulats*

Le sable, de classe granulaire [0-4], a été fourni par GSM. Il s'agit d'un sable de seine silico-calcaire. Sa masse volumique est de 2458 kg.m^{-3} , et son coefficient d'absorption d'eau à 24 h est de 0.98 %.

Nous avons choisi, pour l'un des deux granulats recyclés étudiés, de formuler, couler et concasser au laboratoire un béton naturel, afin d'en obtenir des granulats recyclés dont nous maîtrisons parfaitement les caractéristiques. Ces granulats recyclés de laboratoire (GRL) sont issus d'un béton naturel ordinaire, contenant des granulats silico-calcaires, et concassé de manière à obtenir des gravillons de classe granulaire 4/20.

Nous avons fait le choix de comparer les granulats recyclés de laboratoire, avec des granulats recyclés industriels (GRI) issus de réels déchets de démolition. Ces granulats ont été obtenus et concassés par la plateforme de recyclage Picheta, installée à Pierrelaye (95), et proviennent initialement de la démolition de la cité des 4000, sur la commune de la Courneuve (93). Une coupe granulaire 4/20 nous a été fournie. En dehors de leur provenance géographique, nous ne connaissons rien de ces granulats, mais nous nous plaçons ici dans les conditions réelles d'utilisation de déchets de déconstruction, et on trouve parmi eux des déchets non cimentaires de taille centimétrique tels que du bois, du plastique, du bitume...etc.

Tous les résultats d'essais de caractérisation des bétons recyclés sont comparés à ceux obtenus lors d'une campagne d'essais identiques menée sur des bétons naturels. Ces bétons naturels sont formulés à partir de granulats alluvionnaires semi concassés silico-calcaires (GSC), provenant de la carrière GSM (Italcementi Group) d'Achères dans les Yvelines (78). Leur classe granulaire est de 6.3/20. Ces mêmes granulats ont également été utilisés dans la formulation du béton dit « parent », destiné à être concassé pour obtenir des granulats recyclés de laboratoire.

Les caractéristiques principales des granulats, décrites et commentées au chapitre 2, sont résumées dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2. Caractéristiques des granulats

granulats	GRL	GRI	GSC
Masse volumique (kg.L ⁻¹)	2.3	2.3	2.5
WA 24 (%)	7.0	6.4	2.5
Granulat d'origine	Silico-calcaire	Silico-calcaire	Silico-calcaire
% ancienne pâte	≈ 30%	≈ 25%	-
DRX (mortier)	Quartz – Calcite – Portlandite – silicates de Ca – Lopezite (traces) – sulfates de Fe (traces)	Quartz – Calcite – Anorthite (traces) – Lopezite (traces) - Dolomite (traces)	-
f _c ancienne pâte 90j	35 MPa	inconnue	-

2.1.5 Formulation

Le but de cette étude est d'analyser l'influence des granulats recyclés sur le comportement mécanique et thermique des bétons soumis à des températures élevées, en comparant deux types de granulats recyclés à un granulat naturel. Nous avons donc choisi de réaliser, pour chaque type de granulats, deux formulations de rapports eau/ciment (E/C) différents. Un béton à matrice ordinaire (BO) avec un rapport E/C de 0.6 et un béton à matrice hautes performances (BHP) avec un rapport E/C de 0.3.

Tableau 3-3. Composition des bétons élaborées à partir des conditions saturées surface sèche. Données pour 1m³. BRI : Béton Recyclé Industriel, BRL : Béton Recyclé de Laboratoire, BSC : Béton Silico-Calcaire.

Bétons	BRI 0.6	BRL 0.6	BSC 0.6	BRI 0.3	BRL 0.3	BSC 0.3
granulats	GRI	GRL	GSC	GRI	GRL	GSC
Ciment (kg)	362	362	362	500	500	500
Gravillons (kg)	1050	1016	956	1048	1044	987
Sable (kg)	563	597	692	564	562	715
Eau efficace (kg)	217	217	217	150	150	150
Superplastifiant (kg)	-	-	-	1.68	1.66	1.65
E / C	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3
Affaissement (cm)	15	15,5	19	16,3	16	19
Air occlus (%)	1,8	1,8	1,4	0,9	1	0,9
Masse volumique béton frais mesurée (kg.L ⁻¹)	2,21	2,21	2,23	2,29	2,3	2,35

Les dosages en ciment sont respectivement de 362 kg.m⁻³ pour les BO et 500 kg.m⁻³ pour les BHP. Les compositions (Tableau 3-3) ont été déterminées par la méthode de Dreux-Gorisso [DRE 2002], et la fraction volumique totale des granulats est identique pour les bétons de même rapport E/C. Des mesures au cône d'Abra.ms positionnent tous les bétons en classe S4, soit présentant un affaissement compris entre 16 et 20 cm. Dans le cas des BHP, la quantité de superplastifiant à ajouter pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée a été déterminée par des essais préliminaires aux gâchées d'étude. Il est important pour la compréhension des résultats de préciser que les granulats recyclés de laboratoire (GRL) ont été obtenus en concassant un béton de formulation BSC 0,6 (Tableau 3-3). Il faut également noter que toutes les formulations présentent le même volume de granulats, et ne diffèrent donc que par la nature de ceux-ci.

2.2 Procédure de fabrication

Il est essentiel, lorsque l'on fabrique une quantité de béton nécessitant plusieurs gâchées, de s'assurer de la reproductibilité de la procédure de fabrication. Le respect de cette procédure, ainsi que les mesures d'affaissement au cône d'Abra.ms (selon la norme [NF EN 12350-2](#)) et les mesures de teneur en air occlus (selon la norme [NF EN 12350-7](#)) nous assurent une homogénéité entre les différentes gâchées, et donc une possibilité de comparaison entre elles.

Cependant, comme il a été vu dans le chapitre précédent et dans la littérature [Gome 2002] [Katz 2004] [Rao, 2005], les granulats de démolition présentent une grande variabilité de leurs caractéristiques physiques, mais également une demande en eau bien plus importante que les granulats naturels. Le contrôle de la quantité d'eau « efficace » dans le béton devient donc, pour les bétons composés de ces granulats, un problème complexe. La maîtrise de la quantité d'eau dans le béton est cruciale pour assurer la résistance et l'ouvrabilité souhaitée, et la prise en compte de l'eau absorbée par les granulats recyclés doit intégrer leur état de pré-saturation et leur cinétique d'absorption. Une étude paramétrique a donc été menée afin d'optimiser le protocole de fabrication de bétons fabriqués à partir de ces granulats.

2.2.1 *Influence de l'état de pré-saturation des granulats recyclés sur la rhéologie du béton à l'état frais*

S'il nous semble évident que la saturation des granulats recyclés avant le gâchage permet d'inhiber leur forte absorption d'eau, il existe plusieurs techniques de pré-saturation présentant des résultats plus ou moins efficaces. Une étude semblable à l'étude d'ouvrabilité sur mortiers décrite dans le chapitre précédent a été réalisée sur un béton recyclé, formulé avec des granulats recyclés industriels (BRI), une ouvrabilité visée de 9 cm, et durant laquelle deux techniques de saturation ont été testées :

- 1- Ajout de la quantité exacte d'eau d'absorption quelques minutes avant le malaxage
- 2- Immersion des granulats dans l'eau pendant 24 h avant le malaxage.

2.2.1.1 Méthode 1 – Ajout de la quantité exacte d'eau d'absorption

Connaissant la masse de granulats nécessaire à la formulation de notre béton, ainsi que le coefficient d'absorption d'eau à 24 h et la teneur en eau de ceux-ci, nous en avons déduit la quantité d'eau à ajouter aux granulats pour les pré-saturer théoriquement avant le malaxage. L'eau est répandue à l'aide d'une pissette sur les granulats qui sont soigneusement mélangés afin d'essayer d'obtenir une saturation homogène des granulats 5 minutes avant le malaxage.

2.2.1.2 Méthode 2 – Immersion pendant 24h

Cette technique consiste à immerger les granulats pendant 24h dans un bac rempli d'eau afin de les saturer complètement. Une heure avant la gâchée, les granulats sont sortis du bac d'eau et mis à égoutter sur un tamis afin de stabiliser la quantité d'eau présente en surface. Après 20 à 30 min d'égouttage, la teneur en eau totale des granulats est déterminée, à laquelle on retire la valeur du coefficient d'absorption d'eau à 24h.

$$Teneur \text{ en eau totale} = \frac{(masse \text{ humide}) - (masse \text{ sèche})}{(masse \text{ sèche})}$$

On calcule la teneur en eau de surface :

$$Teneur \text{ en eau de surface} = Teneur \text{ en eau totale} - coefficient \text{ d'absorption d'eau}$$

Cette eau de surface est retirée de l'eau de gâchage, puisque déjà apportée par les granulats.

2.2.1.3 Résultats – Valeurs d'ouvrabilité obtenues

Les valeurs d'affaissement au cône d' Abrams obtenues pour les deux méthodes sont résumées dans le Tableau 3-4. On constate que la méthode 2 permet d'atteindre l'ouvrabilité visée alors que la méthode 1 entraîne une diminution de la fluidité. Ce fait peut résulter de deux phénomènes distincts. Le premier, et le plus évident, est le fait que la méthode d'ajout de l'eau utilisée n'a pas permis d'assurer une saturation complète du réseau poreux des granulats. La seconde raison de la diminution d'ouvrabilité est très probablement la présence de déchets absorbants, tels que du bois ou du polystyrène, qui étant flottants, ont pu être éliminés dans le cas de la méthode 2, mais pas de la méthode 1. Leur caractère absorbant entraîne une diminution de l'eau efficace et donc de l'ouvrabilité.

Tableau 3-4. Ouvrabilité de bétons recyclés en fonction de la méthode de pré-saturation des granulats

Méthode	Nombre d'essais	Moyenne des valeurs d'affaissement
1	3	6 cm
2	3	9 cm

2.2.2 *Mise en œuvre*

Les résultats exposés précédemment ont conduit à choisir la méthode 2 d'immersion des granulats dans l'eau pendant 24 h avant le malaxage pour la suite de notre étude.

Une fois les granulats égouttés (Figure 3-1a), la procédure de malaxage se déroule comme suit :

- Le malaxeur (type Couvrot à pale rotative, d'une contenance de 90L max) est pré-humidifié afin d'éviter une absorption de l'eau efficace par les pales et les parois.
- Les matériaux sont introduits dans le malaxeur, en commençant par les graviers et le sable, puis le ciment.
- Les matériaux sont mélangés à « sec » durant une minute (Figure 3-1b).
- L'eau, contenant l'adjuvant si besoin, est ajoutée, et le tout est mélangé pendant deux minutes.
- Le malaxeur est vidangé dans une brouette pré-humidifiée. Nous réalisons alors un essai d'affaissement au cône d'Abams afin de s'assurer de l'homogénéité entre les différentes gâchées d'une même formulation. L'écart d'affaissement est limité à 2 cm d'écart avec la valeur cible (Figure 3-1c).
- Le béton frais est coulé dans des moules cylindriques de dimensions 16x32 cm en deux couches. Chaque couche est vibrée pendant 20 secondes sur une table vibrante afin d'éliminer les bulles d'air éventuellement présentes dans le mélange. Les moules pleins sont pesés pour déterminer la masse volumique expérimentale du béton frais, puis stockés sur une surface plane à température ambiante.



Figure 3-1. Procédure de mise en œuvre (a) égouttage des granulats (b) malaxage des matériaux secs et (c) essai d'affaissement au cône d'Abams

2.2.3 Propriétés du béton à l'état frais

Nous constatons (Tableau 3-3) que les bétons recyclés, ordinaires et à matrice à hautes performances, présentent des affaissements légèrement inférieurs à ceux des bétons naturels de référence. Cette variation peut être due à la forme des granulats, concassés pour les recyclés et un mélange de concassés et roulés pour les granulats naturels silico-calcaires. L'hypothèse d'une sous-estimation de la quantité d'eau d'absorption n'est pas non plus à négliger. De la même manière, on constate que la teneur en air occlus des bétons recyclés est légèrement plus élevée que celle des bétons naturels de référence. Cette tendance est à attribuer à la fois à la porosité des granulats recyclés, et à la variation d'affaissement. En effet, plus un béton est ferme, plus sa teneur en air occlus est élevée.

2.3 Conditionnement

24 heures après la gâchée, les éprouvettes de béton sont retirées des moules, et pesées à nouveau afin de mesurer la masse volumique du béton durci. Selon les recommandations de la RILEM TC-200, elles sont ensuite placées dans des sacs en plastiques étanches avec un tissu imbibé d'eau qui permet de maintenir une atmosphère saturée en humidité. Les éprouvettes sont ainsi conservées pendant 90 jours à 20 ± 2 °C avant d'être testées (Figure 3-2).



Figure 3-2. Conditionnement des éprouvettes

3. Méthodologie expérimentale

Nous présentons ici la démarche méthodologique et les dispositifs expérimentaux mis en place pour caractériser les propriétés physiques, thermiques et mécaniques des bétons étudiés.

3.1 Observation de l'interface « pâte-granulats » par microscopie

Des lames minces ont été préparées pour chacune des formulations de béton recyclé testées. Elles ont été étudiées par microscopie optique selon le protocole décrit au chapitre 2 (2.3.1), observations complétées par des analyses par microscopie électronique à balayage.

3.1.1 Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage est une technique d'observation de la matière sous vide à l'aide d'un faisceau d'électrons. Lors de leur interaction avec la matière, les électrons sont réémis sous différentes formes : électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons Auger ou rayons X. Ces différentes particules ou rayonnements apportent différents types d'informations sur la matière dont est constitué l'échantillon.

Lors du contact faisceau / échantillon, un électron du faisceau peut céder son énergie à un électron des couches supérieures de l'échantillon, qui sera alors éjecté sous forme d'électron secondaire. Ces électrons possèdent généralement une faible énergie (environ 50 eV) grâce à laquelle il est assez facile de les dévier avec une faible différence de potentiel. On peut ainsi facilement collecter un grand nombre de ces électrons et obtenir des images de bonne qualité avec un bon rapport signal/bruit et une bonne résolution. Ces électrons permettent d'obtenir des renseignements sur la topographie de l'échantillon.

Les électrons rétrodiffusés résultent du contact entre les électrons du faisceau primaire et des électrons des couches proches du noyau de l'atome touché. Ils sont réémis de façon quasi élastique et avec une faible perte d'énergie. Ils ont la particularité d'être sensibles au numéro atomique des atomes constituant l'échantillon. Les atomes les plus lourds réémettront plus d'électrons que les atomes plus légers. Les zones formées d'atomes avec un nombre atomique élevé apparaîtront donc plus brillantes que d'autres, c'est ce qu'on appelle le contraste de phase.

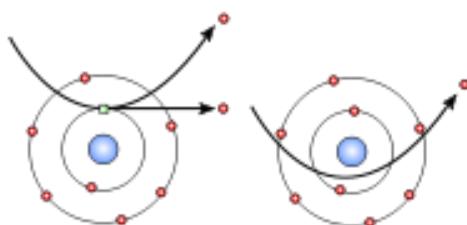


Figure 3-3. À gauche : électron secondaire, à droite : électron rétrodiffusé

L'appareil utilisé pour cette étude est un modèle LEICA S430i avec une tension d'accélération de faisceau de 15 à 20 KeV et un courant de sonde de 150 à 250 PA. Les échantillons sont séchés puis métallisés au nickel.



Figure 3-4. Microscopie électronique à balayage

3.2 Propriétés physiques

La masse volumique et la porosité accessible à l'eau des bétons sont déterminées selon la norme NF EN 12390-7. La mesure de porosité à l'eau sous vide permet de quantifier le volume de pores ouverts (accessibles à l'eau) dans un échantillon après 90 jours, mais ne permet pas d'obtenir la distribution en taille des pores.

La masse volumique et la porosité des bétons ont été mesurées à température ambiante à 90 jours. Le béton a été testé sous la forme de quart de tranches d'éprouvettes 16 x 5 cm. Chaque valeur de porosité communiquée dans ce rapport est la moyenne entre 4 mesures effectuées selon le protocole suivant:

- Les échantillons de béton sont séchés à l'étuve à 80°C jusqu'à masse constante. Leur masse sèche (m sèche) est relevée.
- Ils sont placés dans un dessicateur hermétique auquel on impose un vide de 0.1 Bar. Les échantillons sont ainsi gardés sous vide pendant 12h.
- De l'eau préalablement dégazée est introduite très progressivement dans le dessicateur de manière à remplir tous les pores des échantillons, sans y introduire de bulles d'air.
- Une fois l'échantillon saturé, il est maintenu immergé dans l'eau pendant 24 h, à la suite de quoi ses masses « hydrostatiques » (m_{sss}^{imm}) et « saturées surface sèche » (m_{sss}) sont relevées.

La masse volumique est calculée selon l'équation suivante :

$$\text{masse volumique } \rho = \frac{m \text{ sèche} \times \rho \text{ eau}}{m_{sss} - m_{sss}^{imm}}$$

La porosité est calculée selon l'équation suivante :

$$\text{porosité} = \frac{m_{sss} - m_{sèche}}{m_{sss} - m_{sss}^{imm}} \times 100$$

Où m_{sss} est la masse saturée surface sèche de l'échantillon, $m_{sèche}$ sa masse à la sortie de l'étuve, m_{sss}^{imm} sa masse saturée mesurée dans l'eau, et ρ_{eau} la masse volumique de l'eau (arrondie à 998 g.L⁻¹)

3.3 Mesure des propriétés thermiques

La connaissance des propriétés thermiques des bétons est primordiale lors de l'étude de leur comportement à haute température et en termes de consommation énergétique du bâtiment. Afin de mesurer ces paramètres, nous avons utilisé un dispositif Hot-Disk TPS 1500 de chez Thermoconcept, fonctionnant sur le principe de la méthode TPS (source plane transitoire) [Gust 1994]. Le dispositif est composé d'un four électrique (1200°C maximum), d'une centrale d'acquisition à laquelle est reliée une sonde Hot-Disk. Cette dernière, ultraplate, est constituée d'une spirale en nickel de 10 µm d'épaisseur, recouverte de deux fines couches de matériau isolant, kapton ou mica. Dans le cadre de cette étude, des sondes mica de rayon 14.61 mm ont été utilisées. En effet, le critère de validité de l'essai impose que la sonde soit considérée comme étant en milieu infini, et pour cela il lui faut un rayon $r \leq D/4$, avec D le diamètre de l'échantillon. Dans notre cas, D est égal à 8 cm, et la sonde entre bien dans les critères de validité.



Figure 3-5. Mesure des propriétés thermiques du béton à l'aide d'une sonde Hot-Disk

L'appareil mesure la conductivité thermique de l'échantillon ainsi que sa diffusivité thermique, et permet ainsi de déterminer par le calcul sa capacité thermique.

Les échantillons de béton (des disques d'éprouvettes 16x32 cm de 5 cm d'épaisseur sciés en deux) destinés à être testés ont été préparés de manière à obtenir des surfaces bien planes pour avoir le meilleur contact possible avec la sonde. La sonde agit en émetteur de chaleur et en sonde de

température. Sous l'effet d'un courant électrique, la température de la sonde augmente et la chaleur diffuse au sein du matériau. L'augmentation de la température enregistrée par le disque est dépendante des propriétés thermiques du matériau. En effet, si le matériau est très isolant, la température enregistrée par la sonde augmentera très rapidement. Au contraire, avec un matériau très conducteur, l'augmentation de température sera bien moindre sous l'effet de la même sollicitation.

Des essais ont d'abord été réalisés sur des échantillons non chauffés, à température ambiante. Les échantillons ont été pré-séchés à l'étuve à 80°C afin d'éliminer toute l'eau libre. En effet, celle-ci a une influence significative sur les mesures puisque l'eau possède ses propres propriétés thermiques. Le refroidissement après séchage jusqu'à température ambiante est fait dans des sacs étanches. A température ambiante, chaque valeur obtenue est la moyenne de 5 mesures réalisées en déplaçant la sonde à la surface de l'échantillon, et une fois l'état isotherme retrouvé. Nous nous imposons un délai d'une heure entre chaque mesure afin d'éviter toute perturbation éventuellement due à la mesure précédente. Nous avons travaillé avec des puissances comprises entre 0.4 et 0.6 watts et des temps de mesures compris entre 40 et 60 secondes. De manière générale, nous avons constaté que les bétons à matrice haute performance nécessitaient une puissance plus grande et un temps de mesure plus long pour obtenir des résultats satisfaisants.

3.4 Mesure des propriétés mécaniques

3.4.1 *Essai de résistance à la rupture en compression uni-axiale*

Pour chacune des formulations, quatre éprouvettes sont surfacées au soufre. Le surfaçage a pour but d'obtenir une planéité parfaite des faces de chargement ainsi que l'orthogonalité de celles-ci par rapport aux génératrices du cylindre. Le parallélisme entre les surfaces extrêmes garantit l'absence de moment parasite et donc de contrainte de traction qui induirait une diminution de la valeur de résistance à la rupture. Par ailleurs, la presse utilisée dispose d'un système de rotule/appui fixe. L'appui fixe permet d'aligner l'axe de l'éprouvette avec celui de la machine, tandis que la rotule gomme en partie les défauts de perpendicularité et parallélisme. Après 2h, délai nécessaire au durcissement du soufre, l'essai mécanique est réalisé au L2MGC sur une presse hydraulique INSTRON de 3000 kN assistée par un ordinateur. L'éprouvette est positionnée sur la presse (Figure 3-7a) et chargée mécaniquement à une vitesse de 0.5 MPa.s⁻¹, jusqu'à la rupture. Quatre essais sont réalisés pour chaque formulation.

3.4.2 *Essais de résistance à la rupture en traction par fendage*

Les conditions de préparation de l'échantillon sont les mêmes que pour l'essai de compression uniaxiale, à la différence près que les éprouvettes n'ont pas besoin d'être surfacées au soufre. L'essai de traction par fendage, également appelé essai brésilien, se déroule comme décrit sur la Figure 3-6. Un effort de compression est appliqué sur deux génératrices opposées du cylindre. L'utilisation de baguettes en bois permet de mieux répartir l'effort de compression. La valeur de contrainte à la rupture en traction par fendage est déterminée grâce à l'équation suivante :

$$ft = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot \phi \cdot L}$$

Avec P la charge maximale appliquée sur l'éprouvette, ϕ le diamètre du cylindre, et L sa longueur.

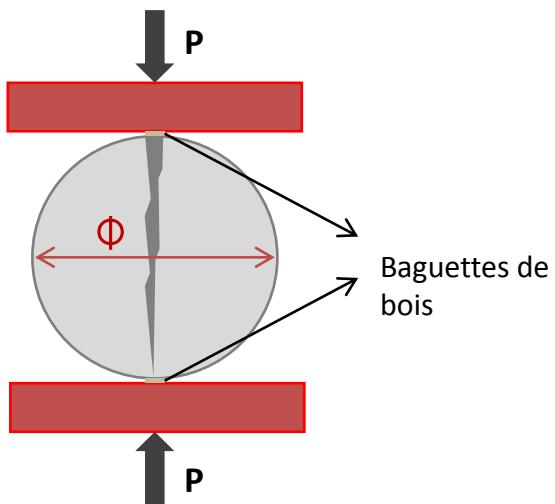


Figure 3-6. Schéma de l'assai mécanique de traction par fendage (essai brésilien)

3.4.3 Mesure du module d'élasticité dynamique

Nous avons choisi de déterminer le module d'élasticité par mesure de vitesse de propagation d'ondes accoustiques à l'aide d'un appareil de test ultrasonique – Pundit lab selon la norme NF EN 12504-4. L'appareil envoie un signal électrique dans l'échantillon. Ce signal est transformé en ondes longitudinales par un transducteur piézoélectrique. L'onde se propage dans l'échantillon d'un transducteur à l'autre, puis est réfléchie vers le transducteur de départ. L'appareil mesure le temps t entre les deux échos successifs, à partir duquel on déduit la vitesse des ondes ultrasonores longitudinales :

$$v = \frac{L}{t}$$

Avec v la vitesse des ondes ultrasonores, et L la longueur de l'échantillon étudié.

La valeur de la vitesse permet de remonter au module d'élasticité dynamique du matériau grâce à l'équation suivante :

$$E = \frac{v^2 \times (\rho - \rho v) \times (\rho - 2\rho v)}{(1 - v)}$$

Avec E le module d'élasticité, v la vitesse des ondes ultrasonores, ρ la masse volumique du matériau étudié, et v le coefficient de poisson ($v = 0,2$ pour le béton).

Les deux transducteurs sont couplés de façon alignée sur deux faces parallèles et égalisées par ponçage de l'échantillon. Il est important d'avoir un bon contact entre le béton et la face de chaque

transducteur. Le contact acoustique transducteur/échantillon est assuré en utilisant de la vaseline et en appuyant le transducteur contre la surface du béton. La longueur de parcours de l'onde doit être supérieure ou égale à 10 cm. Nous travaillons sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm sciées en deux, soit 11 x 11 cm. Les résultats présentés dans ce chapitre sont les valeurs moyennes obtenues sur 4 échantillons par formulation à 90 jours.

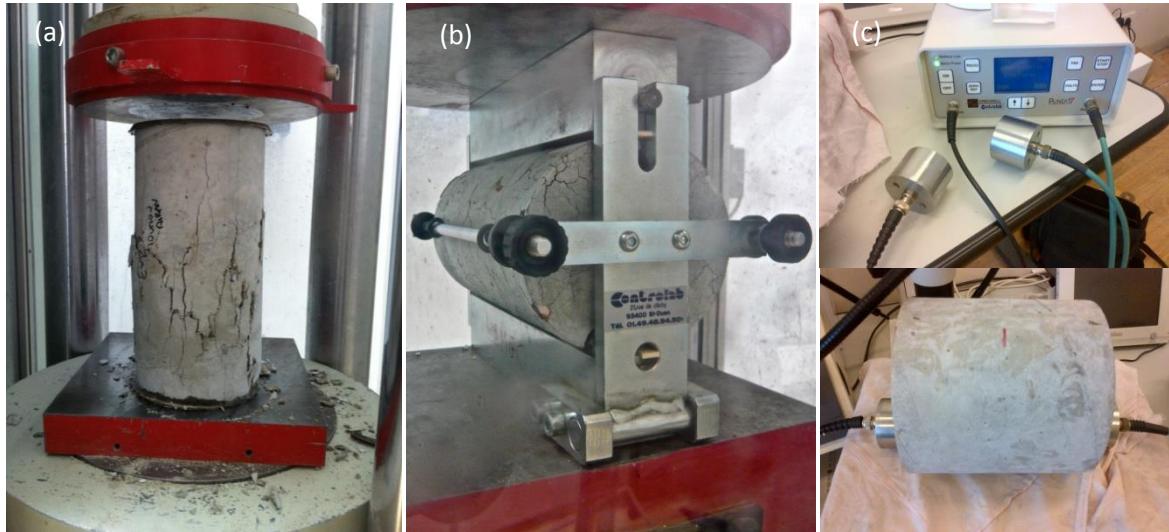


Figure 3-7. Mesures des propriétés mécaniques (a) résistance à la rupture en compression (b) essai de traction par fendage, et (c) mesure du module d'élasticité dynamique

4. Résultats expérimentaux et discussion

4.1 Zone de transition interfaciale

La zone de transition interfaciale (ou ITZ), large de quelques dizaines de μm , et située au niveau des interfaces (pâte / granulat ou ancienne pâte / nouvelle pâte) est connue pour être le maillon faible du béton ordinaire. En effet, cette zone est plus poreuse, et l'interface étant physiquement marquée, elle est généralement le point de départ de fissurations lors des sollicitations mécaniques du matériau.



Figure 3-8. Différentes interfaces dans les bétons de granulats recyclés

Les bétons de granulats recyclés ont la particularité de présenter un plus grand nombre d'ITZ que les bétons naturels, et de natures plus variées (Figure 3-8). En effet, on y trouve trois types d'interface : la frontière entre le granulat naturel d'origine et l'ancienne pâte, la frontière entre le granulat d'origine et la nouvelle pâte, ou encore la frontière entre l'ancienne et la nouvelle pâte. Nous avons cherché à identifier et observer ces interfaces par microscopie optique.

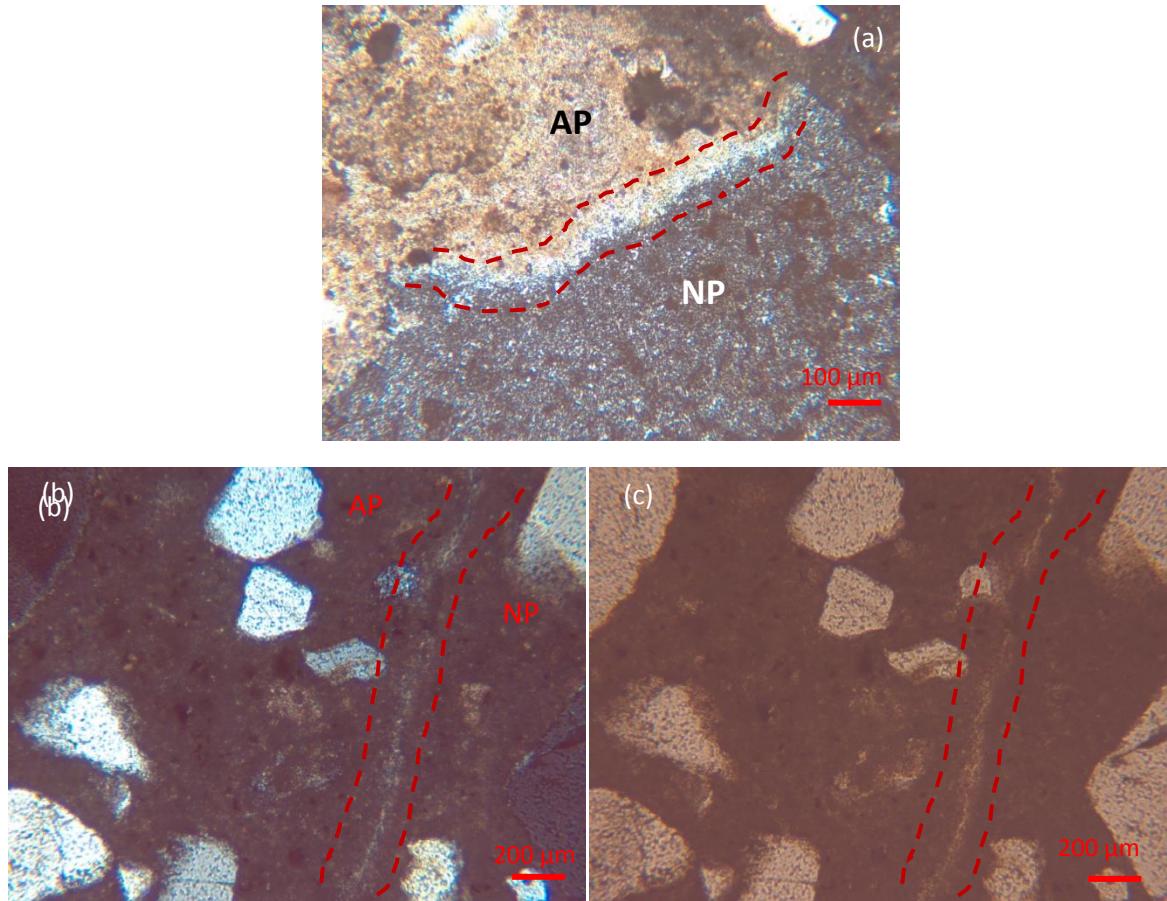
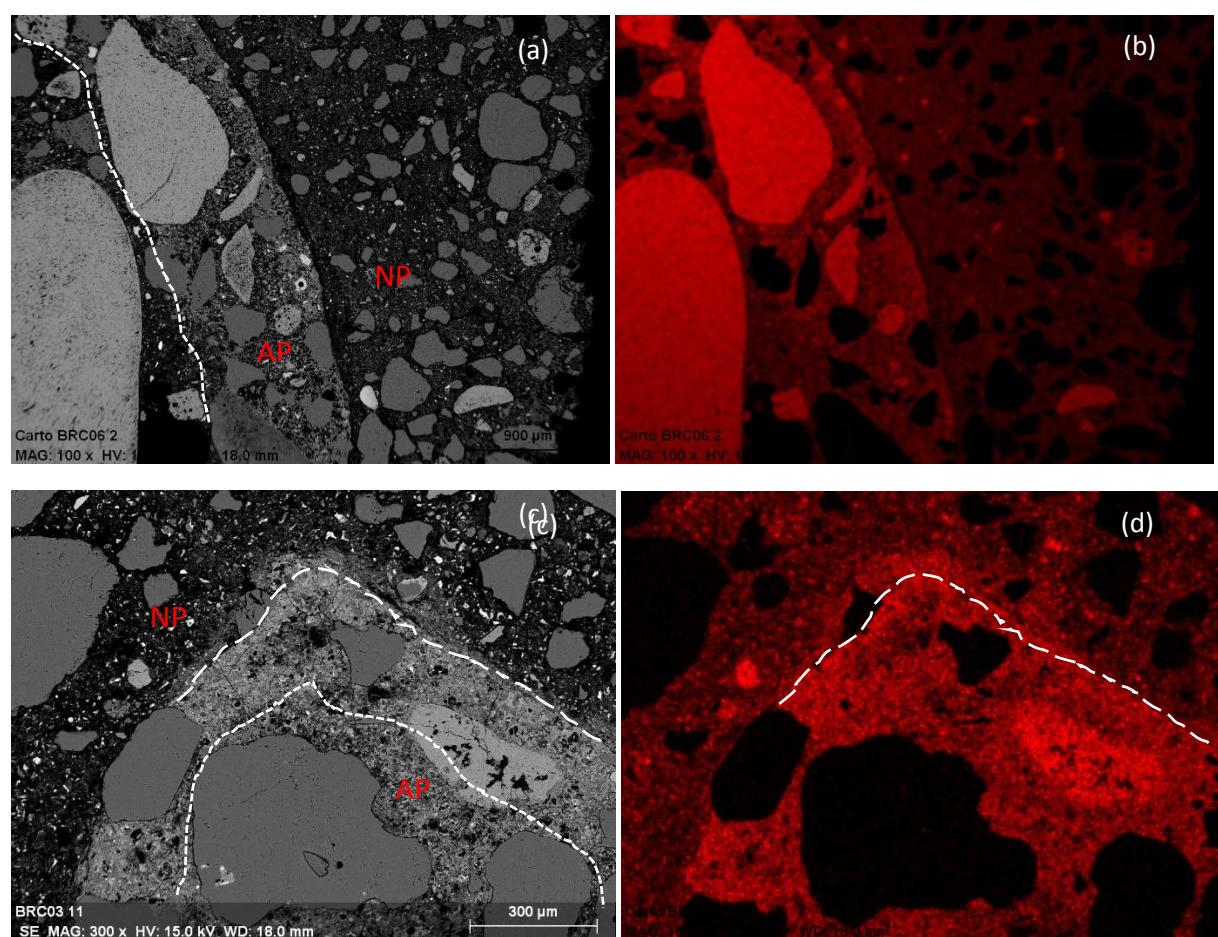


Figure 3-9. Images par microscopie optique de (a) l'interface pâte-granulat dans un échantillon de BRI 0,3 (b) et (c) l'interface entre l'ancienne et la nouvelle pâte d'un échantillon de BRL 0,6 (b) et (c) représentent la même section, (b) sous lumière polarisée analysée et (c) sous lumière polarisée non analysée (AP : ancienne pâte ; NP : nouvelle pâte)

Nous avons systématiquement constaté un liseré blanc au niveau des interfaces, quelles qu'elles soient. Ce phénomène visuel n'est pas dû à la présence de porosité. L'air est un matériau isotrope, et apparaît blanc sous une lumière polarisée non analysée, mais noir sous une lumière polarisée analysée. Ici en revanche, ce liseré apparaît blanc dans les deux cas et est donc dû à un autre composé.

Des analyses par microscopie MEB ont également été réalisées sur 3 échantillons par type de béton recyclé. Ici encore, un liseré plus clair, large de quelques dizaines de μm , est observé en analyse par contraste chimique. Ce liseré prend la forme d'un gradient, très contrasté au niveau de l'interface et s'estompant à mesure qu'il progresse dans la pâte (Figure 3-10).



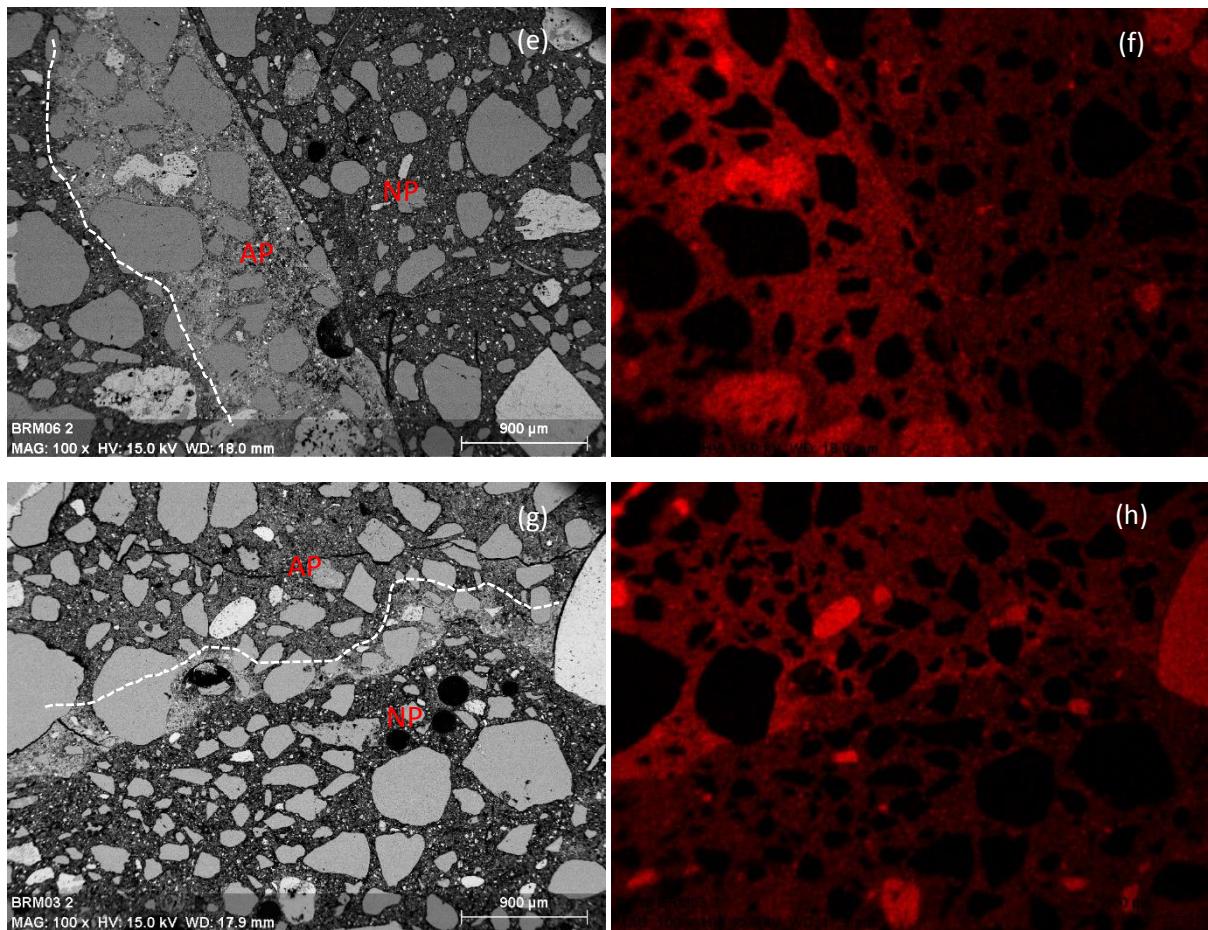


Figure 3-10. Microscopie électronique à balayage (contraste chimique). BRI 0.6 en contraste chimique (a); BRI 0.6 cartographie Ca (b); BRI 0.3 contraste chimique (c); BRI 0.3 cartographie Ca (d); BRL 0.6 contraste chimique (e); BRL 0.6 cartographie Ca (f); BRL 0.3 contraste chimique (g); BRL 0.3 cartographie Ca (h) (AP : ancienne pâte ; NP : nouvelle pâte)

Afin d'identifier le composé responsable de ce liseré, des cartographies élémentaires ont été réalisées et celles du calcium (Ca) (Figure 3-10 b, d, f et h) apparaissent comme les plus contrastées. Elles nous permettent de l'identifier comme principal élément de cette bordure. De manière générale, il a été observé que les anciennes pâtes étaient plus riches en calcium, potassium (Figure 3-11) et sodium [Wass 96] et que la concentration de ces éléments était plus importante au niveau de la bordure.

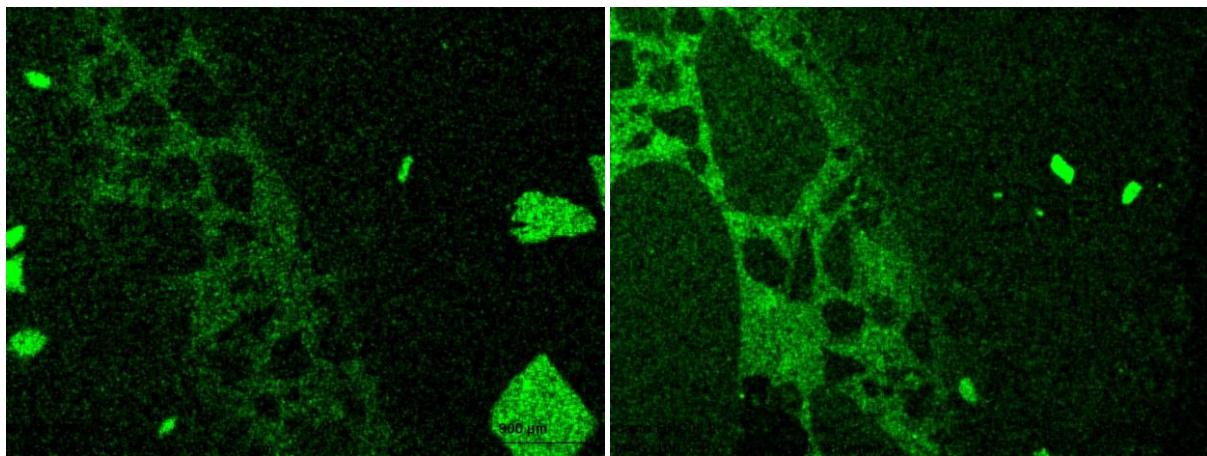


Figure 3-11. Microscopie électronique à balayage, cartographie élémentaire du K (potassium) au niveau de l'interface ancienne pâte / nouvelle pâte de (a) un granulat de BRL 0,6 ; (b) un granulat de BRI 0,6

La présence de cette zone plus riche en Ca et K pourrait être expliquée de la façon suivante. Lorsque le ciment et l'eau entrent en contact pendant le malaxage, les ions présents dans le ciment passent en solution et se dissolvent dans la solution interstitielle [Olli 1995]. Alors, selon la première loi de Fick qui énonce que « le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration », les ions en solution migrent vers une zone moins concentrée : l'ancienne pâte. Durant les premières minutes à premières heures d'hydratation, les ions diffusent au sein de l'ancienne pâte, créant ce gradient de concentration visible sur les images en microscopie.

On constate que les bordures claires sont plus marquées dans le cas des BRI. Ce phénomène s'explique probablement par l'âge de la pâte. En effet, le béton parent qui avait servi à obtenir les GRI a été coulé dans les années 70. Nous avons d'ailleurs observé en DRX (chapitre 2, point 3.2.2) qu'on n'y trouvait plus trace de portlandite ou de silicates de calcium. Tous ces éléments confirment que les réactions d'hydratation ont bien eu lieu, et qu'il ne reste plus de calcium (potassium et sodium) « libres » dans l'ancienne pâte des GRI. Les GRL au contraire sont plus jeunes, et les analyses DRX ont confirmé la présence de silicates de calcium, et donc le fait que des réactions d'hydratation sont encore en cours. On peut alors supposer que la différence de concentration en ions calcium entre les deux pâtes est plus faible dans ce cas-là, ce qui explique un liseré plus discret.

Dans le cas des bétons recyclés à matrice hautes performances, on constate que la bordure blanche ne s'arrête pas de façon nette au niveau du contact, mais déborde sur quelques dizaines de μm dans la nouvelle pâte (Figure 3-10 c et d). Il peut s'agir ici d'un phénomène de cure interne. En effet, nous avons vu que les granulats ont été pré-saturés en eau, et sont introduits ici dans une pâte assez pauvre en eau (rapport E/C = 0,3). Lorsque l'hydratation du ciment fait chuter la quantité d'eau dans les pores capillaires de la pâte de ciment durcie, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires. Cette eau étant localement très concentrée en composé calcique au niveau de l'interface, elle l'entraîne avec elle en migrant. Ce mûrissement humide interne est d'autant plus efficace que le rapport E/C est faible. Les faibles rayons des capillaires de ces bétons « hautes-performances » expliquent l'intensité plus élevée des forces de succion.

Le composé riche en calcium n'est pas identifié. Il pourrait aussi bien s'agir de portlandite que de gel de CSH. Cependant, quelle que soit la nature de ce composé, et qu'il ait une résistance mécanique intrinsèque (gel de CSH) ou pas (portlandite), on peut supposer qu'il contribue à l'amélioration de la

zone de transition interfaciale en remplaçant ses nombreux pores, et en conduisant possiblement à la création de nouvelles liaisons chimiques entre l'ancienne et la nouvelle pâte.

4.2 Propriétés physiques

La mesure de la masse volumique (ou densité) apparente et de la porosité des bétons permet de caractériser leur microstructure. Nous travaillons ici à composition et volume de pâte constante, mais la particularité des granulats recyclés peut avoir un impact non négligeable sur ces caractéristiques à l'échelle globale du matériau.

4.2.1 Masse volumique des bétons

La masse volumique apparente des bétons secs étudiés a été déterminée sur du béton durci après 90 jours. Les valeurs présentées sur la Figure 3-12 sont la moyenne des mesures effectuées sur au moins 4 échantillons par formulation.

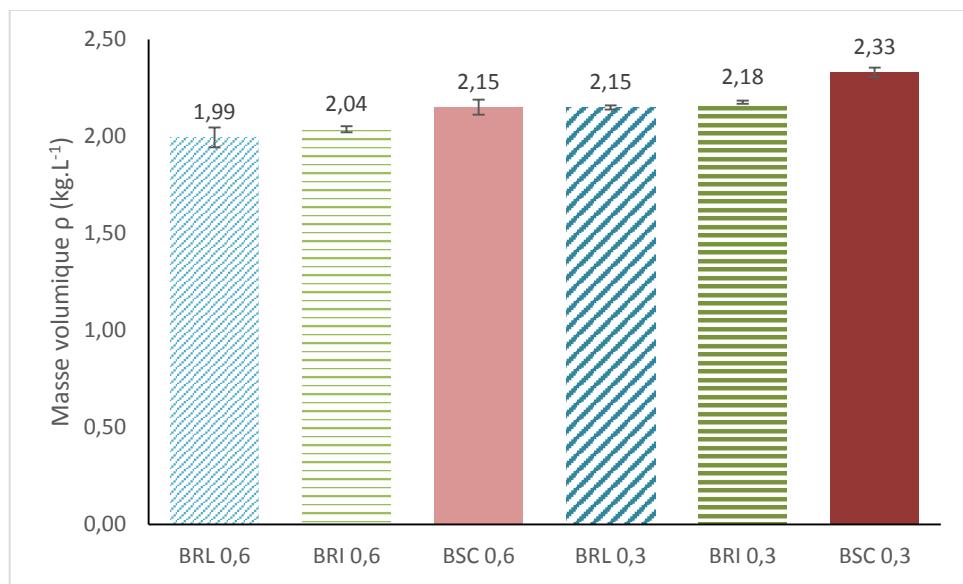


Figure 3-12. Masse volumique apparente des bétons recyclés et de référence séchés à l'étuve

Les bétons de granulats recyclés présentent une masse volumique plus faible que le béton naturel de référence. Cette variation est due à la densité plus faible des granulats recyclés par rapport au granulat naturel. En effet, les gravillons représentent environ 50 % de la masse totale du béton et leur masse volumique est 8 % inférieure à celle du granulat silico-calcaire naturel utilisé dans le béton de référence. La mesure indique en effet, pour les bétons recyclés, des masses volumiques environ 5% inférieures à celles des bétons naturels de référence.

4.2.2 Porosité accessible à l'eau des bétons

Les valeurs de porosité accessible à l'eau sous vide présentées sur la Figure 3-13, sont le résultat de la moyenne faite sur 4 mesures effectuées pour chaque béton à température ambiante.

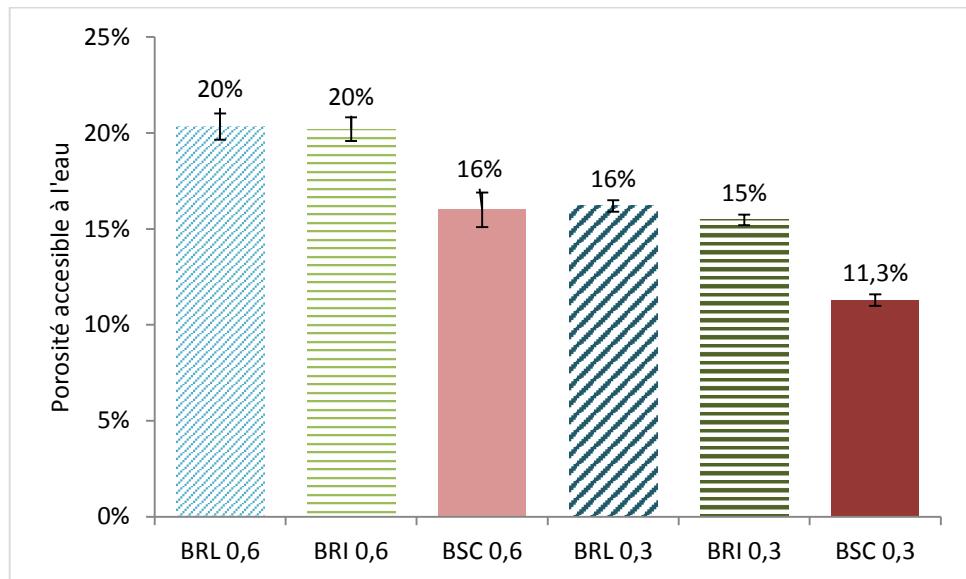


Figure 3-13. Porosité accessible à l'eau des bétons recyclés et de référence étudiés

On constate que les bétons recyclés à matrice ordinaire ou hautes-performances sont 4 à 5 % plus poreux que leurs bétons de référence associés. Cette différence est principalement due à la présence des granulats recyclés avec leur gangue de mortier qui les entoure. Il est donc logique de trouver un écart constant entre les formulations de bétons ordinaires et celles de bétons à matrice hautes performances puisqu'elles contiennent le même pourcentage de granulats.

La valeur de porosité légèrement inférieure du BRI par rapport au BRL dans le cas des bétons ordinaires s'explique notamment par la plus forte porosité des granulats de laboratoire par rapport aux granulats industriels.

4.3 Propriétés thermiques

Les mesures des caractéristiques thermiques (conductivité, diffusivité, chaleur spécifique) à température ambiante des bétons étudiés sont présentées dans le Tableau 3-5. Les valeurs citées sont les moyennes obtenues sur cinq mesures réalisées en déplaçant la sonde Hot-Disk sur la surface de l'échantillon d'une distance au moins égale au diamètre de la sonde. Les valeurs présentées pour les bétons de référence de granulat silico-calcaire (BSC 0,6 et BSC 0,3) sont celles obtenues par Zhi Xing [Xing 2011] dans son travail de thèse sur l'influence de la nature des granulats sur le comportement du béton à haute température. Les chaleurs spécifiques sont calculées à partir des capacités thermiques volumiques mesurées et des masses volumiques présentées sur la Figure 3-12.

Tableau 3-5. Propriétés thermiques des bétons étudiés à température ambiante

		BRI 0,6	BRL 0,6	BSC 0,6	BRI 0,3	BRL 0,3	BSC 0,3
conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Moy. Ep 1	1,62	1,6	-	2,10	1,98	-
	Moy. Ep 2	1,57	1,62	-	2,09	2,09	-
	Moy. Ep 3	1,53	1,54	-	1,98	1,95	-
	moyenne	1,57	1,57	1,86	2,05	2,04	2,06
	écart type	0,04	0,06	0,08	0,06	0,09	0,18
Diffusivité thermique (mm ² .s ⁻¹)	Moy. Ep 1	1,09	1	-	1,16	1,41	-
	Moy. Ep 2	1,13	1,03	-	1,03	1,21	-
	Moy. Ep 3	1,07	0,97	-	1,54	1,13	-
	moyenne	1,10	1,00	1,05	1,33	1,25	1,21
	écart type	0,03	0,03	0,15	0,26	0,14	0,18
Capacité thermique volumique (MJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Moy. Ep 1	1,50	1,46	-	1,58	1,57	-
	Moy. Ep 2	1,53	1,65	-	1,6	1,64	-
	Moy. Ep 3	1,23	1,68	-	1,43	1,62	-
	moyenne	1,43	1,58	1,79	1,54	1,61	1,72
	écart type	0,17	0,12	0,22	0,09	0,04	0,11
Chaleur spécifique (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	moyenne	0,70	0,79	0,83	0,71	0,75	0,74

On constate que les bétons recyclés, à matrice ordinaire ou hautes performances, présentent une conductivité thermique plus faible que les bétons naturels de référence (1,57 W.m⁻¹.K⁻¹ pour les bétons recyclés ordinaires contre 1,86 W.m⁻¹.K⁻¹ pour BSC 0,6) et (2,05 et 2,04 W.m⁻¹.K⁻¹ respectivement pour BRI 0,3 et BRL 0,3 contre 2,06 W.m⁻¹.K⁻¹ pour BSC 0,3). La conductivité thermique des bétons est liée au volume et à la distribution de la porosité ainsi qu'à la minéralogie des constituants. Comme les granulats d'origine des recyclés et granulats naturels du béton de référence sont de même origine, la différence de conductivité peut être attribuée au volume de pâte supplémentaire des granulats recyclés. La pâte étant plus poreuse que les granulats, elle présente une plus faible conductivité thermique. Rappelons qu'une diminution de la conductivité du béton favorise sa capacité d'isolation.

La conductivité thermique λ , la masse volumique ρ , et la chaleur spécifique C_p , interviennent sur le transfert de la chaleur en régime transitoire (diffusivité) selon l'équation : diffusivité = $\lambda / (C_p \times \rho)$. Les résultats précédents ont montré que la diminution de la conductivité thermique pour les bétons de granulats recyclés s'accompagnait d'une diminution de la capacité thermique volumique ce qui explique le peu de variation de diffusivité entre les bétons de granulats recyclés et naturels.

4.4 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des bétons (résistance en compression uni-axiale, résistance en traction par fendage, et module d'Young dynamique) sont déterminées à température ambiante à 90 jours selon les modes opératoires décrits au point [Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#). Ces essais ont permis d'analyser l'influence des deux types de granulats recyclés sur le comportement mécanique des bétons ordinaire et à matrice hautes performances. Nous présentons les résultats, puis les discutons en comparant le béton ordinaire de laboratoire et son béton parent afin d'analyser l'influence de la quantité de pâte et du nombre d'interfaces. Nous comparons également les bétons de granulats recyclés entre eux afin de déterminer l'impact de la qualité du granulat recyclé sur les propriétés mécaniques du béton les incorporant.

4.4.1 Résultats des mesures

Les propriétés mécaniques des bétons recyclés et naturels étudiés, telles que la résistance en compression uni-axiale, la résistance en traction par fendage et le module d'élasticité dynamique sont résumées dans le Tableau 3-6 et illustrées sur la Figure 3-14.

Tableau 3-6. Propriétés mécaniques des bétons étudiés à température ambiante

		BRI 0,6	BRL 0,6	BSC 0,6	BRI 0,3	BRL 0,3	BSC 0,3
Résistance en compression uni-axiale (MPa)	moyenne	34,2	31,2	36,2	55	49,1	68,6
	écart type	3,4	3,3	0,88	3,2	5,5	0,6
Résistance en traction par fendage (MPa)	moyenne	4,44	4,38	3,7	5,64	5,3	6,1
	écart type	0,4	0,5	0,33	0,15	0,36	0,76
Module d'Young dynamique (GPa)	moyenne	31,8	35,6	37	39	45,5	47
	écart type	1,84	2,89	0,04	2,89	0,26	0,76

Les résultats présentés sont la moyenne des valeurs obtenues sur 4 éprouvettes pour chacune des formulations étudiées.

On constate que la résistance en compression des bétons recyclés est plus faible que celle des bétons ordinaires de référence, et que cette variation est d'autant plus grande que le E/C est élevé avec 2 à 5 MPa de différence pour les bétons ordinaires contre 14 à 20 MPa de différence pour les bétons à matrice hautes performances. En revanche, les résistances en traction par fendage des bétons ordinaires recyclés sont plus élevées que celles du béton ordinaire de référence d'environ 15%. On constate également que les modules d'Young des bétons industriels sont plus faibles que ceux des bétons de laboratoire, et ceci quelle que soit la compacité de la matrice.

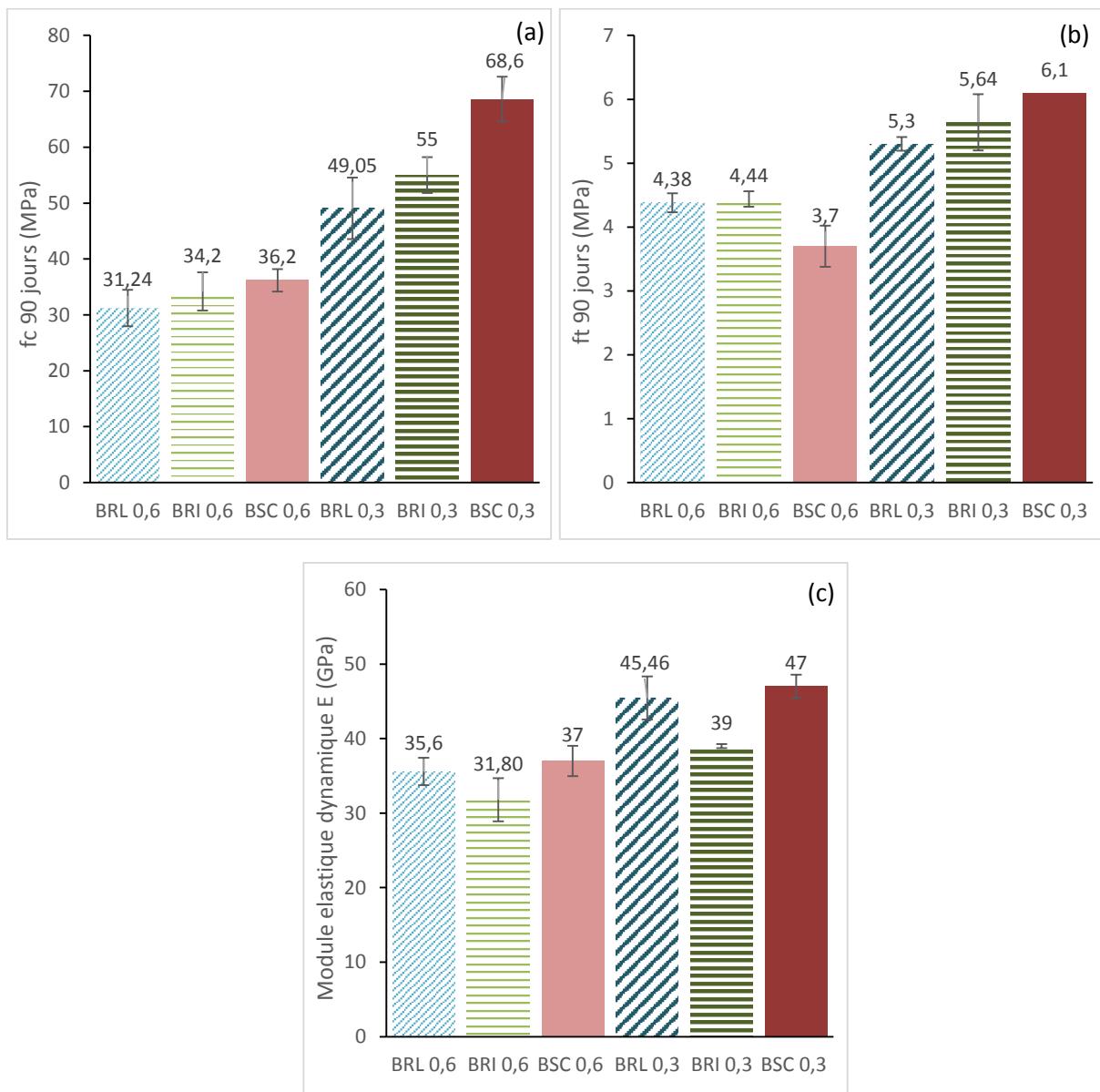


Figure 3-14. Propriétés mécaniques des bétons recyclés et de référence étudiés (a) résistance à la rupture en compression ; (b) résistance à la rupture en traction; (c) module d'Young dynamique

4.4.2 Comparaison du béton de granulat recyclé de laboratoire et son béton parent

Les granulats GRL ont été obtenus à partir de béton BSC 0,6 concassé. BRL 0,6 et BSC 0,6 sont donc composés des mêmes granulats silico-calcaires, et d'une matrice cimentaire identique. Ils diffèrent par le volume total de pâte qui les compose (plus grand dans le cas de BRL 0,6) et par le nombre de zones de transition interfaciale qu'ils contiennent (plus nombreuses dans le cas de BRL 0,6). Les deux bétons sont autrement théoriquement identiques en tout point. On peut donc ici évaluer l'influence de la quantité totale de pâte et du nombre d'interfaces.

Dans les bétons de granulats naturels à matrice ordinaire, le composant le moins résistant est, selon le granulat, la zone de transition pâte / granulat ou la pâte. A la différence du béton de granulat naturel, le béton de granulats recyclés possède plusieurs types d'interface : ancienne pâte / nouvelle pâte, granulats d'origine / ancienne pâte et granulat d'origine / nouvelle pâte. Une autre différence réside aussi en la taille des gravillons d'origine compris dans le granulat recyclé qui est plus petite que dans le béton parent. Il y aura ainsi plus de zones interfaciales mais de moindre largeur puisque la largeur de l'ITZ diminue avec la taille des granulats. La résistance de l'interface dépend des liaisons physico-chimique entre la pâte et l'inclusion, de la largeur de l'ITZ et des différences de comportement élastique entre la pâte et l'inclusion.

On observe que la résistance en compression du BRL 0,6 (31.2 MPa) est légèrement inférieure à celle du BSC 0,6 (34.2 MPa). Ceci est cohérent avec la plus forte porosité du béton de granulat recyclé à relier à la fraction volumique plus importante de pâte dans le béton. Cependant, lorsqu'on s'intéresse aux valeurs de résistance à la rupture en traction, on constate qu'elles sont assez proches pour les deux bétons, voire meilleure pour le BRL 0,6. La résistance au fendage est fortement liée à la résistance de l'interface pâte-granulat. Cette observation a déjà été relatée dans la littérature [Kou 2011] [Evan 2007], et semble montrer que la qualité des interfaces du béton recyclé est au moins aussi bonne que celle du béton de granulat naturel de référence.

La forme concassée du granulat, et donc sa rugosité implique une meilleure imbrication mécanique entre les deux pâtes. De plus, nous avons observé au MEB la présence d'une interaction physico-chimique entre les pâtes et un dépôt dans les pores de l'inclusion. De plus l'ancienne et la nouvelle pâte ayant la même composition, elles ont le même comportement élastique ce qui limite l'augmentation des contraintes à l'interface. L'ensemble de ces paramètres va dans le sens d'une bonne résistance de l'interface ancienne pâte/nouvelle pâte.

L'interface entre l'ancienne pâte et le granulat d'origine quant à elle est moins poreuse que dans le béton de référence car l'âge de l'ancienne matrice étant plus élevé, l'hydratation est plus avancée. De plus, nous avons vu que le granulat d'origine des BRL est plus petit que le granulat naturel de référence, et plus les inclusions sont petites, plus la fissuration qui s'initie à l'interface est petite, et la coalescence (formation de macro-fissures) est tardive.

Ainsi, on peut supposer que les valeurs de résistance en compression plus faibles pour le BRL 0,6 sont uniquement liées à la plus grande quantité de pâte par rapport aux BSC 0,6.

De même, le module d'élasticité dynamique légèrement plus faible dans les cas des BRL, reflète l'influence du nombre d'interfaces et de la quantité totale de pâte.

4.4.3 Comparaison entre le BRL et le BSC à matrice hautes performances

Lorsqu'on s'intéresse aux bétons à matrice hautes performances en revanche, on constate que le béton recyclé de laboratoire (BRL 0,3) présente des résistances à la rupture (compression et fendage) clairement inférieures à celles du béton de granulat naturel de référence (BSC 0,3). Ceci permet de noter l'importance de la qualité des granulats recyclés utilisés, soit l'impact que peut avoir la résistance mécanique du « béton parent ». En effet, on sait que la rupture est gouvernée par le maillon mécaniquement faible du matériau. Dans le cas du béton recyclé BRL, la zone de faiblesse au

niveau de laquelle s'initiera la rupture est l'ancien mortier composant les granulats recyclés (GRL) qui, nous le savons, ont été obtenus à partir d'un béton ordinaire.

Il est ici possible de conclure sur le fait qu'il est impossible de formuler sans ajouts un béton haute-performance à partir de granulats recyclés obtenus en concassant un béton de résistance inférieure [Andr 2014] [Thom 2013].

Les valeurs de résistance à la rupture en traction et de module d'élasticité sont relativement proches dans les deux cas, montrant ici encore la bonne qualité des zones de transition interfaciale ainsi que la relativement faible influence de la quantité de pâte.

4.4.4 *Comparaison entre les deux types de béton recyclé, BRL et BRI*

Les bétons recyclés industriels (BRI) présentent des résistances à la rupture en compression uniaxiale légèrement supérieures à celles des bétons de granulats recyclés de laboratoire (BRL). Ces différences de résistance peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs :

- La résistance initiale du béton parent. Elle est connue (de 35 MPa) dans le cas des GRL, mais inconnue dans le cas des GRI. Cependant, ces granulats proviennent d'un chantier de démolition d'un immeuble d'une quinzaine d'étages, et même si rien ne le confirme, on peut supposer que la résistance en compression du béton parent est légèrement supérieure à 35 MPa.
- L'âge du béton parent. En effet, le mortier entourant les GRL n'est vieux que de quelques mois, alors que celui contenu dans les GRI a plus d'une quarantaine d'années. L'hydratation a pu être poursuivie plus longtemps entraînant ainsi une résistance plus élevée.
- La quantité de pâte. Nous avons vu précédemment (chapitre 2) que les GRL sont composés de plus de pâte que les GRI. Or, la quantité de pâte semble avoir une légère influence sur la résistance en compression des bétons.

Un résultat plus surprenant réside dans la valeur d'un module d'élasticité clairement plus faible des BRI par rapport aux BRL. Les deux bétons recyclés (aussi bien à matrices ordinaires qu'à matrices hautes performances) sont pourtant composés de la même matrice, et les granulats recyclés industriels contiennent un petit peu moins de pâte que les granulats recyclés de laboratoire. Les observations réalisées sur les granulats recyclés industriels (chapitre 2) ont montré la présence de « polluants ». Or le bois, le bitume ou le plastique possèdent un module d'élasticité inférieur à celui des mortiers, faisant ainsi chuter la valeur globale du module d'élasticité du béton.

5. Conclusion

Cette étude expérimentale a mis en évidence dans quelle mesure l'utilisation de granulats recyclés influence les propriétés physiques et mécaniques des bétons selon le rapport E/C de la matrice.

L'étude a aussi montré l'influence de la qualité du granulat recyclé en comparant des bétons réalisés avec des granulats recyclés de laboratoire et des granulats industriels.

Nous avons vu que les bétons de granulats recyclés diffèrent des bétons de granulats naturels par leur plus grande quantité de pâte et leur plus grand nombre de zones de transition interfaciales. Les résultats décrits dans ce chapitre montrent notamment que ces caractéristiques particulières confèrent aux bétons recyclés une plus grande porosité qu'aux bétons naturels de référence. La porosité des granulats recyclés a un impact important sur la résistance en compression du béton recyclé, et ce particulièrement à faible E/C : les bétons recyclés à matrice hautes performances présentent une perte de résistance d'environ 30 % par rapport au béton de référence.

Les granulats recyclés ont en revanche un plus faible impact sur le module d'élasticité et sur la résistance en traction, qui est connue pour être fortement liée à l'adhérence pâte-granulat. Le béton recyclé contenant au moins deux fois plus d'interfaces que le béton naturel, on se serait attendu à une vraie différence dans les valeurs de f_t . Ces valeurs sont cependant similaires et nous permettent de conclure quant à la bonne qualité d'interface dans les bétons recyclés. Des analyses MEB ont d'ailleurs indiqué une forte concentration d'un composé riche en calcium au niveau des frontières « ancienne pâte / nouvelle pâte » dans les bétons recyclés, qui améliore probablement la qualité de l'interface.

La résistance à la rupture en compression est gouvernée par l'élément du système le plus faible mécaniquement. Dans les bétons ordinaires, le maillon faible étant la pâte, on n'observe que très peu d'influence de la nature des granulats. Dans les bétons à matrice hautes performances en revanche, les granulats constituent le maillon faible, et dans le cas des bétons recyclés, il s'agit plus précisément du mortier contenu dans ses granulats. La qualité du granulat recyclé dépend en effet de la qualité de son béton parent. Il n'est théoriquement pas possible de formuler un béton de granulat recyclé aux performances mécaniques supérieures à celle du béton parent des granulats utilisés.

A température ambiante, les BRI testés sont légèrement plus résistants que les BRL testés, mais présentent un module d'élasticité plus faible. Ces résultats s'expliquent probablement par l'âge et la plus faible quantité de pâte contenue dans les GRI par rapport aux GRL. En effet, les GRI proviennent d'un béton âgé d'une quarantaine d'années, dans lequel toutes les réactions d'hydratation sont terminées, renforçant ainsi la résistance en compression. Le plus faible module d'élasticité observé pour le BRI est très probablement dû à la présence, parmi les GRI, de déchets de démolition non cimentaires dont la valeur de module d'Young est inférieure à celle du béton.

Références bibliographiques

- NF EN 12390-7** Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci (2012)
- NF EN 12350-2** Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement (2012)
- NF EN 12350-7** Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité (2012)
- NF EN 12504-4** Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son
- [Andr 2014]** Gonzalez Andreu, Etxeberria Miren, Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 52 (2014) 227–235
- [Dre 2002]** G. Dreu, J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, huitième édition, Edition Eyrolles, 2002
- [Evan 2007]** L. Evangelista, J. de Brito, Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 397–401
- [Gome 2002]** Jose M.V. Gomez-Soberon, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1301–1311
- [Gust 1994]** Mattias Gustavsson, Ernest Karawacki, Silas E. Gustafsson, Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors, *Rev. Sci. Instrum.* 65, (1994) 3856
- [Katz 2004]** Amnon Katz, Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering* 16-6 (2004) 597-603
- [Kou 2011]** Shi-Cong Kou, Chi-Sun Poon, Miren Etxeberria, Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete, *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 286–291
- [Olli 1995]** J.P. Ollivier, J.C. Maso, and B. Bourdette, Interfacial Transition Zone in Concrete, *Advanced Cement Basic Materials*, 2, (1995) 30-38
- [Rao 2007]** Akash Rao, Kumar N. Jha, Sudhir Misra, Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, *Resources, Conservation and Recycling* 50 (2007) 71–81
- [Thom 2013]** C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez de Juan, Durability of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 40 (2013) 1054–1065
- [Wass 96]** R. Wasserman and A. Bentur, Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength, *Cement and concrete composites*, 18 (1996) 67-76
- [Xing 2010]** Zhi Xing, Anne-Lise Beaucour, Ronan Hebert, Albert Noumowe, Béatrice Ledesert, Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 392–402
- [Zhao 2014]** Z. Zhao, Valorisation de fines de concassage de bétons pour la fabrication de mortiers, Thèse de doctorat, école des Mines de Douai et Université de Lille 1 (2014)

Chapitre 4. Influence des granulats recyclés sur le comportement des bétons ordinaires ou hautes performances soumis à des températures élevées

1. Introduction

Ce chapitre porte sur l'influence des granulats recyclés sur le comportement du béton soumis à de hautes températures. Pour chaque type de matrice ordinaire et hautes-performances, 3 types de granulats différents sont utilisés, un granulat naturel silico-calcaire, un granulat recyclé de laboratoire et un granulat recyclé industriel aboutissant à la confection de 6 bétons différents, BSC 0.6, BRI 0.6, BRL 0.6 et BSC 0.3, BRI 0.3 et BRL 0.3. La formulation et les caractéristiques physiques et mécaniques de ces bétons sont présentés chapitre 3. Ces bétons sont soumis à un traitement thermique de chauffage – refroidissement de différentes amplitudes, allant de la température ambiante jusqu'à 150, 300, 450, et 750 °C. On cherche à déterminer l'influence des granulats issus de béton concassé selon la compacité de la matrice cimentaire, sur l'évolution des propriétés thermophysiques en fonction de la température, la fissuration thermique et les performances mécaniques résiduelles des bétons.

Nous présenterons l'évolution des dégradations des six bétons étudiés, soit la progression de la fissuration, la perte de masse et l'évolution de la porosité après les différentes sollicitations thermiques. Ces caractéristiques permettent d'évaluer l'état de dégradation des bétons, et notamment la qualité des interfaces pâte - granulat d'origine ou ancienne pâte - nouvelle pâte. Nous étudions également les différences induites par les différents granulats sur le comportement thermique des bétons, à savoir la conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau, mais également les variations de température au sein des éprouvettes testées. La conductivité thermique et la chaleur spécifique sont mesurées à chaud et après refroidissement. A l'issue de chaque cycle thermique, nous étudions le comportement mécanique résiduel des différents bétons. Nous testons leur résistance à la rupture en compression uni-axiale et en traction par fendage, ainsi que l'évolution du module d'élasticité dynamique résiduel.

L'influence de l'endommagement mécanique est analysée en fonction de la nature particulière des granulats recyclés, des sollicitations thermiques, et de la compacité de la matrice pour chaque béton étudié.

2. Méthodologie expérimentale

A l'issue de la cure décrite dans le chapitre 3 précédent, les éprouvettes sont soumises à un traitement thermique. Les bétons sont caractérisés mécaniquement et thermiquement selon les protocoles décrits ci-après.

2.1 Traitement thermique – cycles de chauffage et de refroidissement

Les éprouvettes sont soumises à des cycles de chauffage et refroidissement composés d'une étape de montée en température à une vitesse lente de 0.5°C / minute, d'une phase de stabilisation de 2h afin d'assurer l'homogénéité de la température au sein de l'échantillon. La vitesse de montée en température est choisie conformément aux recommandations RILEM en fonction du diamètre de la

plus grande éprouvette, afin de limiter les gradients thermiques dans l'échantillon. Pour le refroidissement une vitesse de 0.5°C / minute jusqu'à température ambiante est imposée (Figure 4-1). Cependant, l'inertie du four ralentit le refroidissement en dessous de 300°C. Les températures cibles sont :

- **150°C** qui correspond à la fin de l'élimination de l'eau libre
- **300°C** qui coïncide avec la fin de la déshydratation des CSH (silicates de calcium hydratés)
- **450°C** Palier intermédiaire entre 300°C et 600°C, températures entre lesquelles a lieu la principale chute de performances mécaniques [Xing 2011]
- **750°C** qui correspond au début du phénomène de décarbonatation

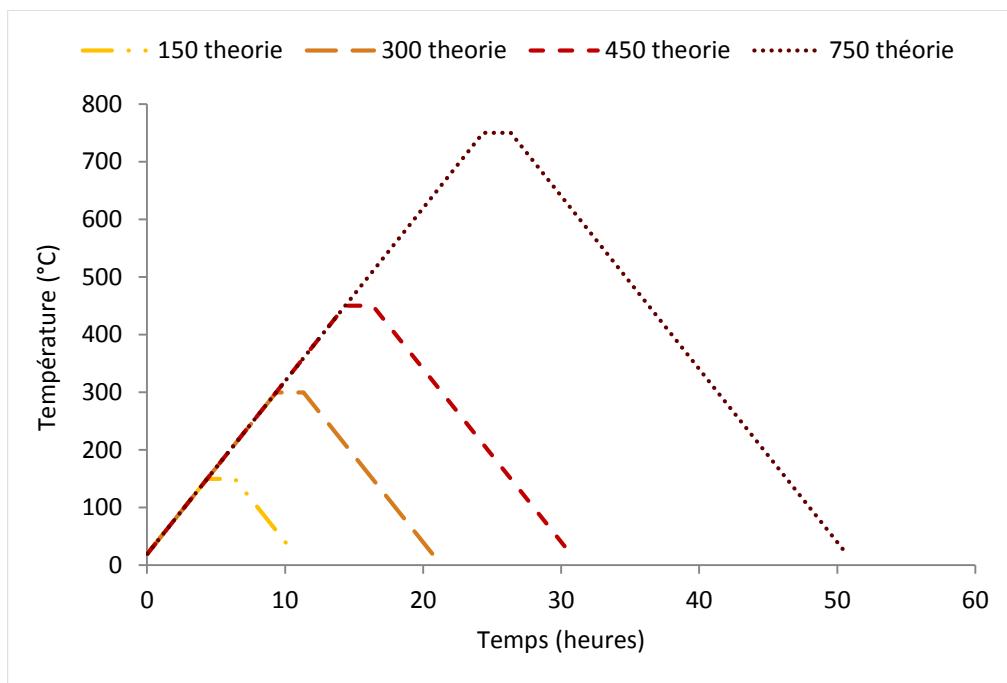


Figure 4-1. Cycles théoriques de chauffage et refroidissement imposés aux bétons étudiés

Les essais sont réalisés dans un four électrique programmable CERADEL, de dimensions intérieures 1100 x 1200 x 1100 mm (L x P x H), de puissance 150 kW et pouvant atteindre une température maximale de 1200°C. Il est piloté par un régulateur - programmeur TC 405/30 connecté à un thermocouple placé à la surface d'une éprouvette (Figure 4-2 (a)). Le régulateur permet la réalisation de programmes prédéfinis par l'opérateur (cycles de chauffage, paliers de stabilisation de la température et leur durée, vitesse et montée en température).

L'acquisition des données se fait via une centrale d'acquisition automatique HP323, disposant de 22 voies d'enregistrement en continu des températures à l'intérieur du four et/ou au cœur des éprouvettes (Figure 4-2 (b)). Les thermocouples utilisés sont de type K, et sont placés à la surface des éprouvettes, comme indiqué dans les recommandations de la RILEM TC- 200 [Rile 2004].



Figure 4-2. (a) four électrique ; (b) centrale d'acquisition



Figure 4-3. Disposition des éprouvettes dans le four

2.2 Caractérisation du béton soumis au traitement thermique

L'objectif de l'étude est de comprendre et de caractériser l'influence des granulats recyclés quand le béton est soumis à des températures élevées. Nous étudions l'évolution de la fissuration, la perte de masse, la porosité sous vide à l'eau et à l'éthanol, les propriétés thermiques à chaud et résiduelles (conductivité thermique, diffusivité thermique, chaleur spécifique), et les propriétés mécaniques résiduelles - soit après refroidissement - (résistance en compression, résistance en traction et module d'élasticité dynamique). Le Tableau 4-1 résume les différents essais menés, ainsi que le nombre et la taille des éprouvettes utilisées.

Il est important de noter que la méthode de conservation des éprouvettes de béton (dans des sacs étanches) assure une conservation - et donc une homogénéité - du niveau d'humidité au sein d'une même famille de béton ordinaire ou hautes performances.

Tableau 4-1. Récapitulatif des essais réalisés pour chaque type de béton

Essai	Type d'éprouvette	Quantité d'éprouvettes	matériel expérimental
Résistance à la compression	11 x 22 cm	4	
Résistance à la traction par fendage	11 x 22 cm	4	Four électrique Presse hydraulique
Module d'élasticité dynamique	11 x 11 cm	4	Four électrique Pundit
Conductivité thermique, diffusivité thermique, chaleur spécifique	16 x 5 cm coupée en deux	4	Four électrique Vecstar Ltd 5L, Dispositif Hot-Disk
Différence de température entre la surface et le cœur de l'éprouvette	16 x 32 cm avec un thermocouple inséré au cœur	3	Four électrique Centrale d'acquisition
Porosité sous vide	16 x 5 cm coupée en quatre	4	Four électrique Dessiccateur sous vide Balance
Perte de masse	toutes les tailles	sur toutes les éprouvettes chauffées	Four électrique Balance
Evolution de la fissuration	16 x 5 cm	3	Four électrique Microscope

2.3 Etude de la fissuration

L'observation de la fissuration en fonction de la température donne de précieuses informations sur le type d'endommagement de l'éprouvette, la fissuration de la matrice, l'incompatibilité de déformation pâte-granulat ou l'endommagement thermomécanique dû au gradient thermique. Le comportement des différentes interfaces des bétons de granulats recyclés sera comparé à celle du béton de référence. Ces observations seront corrélées aux valeurs de porosité et de pertes afin d'évaluer l'évolution des capacités de transferts du matériau. Pour chaque type de béton, et chaque cycle de chauffage, 3 tranches d'éprouvettes 16x32 cm de 5 cm d'épaisseur préalablement sciées avant le chauffage, sont photographiées à grossissement constant avant et après le traitement thermique. Les photos obtenues sont étudiées à l'œil nu, mais également analysées grâce au logiciel

d'analyse d'image « Visilog », qui permet de quantifier certains paramètres comme la longueur de fissures, l'aire fissurée et la densité de fissuration.

2.4 Etude des propriétés physiques

2.4.1 Mesure de la perte de masse

La perte de masse observée est proportionnelle à la quantité d'eau présente dans le matériau. Elle est aussi relative à l'altération de la microstructure du matériau. Elle est un indicateur important des dégradations physico-chimiques subies par le matériau au cours du chauffage. Pour la déterminer, on mesure la masse globale des éprouvettes juste avant le chauffage et à la fin du traitement thermique.

La masse après le traitement thermique est mesurée immédiatement à la sortie du four afin d'éviter toute réhydratation des bétons lors du contact avec l'air ambiant. Les masses avant et après chauffage sont mesurées à l'aide d'une balance d'une capacité de 25 kg, et avec une précision de 0,1 g. La perte de masse est déterminée par la moyenne des pertes de masse de toutes les éprouvettes chauffées de même taille. La perte de masse est exprimée en pourcentage massique, obtenu selon le calcul suivant :

$$\text{perte de masse} = \frac{m \text{ amb} - m \text{ ref}}{m \text{ amb}} \times 100\%$$

Avec $m \text{ amb}$: la masse de l'éprouvette à température ambiante avant le chauffage, et $m \text{ ref}$: la masse de l'éprouvette après refroidissement à la sortie du four.

2.4.2 Mesure de la porosité

Le suivi de la porosité avec l'élévation de température permet de caractériser l'influence des granulats recyclés sur l'évolution de la microstructure poreuse. Lors de l'étude de la porosité à l'eau sous vide de bétons chauffés, il se pose la question de la possible réhydratation des composés déshydratés lors de l'immersion des échantillons étudiés dans l'eau. Afin de s'affranchir de ce doute, nous avons réalisé des mesures de porosité de nos bétons à l'eau, mais également à l'éthanol qui permet d'éviter toute réhydratation.

La porosité des bétons a été mesurée à l'issue de chaque cycle de chauffage sous la forme de quart de tranches d'éprouvettes 16 x 5 cm, et chaque valeur retenue est la moyenne entre 4 mesures effectuées selon le protocole décrit dans le chapitre 3 précédent. Les mesures de porosité à l'éthanol se déroulent dans les mêmes conditions que les mesures de porosité à l'eau. Il est cependant important de réaliser les mesures de masses saturées surface sèche et immergées à température régulée et égale à 20°C au maximum pour éviter l'évaporation de l'éthanol. Entre la sortie du four et

la réalisation de l'essai, les échantillons sont conservés dans une étuve à 60°C puis refroidis dans des sacs étanches afin d'éviter toute réhydratation par l'air ambiant, qui pourrait altérer les résultats.

2.5 Etude des propriétés thermiques des bétons

2.5.1 *Conductivité, diffusivité et chaleur spécifique*

Comme les granulats occupent 60 à 80 % du volume du béton, les variations de leurs propriétés thermiques ont un effet significatif sur le comportement du béton. Les résultats de l'étude des bétons recyclés à température ambiante (chapitre 3) a en effet mis en évidence une diminution des conductivités et diffusivités thermiques avec la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés. Les propriétés thermiques peuvent également évoluer différemment selon le type de granulat ou la dégradation de la liaison pâte-granulat. Les indicateurs gouvernant le transfert de chaleur par conduction sont la conductivité (λ), la diffusivité et la chaleur spécifique (C).

Ces paramètres ont été déterminés à l'aide d'un dispositif Hot-Disk, décrit dans le chapitre 3 précédent. Nous avons réalisé des mesures de propriétés thermiques in situ, durant un cycle de chauffage – refroidissement piloté par le logiciel « Furnace ». Nous avons réalisé 5 paliers de mesure : à 20°C, 150°C, 225°C, 300°C et 20°C à nouveau, à l'issu du refroidissement.

Pour les essais à chaud, les éprouvettes sont préparées selon le même protocole que pour les essais à froid, puis sont placées dans un four électrique spécifique de 5 litres. Une sonde avec un isolant mica est utilisée. Le chauffage est piloté par le logiciel « Furnace », par défaut à une vitesse de 2°C/min. La température cible est maintenue suffisamment longtemps afin d'atteindre un état isotherme et garantir une homogénéité thermique dans l'échantillon avant la mesure (0.5°C d'écart maximum avec la valeur cible pendant une heure). Trois mesures sont effectuées pour un même palier de température, avec un minimum d'une heure entre chacune, afin d'éviter qu'elles ne soient perturbées par la chaleur engendrée lors de la mesure précédente. Les mesures n'ont pu être réalisées que sur des échantillons ayant été soumis à la température maximale de 300°C. Au-delà, l'endommagement est trop important pour permettre une fiabilité des mesures suffisantes pour l'interprétation.

2.5.2 *Réponse thermique des éprouvettes chauffées*

Une étude de la réponse thermique des bétons est réalisée grâce à la mesures des températures de surface et de cœur d'une éprouvette en béton jusqu'à 750°C. Par type de béton, 3 éprouvettes de dimensions 16 x 32 cm ont été équipées d'un thermocouple de type K (K.SV/SV 2x0.07 mm²) placé exactement au centre de l'éprouvette lors du coulage (Figure 4-4-4). Pour s'assurer de la position du thermocouple, un trou est percé à exactement 16 cm du bord supérieur du moule cylindrique. Une marque est réalisée sur le thermocouple à 8 cm de son extrémité. Le moule est rempli de béton frais jusqu'à mi-hauteur, et le thermocouple est alors inséré dans le moule par le trou de la paroi sur une longueur de 8 cm – soit jusqu'à la marque. Le moule est ensuite rempli complètement. Lors du démoulage, on s'assure de la position du thermocouple en vérifiant si la marque réalisée est restée en place.

Avant le chauffage, un second thermocouple est apposé à la surface de l'éprouvette. La température de chaque thermocouple est relevée toutes les 10 secondes et enregistrée par la centrale d'acquisition.

Ces mesures nous permettent de connaître l'influence de l'utilisation des granulats recyclés sur la réponse thermique du béton. La différence de température enregistrée renseigne aussi sur la consommation de chaleur latente due aux transformations physico-chimiques caractéristiques. Les mesures effectuées par Hot Disk ne se faisant qu'en condition isotherme, elles ne permettaient d'évaluer qu'une chaleur spécifique propre au matériau.

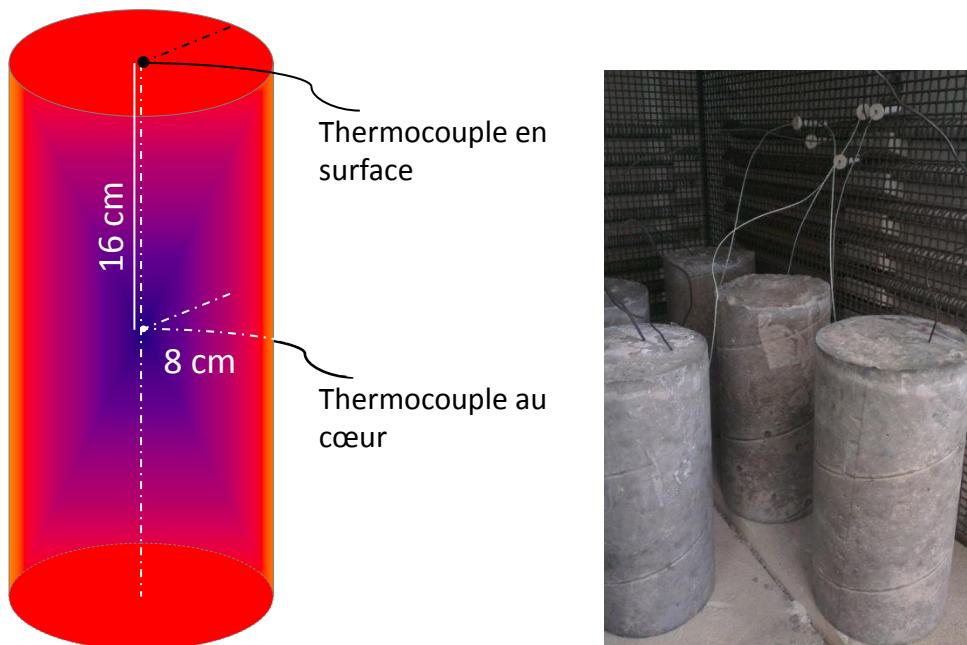


Figure 4-4. Disposition des thermocouples dans les éprouvettes de béton

2.6 Etude des propriétés mécaniques résiduelles des bétons

Pour chacune des formulations et pour chaque température cible, une fois le cycle de chauffage / refroidissement terminé, quatre éprouvettes 11x22 cm sont testées en compression uni-axiale, quatre autres en traction par fendage, et enfin quatre éprouvettes 11x11cm sont testées à l'aide d'un Pundit afin de déterminer leur module d'élasticité dynamique. Les protocoles d'essai sont les mêmes que ceux décrits dans le chapitre 3 (point 3.4).

Les recommandations de la RILEM stipulent que l'essai doit être réalisé dans les deux heures suivant la sortie du four. Un délai supplémentaire est imposé pour permettre le durcissement du soufre. Les éprouvettes sont emballées dans des sacs plastiques étanches durant ce laps de temps afin d'éviter tout échange hydrique avec l'air ambiant.

3. Résultats expérimentaux et discussion

3.1 Observation de la dégradation des bétons recyclés

L'état des échantillons de bétons recyclés après les cycles de chauffage et refroidissement est illustré sur les Figure 4-6 à 12. De manière générale, on constate sur l'ensemble des bétons testés que :

- *Après un chauffage à 150°C* aucun endommagement n'est visible à l'œil nu.
- *Après un chauffage à 300°C* apparaissent des microfissures difficilement décelables à l'œil nu, mais clairement visibles à la loupe binoculaire. Elles sont localisées principalement aux interfaces « pâte – granulat naturel » et « ancienne pâte – nouvelle pâte ». Parallèlement, on observe un rougissement d'une partie des granulats de nature siliceuse.
- *Après un chauffage à 450°C* l'endommagement devient évident. On constate alors l'apparition de fissures clairement visibles à l'œil nu. Elles apparaissent principalement aux interfaces « pâte – granulat d'origine » ou « ancienne pâte-nouvelle pâte » et se propagent de façon radiale dans la matrice entre les granulats proches (figure 4-5 a). Dans le cas des bétons à matrice hautes performances, apparaissent aussi des fissures transgranulaires et on note très peu de fissures entre l'ancienne et la nouvelle pâte (Figure 4-5 b et 4-5 c)). Le rougissement des granulats de silex s'accentue, et on observe parallèlement un début de blanchiment de certains autres granulats.
- *Après un chauffage à 750°C* on constate une nette augmentation du nombre de fissures ainsi qu'une ouverture plus importante de celles-ci. Le rougissement et le blanchiment des granulats s'accentue et se propage à l'ensemble du grain. Les granulats de calcaire présentent une fissuration en réseau quadrillé tandis que les silex présentent des fissures perpendiculaires à la surface du grain, et qui semblent se propager plus ou moins profondément dans le grain.

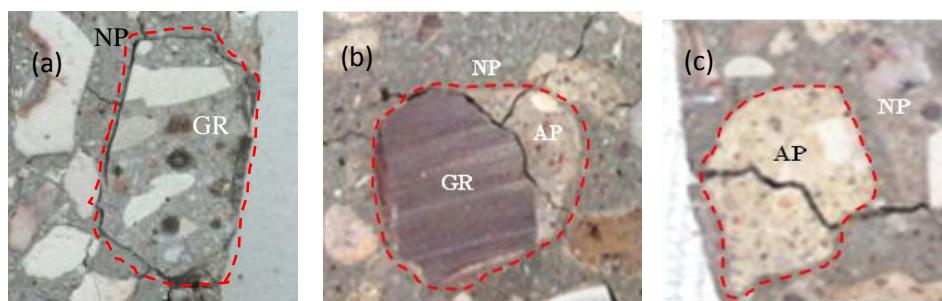


Figure 4-5. Illustration des différents types de fissures. (a) à l'interface "ancienne pâte - nouvelle pâte", (b) à l'interface "pâte - granulat d'origine", et (c) transgranulaire

De manière générale, les fissures semblent tangentielles aux interfaces et se propagent de façon radiale dans la pâte de ciment entre les granulats proches. Elles sont générées entre autres par les contraintes différentielles entre la matrice cimentaire et les granulats, et leur incompatibilité de

déformation. Dans le cas des bétons à matrice hautes performances, on observe très peu de fissures aux interfaces « ancienne pâte – nouvelle pâte », même après un chauffage à 750°C.

Les bétons recyclés à matrice haute performance sont moins fissurés que les bétons recyclés ordinaires, mais présentent quelques fissures transgranulaires en plus des fissures aux interfaces « pâte – granulat ». Ce phénomène n'est pas caractéristique des bétons recyclés. Dans les bétons de faible rapport E/C, on observe une meilleure qualité de l'interface pâte-granulat que dans les bétons de rapport E/C élevé. Mécaniquement, les granulats peuvent devenir le maillon faible du béton et donc le point de départ de fissures. Il est également important de noter qu'aucun éclatement n'a été observé, alors que 20% des éprouvettes de BRC 0.3 ont éclaté lors du cycle de chauffage à 750°C [Xing 2010]. Cette observation avait également été faite par Xiao [Xiao 2013] et Sarhat [Sarh 2013] dans leur étude sur les bétons recyclés à haute température.

3.1.1 Béton recyclé de laboratoire, E/C 0.6



Figure 4-6. BRL 0.6 avant chauffage



(a)



(b)

Figure 4-7. BRL 0.6 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C

3.1.2 Béton recyclé industriel, E/C 0.6



Figure 4-8. BRI 0.6 avant chauffage



(a)



(b)

Figure 4-9. BRI 0.6 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C

3.1.3 Béton recyclé de laboratoire, E/C 0.3



Figure 4-10. BRL 0.3 avant chauffage



(a)



(b)

Figure 4-11. BRL 0.3 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C

3.1.4 Béton recyclé industriel, E/C 0.3



Figure 4-12. BRI 0.3 avant chauffage



(a)



(b)

Figure 4-13. BRI 0.3 après chauffage à (a) 450°C et (b) 750°C

3.1.5 *Etude statistique de la fissuration*

La fissuration des bétons recyclés a été reportée sur papier claque, puis numérisée afin d'être étudiée statistiquement à l'aide d'un logiciel d'analyse d'image, Visilog. Afin d'exploiter correctement les images analysées, des cartographies de fissuration ont été réalisées pour les quatre formulations de bétons recyclés chauffés à 450°C et 750°C sur trois échantillons par formulation et par température. (Tableau 4-2 et Tableau 4-3).

Nous avons choisi de mener l'étude statistique de fissuration sur les éprouvettes chauffées à 450°C et 750°C, à 300°C, le béton n'étant pas encore suffisamment endommagé. A 750°C l'ensemble est trop fissuré pour permettre une exploitation statistique fiable des résultats, mais donne tout de même des informations quantitatives sur l'évolution de la fissuration entre 450 et 750°C.

Tableau 4-2. Comparaison de la fissuration des bétons recyclés ordinaires BRL 0.6 et BRI 0.6 après les cycles de chauffage-refroidissement à 450°C et 750°C

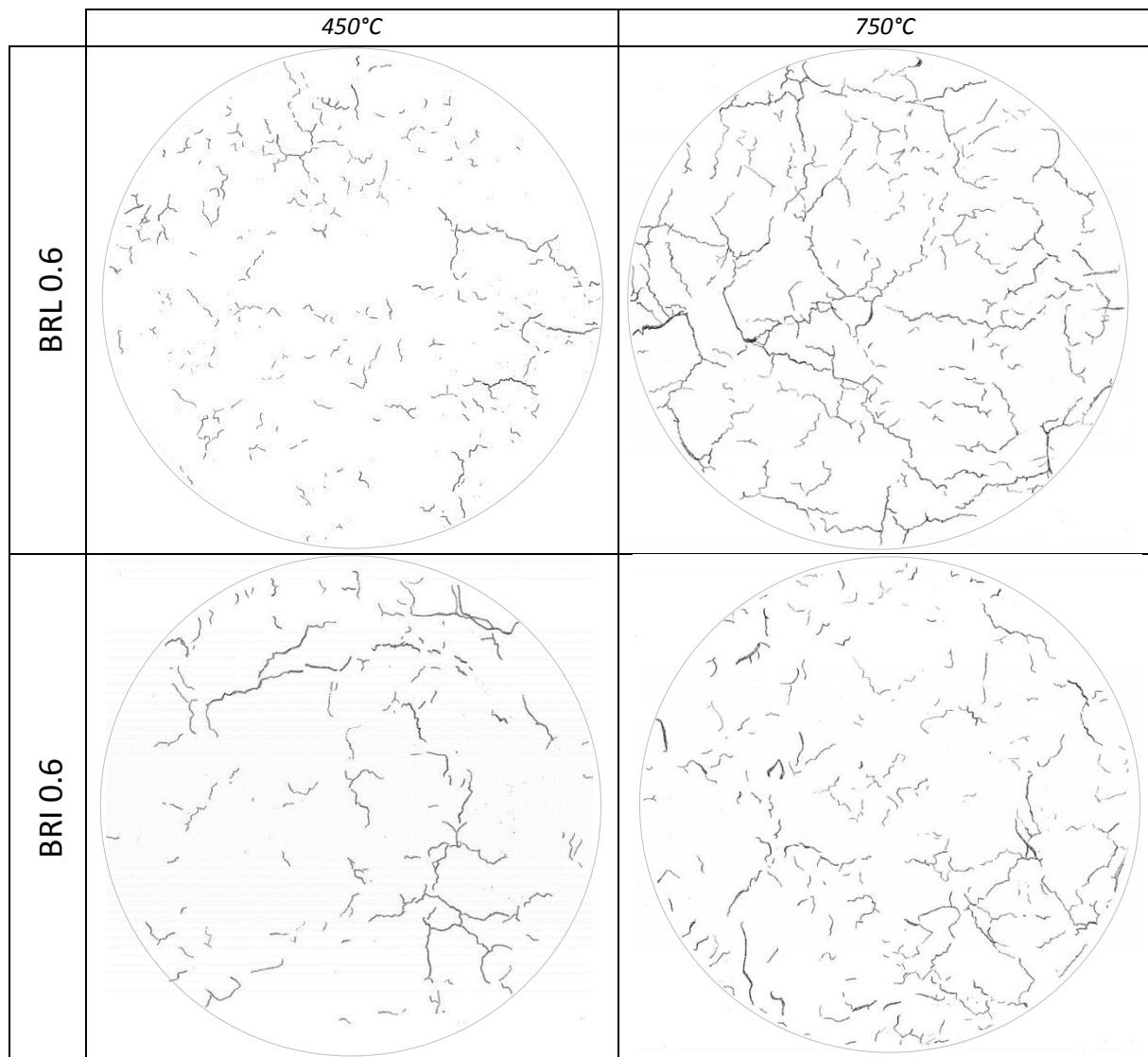


Tableau 4-3. Comparaison de la fissuration des bétons recyclés à matrice hautes performances BRL 0.3 et BRI 0.3 après les cycles de chauffage-refroidissement à 450°C et 750°C

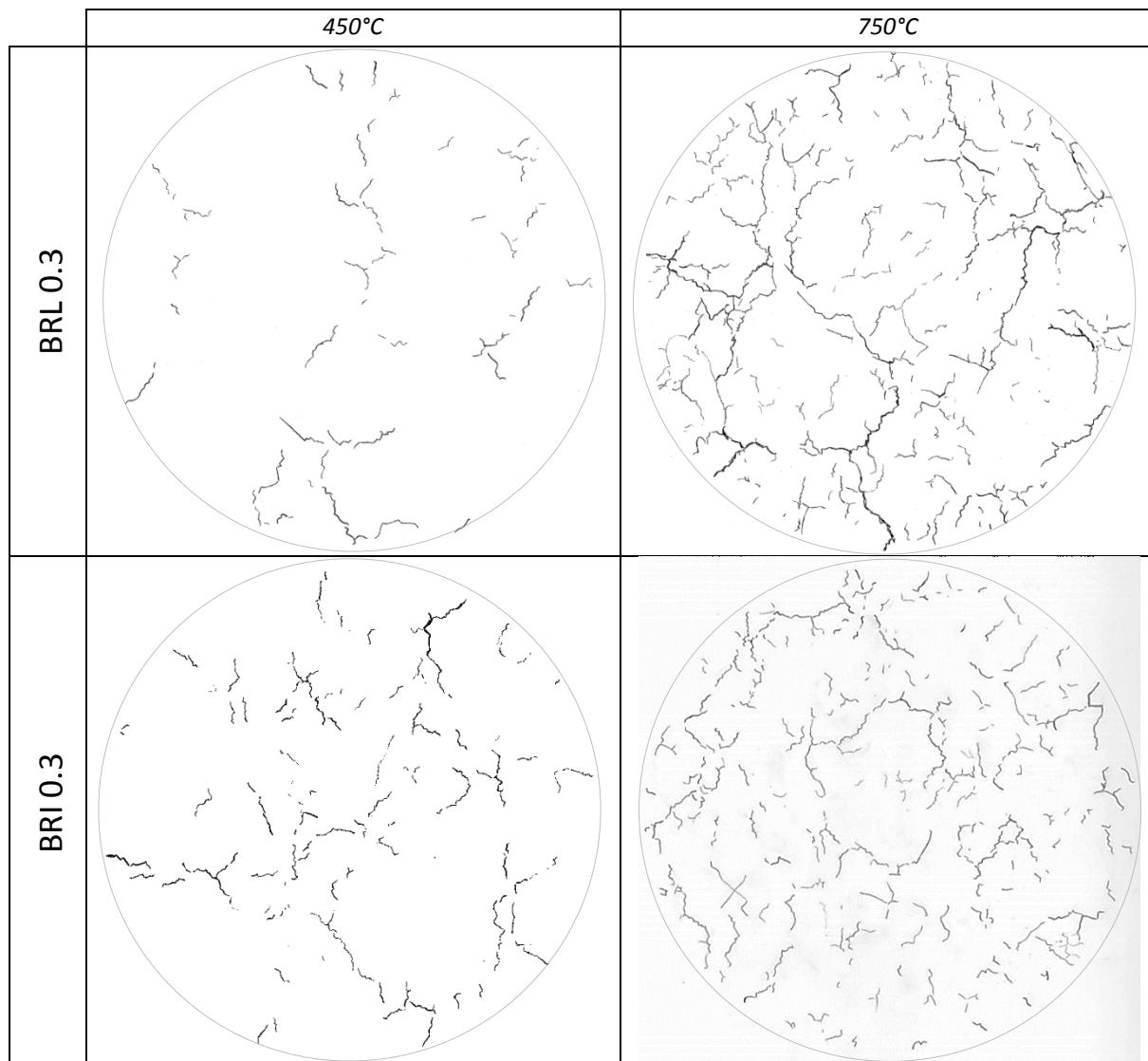


Tableau 4-4. Fissuration des bétons recyclés étudiés

échantillon	BRI 0,6		BRL 0,6		BRI 0,3		BRL 0,3	
	450	750	450	750	450	750	450	750
longueur totale de fissures (mm)	1146,98	1729,04	1138,44	2573,17	887,36	1691,42	516,23	2251,62
longueur moyenne des fissures (mm)	8,96	7,03	6,58	9,78	7,58	6,9	8,19	9,15
aire fissurée (%)	1,68	2,6	1,41	2,18	0,64	1,59	0,49	2,26

Les valeurs de longueur totale cumulée de fissures et d'aire totale de fissure par rapport à la surface de l'éprouvette présentées Tableau 4-4, Figure 4-14 et Figure 4-15, sont les moyennes des valeurs obtenues pour 3 éprouvettes par type de béton.

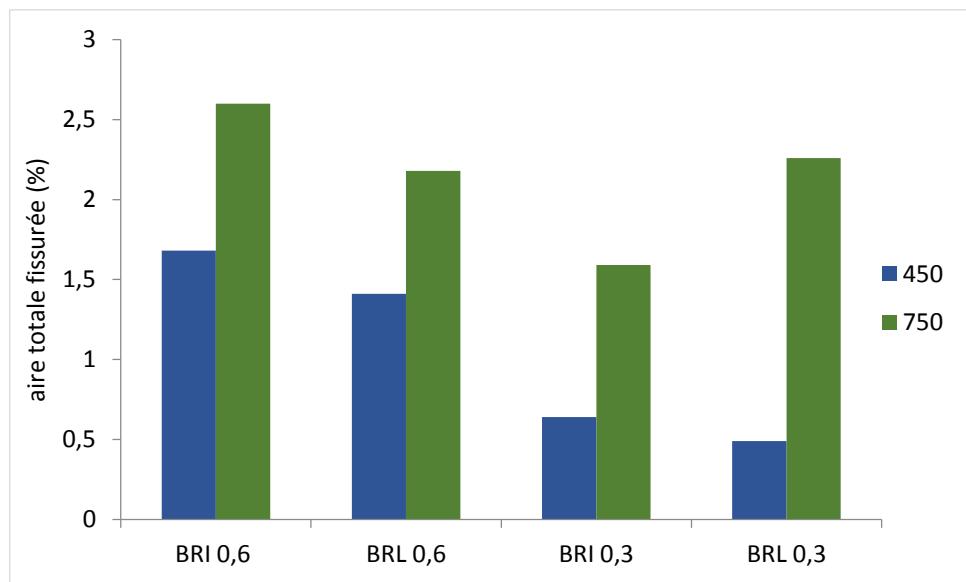


Figure 4-14. Valeurs statistiques de l'aire totale des fissures pour chaque formulation de béton recyclé testée

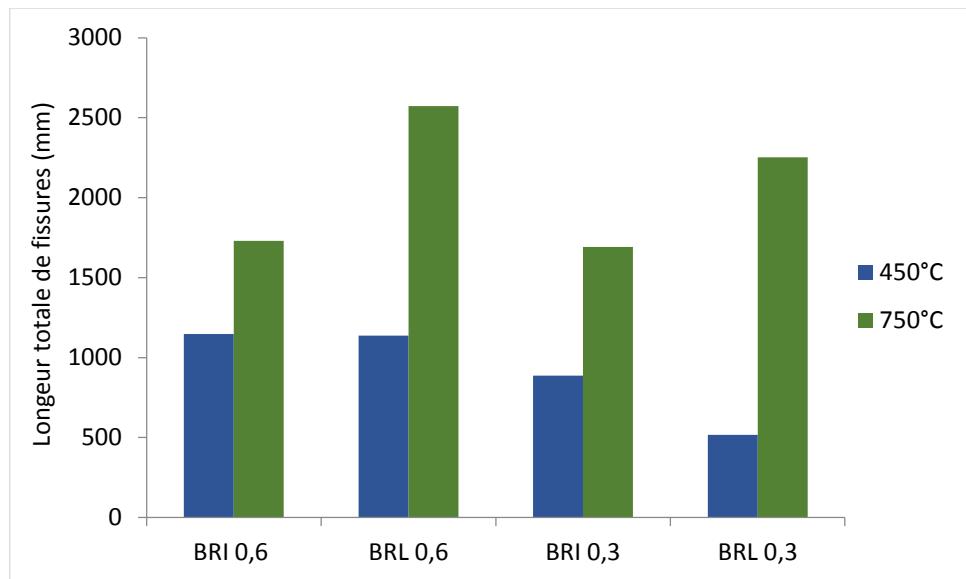


Figure 4-15. Valeurs statistiques de la longueur totale de fissures pour chaque formulation de béton recyclé testée

Ces résultats confirment l'observation faite à l'œil nu selon laquelle les bétons ordinaires sont moins fissurés, et présentent des fissures plus courtes que les bétons à matrice hautes performances. Un résultat plus inattendu cependant réside dans le fait qu'à 450°C, les BRI (matrice ordinaire et hautes performances) sont globalement plus endommagés que les BRL. Cette tendance est attribuée à la présence de déchets non cimentaires et combustibles (bois, plastique....) parmi les GRI, qui lors de la montée en température se consument et créent de la porosité et des défauts supplémentaires au sein de la matrice. Ces défauts sont des zones de faiblesse, et donc des points de départ préférentiels pour la fissuration.

Il est également important de noter que l'aire totale fissurée à 750°C est moins importante que celle observée à 600°C par Xing sur ses bétons de granulats naturels de même formulation [Xing 2011].

3.2 Etude de l'évolution des propriétés physiques en fonction de la température

3.2.1 Evolution de la perte de masse

L'exposition du béton à de hautes températures entraîne une suite de dégradations au niveau microstructural qui conduisent à une perte de densité du matériau. L'étude de l'évolution de la perte de masse en fonction de la température permet notamment de quantifier la perte d'eau libre et liée dans l'éprouvette. L'eau libre, présente dans les pores, est perdue facilement lors des variations thermiques [Baro 1994], tandis que l'eau liée des hydrates est adsorbée à la surface de composés solides ou fait partie constitutive des hydrates, et nécessite une plus grande énergie pour être éliminée.

La valeur de perte de masse des bétons étudiés est illustrée Figure 4-16.

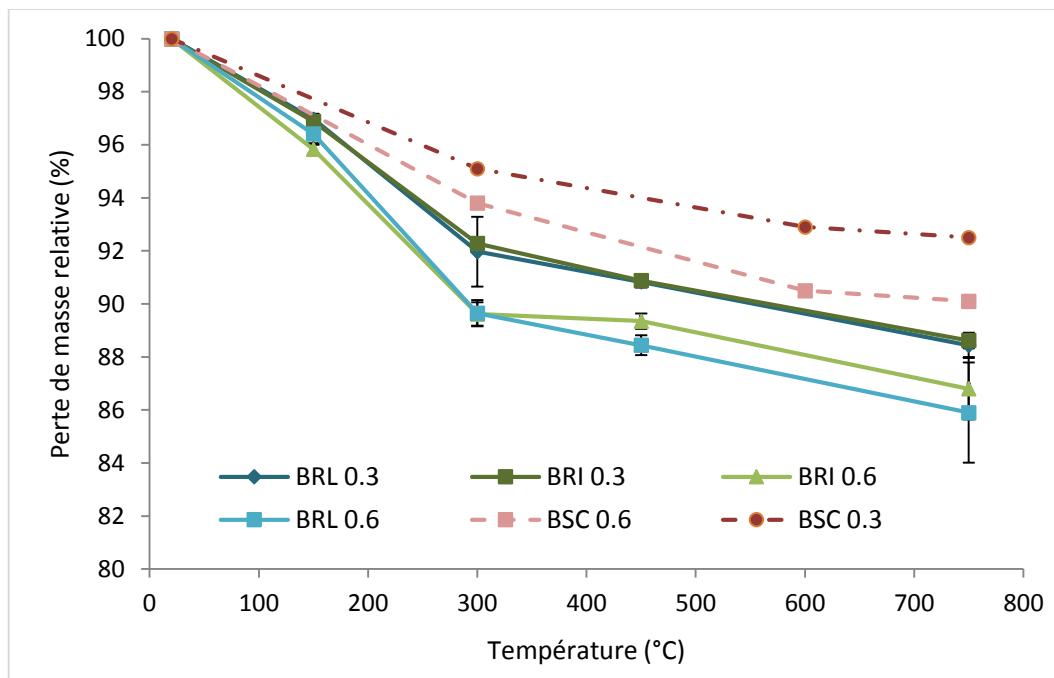


Figure 4-16. Perte de masse moyenne relative des bétons étudiés en fonction de la température de chauffage

Entre la température ambiante et 150°C, la perte de masse observée est essentiellement liée au départ de l'eau libre et adsorbée présente dans les bétons. Entre 150 et 300°C elle est due au départ de l'eau absorbée et liée (décomposition des hydrates). Dans ces gamme de température, on constate que les bétons ordinaires présentent tous une perte de masse plus importante que les bétons à matrice hautes performances formulés à partir du même type de granulat. Ce résultat, conforme à nos attentes, s'explique aisément par le rapport E/C, plus élevé dans le cas des bétons ordinaires. De la même manière, on note une perte de masse relative plus importante pour les bétons recyclés que pour les bétons naturels de référence. Cette tendance est due à la pré-saturation

en eau que nous avons imposée aux granulats préalablement au malaxage afin d'inhiber leur caractère trop absorbant, ainsi qu'à leur plus forte porosité.

Au-delà de 300°C, la perte de masse est gouvernée par la dégradation d'autres composés (deshydroxylation de la portlandite, décarbonatation....). Pour une matrice donnée (ordinaire ou hautes performances) le volume de nouvelle pâte est le même pour toutes les formulations, et les constituants identiques. Il est donc logique de trouver une pente similaire, soit une perte de masse relative équivalente pour toutes les formulations testées.

La nature minéralogique des granulats peut avoir une influence sur la perte de masse des bétons [Xing 2011]. Nous nous travaillons ici uniquement avec des granulats d'origine de nature silico-calcaire, et on ne distingue donc pas de divergence significative entre les pertes de masse des BRL et celles des BRI.

3.2.2 Evolution de la porosité

La mesure de la porosité permet de caractériser la microstructure poreuse du béton, et sa variation en fonction de la température.

3.2.2.1 Porosité à l'eau / porosité à l'éthanol

Il est courant de tester la porosité accessible à l'eau des bétons. Cependant, dans le cas de l'étude de bétons chauffés, il se pose la question de la réhydratation des CSH lors de l'immersion des échantillons de béton dans l'eau. En effet, une réhydratation entraînerait une augmentation de volume des CSH, et donc une modification du volume des pores par rapport à l'état non hydraté (à la sortie du four).

Afin de s'affranchir de ce doute, nous avons choisi de suivre la porosité en fonction de la température de chauffage d'un de nos bétons, le BRL 0.6, comparativement à l'eau et à l'éthanol qui permet d'éviter toute réhydratation. Les résultats sont illustrés Figure 4-17.

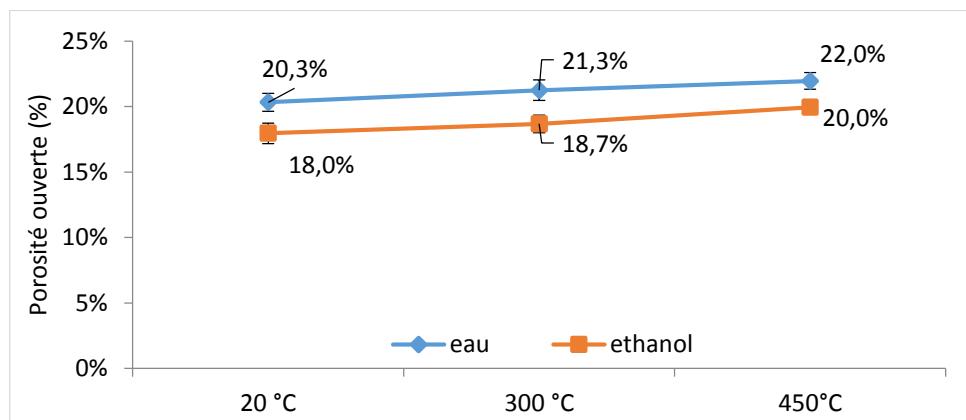


Figure 4-17. Comparaison de l'évolution de la porosité à l'eau et à l'éthanol en fonction de la température du BRL 0.6

La porosité accessible à l'éthanol est inférieure à la porosité accessible à l'eau du fait de la taille de la molécule d'éthanol, plus importante que celle de l'eau. Cependant, il faut regarder la variation de l'écart entre les deux porosités mesurées en fonction de la température. En effet, à 20°C, le béton n'a pas été déshydraté et le fait d'utiliser de l'eau n'induira pas de réhydratation supplémentaire. En revanche, à 300°C et 450°C, il y a eu déshydratation du matériau. Et si l'utilisation d'eau est suffisante pour induire une réhydratation, alors on devrait observer une augmentation du volume de pores accessibles moins importante à l'eau qu'à l'éthanol.

- Porosité accessible à l'eau :

$$\text{augmentation porosité } \phi = \text{fissuration} - \text{volume des CSH réhydratés}$$

- Porosité accessible à l'éthanol :

$$\text{augmentation porosité } \phi = \text{fissuration}$$

Or, on constate ici un écart constant entre l'augmentation de la porosité accessible à l'éthanol et la porosité accessible à l'eau. On peut donc en conclure que le temps d'immersion des échantillons de béton dans l'eau imposé par le protocole ne suffit pas à la réhydratation des CSH et ne nécessite donc pas d'adaptation de l'essai pour l'étude des bétons chauffés.

3.2.2.2 Evolution de la porosité en fonction de la température

Les valeurs de porosité présentées Tableau 4-5 et illustrées Figure 4-18, sont la moyenne de valeurs obtenues sur 4 échantillons différents pour chaque formulation étudiée.

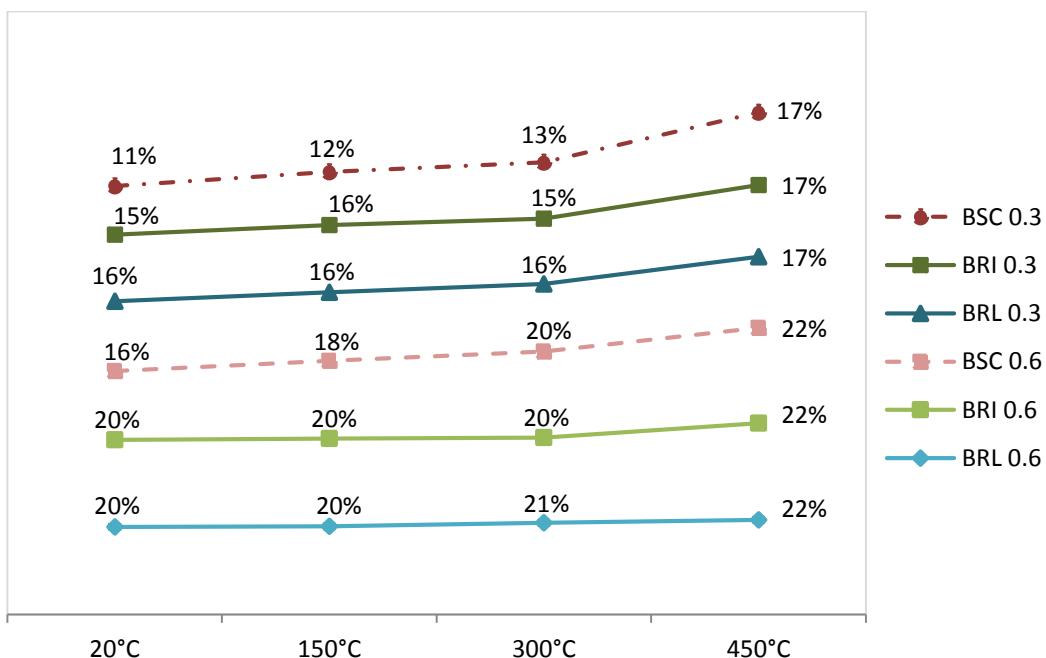


Figure 4-18. Évolution de la porosité accessible à l'eau des bétons en fonction de la température de chauffage

Tableau 4-5. Valeurs des porosités accessibles à l'eau en fonction de la température de chauffage

température	BRL 0,6	BRI 0,6	BSC 0,6	BRL 0,3	BRI 0,3	BSC 0,3
20°C	20%	20%	16%	16%	15%	11,3%
(écart-type)	0,7%	0,6%	0,9%	0,3%	0,3%	0,3%
150°C	20%	20%	18%	16%	16%	12,4%
(écart-type)	0,01%	0,003%	1%	0,01%	0,002%	0,5%
300°C	21%	20%	20%	16%	15%	13,0%
(écart-type)	0,8%	0,01%	1%	0,03%	0,01%	0,4%
450°C	22%	22%	22%	17%	17%	16,9%
(écart-type)	0,6%	0,004%	0%	0,03%	0,02%	0,2%

Entre 20°C et 300°C on n'observe pas ou très peu d'évolution de la porosité accessible à l'eau. En effet, on sait que dans le cas de traitement thermique des bétons, la variation de porosité est essentiellement due à la dégradation microstructurale du matériau, soit l'ouverture de fissures, et non à d'autres phénomènes comme par exemple une coalescence de pores. Or, nous avons en effet vu précédemment, point 3.1, que jusqu'à 300°C, il n'y a quasiment pas d'endommagement de nos échantillons. Cette plage de température correspond cependant également à la perte de masse la plus intense liée notamment à la déshydratation des CSH qui se déroule jusqu'à 300°C. Les vides laissés entre ou dans les feuillets des CSH sont de l'ordre du nanomètre et donc seule une microfissuration associée pourrait être quantifiée par une mesure de porosité à l'eau sous vide.

A 450°C, en revanche on observe pour tous les bétons une augmentation, relativement faible mais nette de la porosité, de 1.5 à 2%, valeurs qui correspondent à l'ordre de grandeur de l'aire fissurée calculée (cf Figure 4-14). On note cependant une plus faible augmentation de porosité des bétons recyclés. Les BRL et BRI présentent un comportement similaire.

A 750°C, l'endommagement des échantillons était trop avancé pour permettre une mesure fiable de la porosité.

3.3 Evolution des propriétés thermiques en fonction de la température

L'étude des propriétés thermiques des bétons est primordiale pour caractériser et interpréter leur comportement à haute température. Nous savons que la nature des granulats a une influence non négligeable sur ces paramètres. Les granulats de référence et les granulats naturels d'origine des deux granulats recyclés ont une nature minéralogique similaire. La comparaison entre bétons recyclés et bétons de référence s'affranchit donc des différences de minéralogie du granulat naturel et pourra donc mettre en évidence l'influence de la partie de mortier attachée du granulat recyclé et des différences d'endommagement des bétons en fonction de la température.

Dans cette partie, nous évaluerons dans un premier temps l'évolution de la conductivité et de la chaleur spécifique des bétons étudiés en fonction de la température et après refroidissement. Par la suite, nous mesurerons la différence de température entre la surface et le cœur d'une éprouvette pendant le cycle de chauffage-refroidissement afin d'évaluer la diffusion de la chaleur au sein du matériau pendant le traitement thermique.

3.3.1 Conductivité, diffusivité et chaleur spécifique

La connaissance des propriétés thermiques comme la conductivité ou la chaleur spécifique permet d'évaluer la distribution de la température au sein du matériau, et donc d'anticiper la distribution des contraintes et des instabilités thermiques qui peuvent en résulter.

3.3.1.1 Conductivité thermique

Les caractéristiques thermiques présentées Figure 4-19 (conductivité thermique) et Figure 4-20 (chaleur spécifique) ont été déterminées à chaud, et après refroidissement. Les conductivités dites résiduelles (après refroidissement) sont utilisées comme indicateurs de l'endommagement microstructural, soit l'évolution volumique des fissures occasionnées par le chauffage.

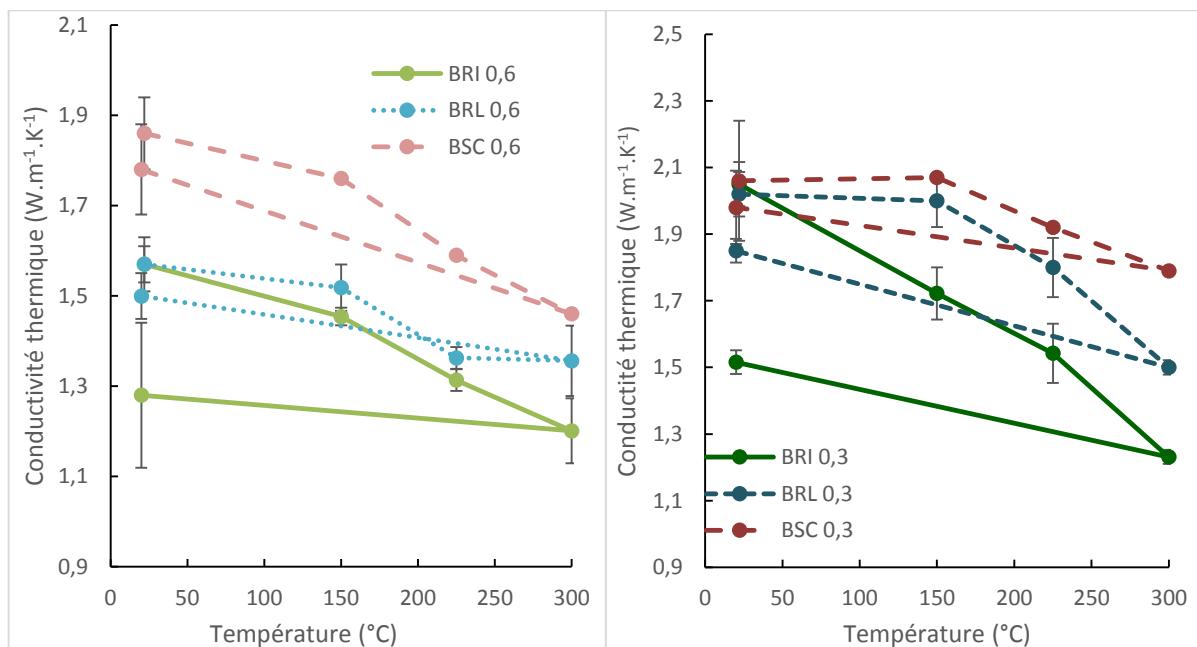


Figure 4-19. Evolution de la conductivité thermique des bétons étudiés (a) à matrice ordinaire, et (b) à matrice hautes performances, en fonction de la température, à chaud et après refroidissement

Les mesures ont été réalisées à plusieurs températures : 20°C, 150°C, 225°C, 300°C et 20°C à nouveau à l'issue du refroidissement, à raison de trois mesures par palier. Au-delà, l'échantillon est trop endommagé et l'écart type entre les valeurs devient trop important pour permettre une interprétation correcte des résultats.

L'analyse du graphique figure 4.19 montre que les conductivités thermique des bétons diminuent toutes avec la température, et que les valeurs obtenues à chaud à 300°C sont toutes inférieures à celles obtenues après refroidissement. Les valeurs résiduelles (après refroidissement) sont toutes

légèrement inférieures aux valeurs à température ambiante enregistrées au début du cycle de chauffage.

Conformément à ce qui a été observé au chapitre 3, on constate que les bétons ordinaires, recyclés ou de référence, présentent des valeurs de conductivité plus faibles que les bétons hautes performances. Cette tendance est due à la plus grande compacité de la matrice des bétons à faible E/C. La diminution de la conductivité avec la température pour tous les bétons est liée à l'association de différents phénomènes :

- Le départ de l'eau liée qui présente une forte conductivité thermique ($0.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) devant celle de l'air ($0.02 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- La diminution du nombre de liaisons conductrices liée à la décomposition des hydrates (ettringite puis CSH)
- L'apparition de microfissures autour de 300°C .

La conductivité résiduelle est principalement due à l'endommagement subi par l'échantillon. Cependant, il est important de noter que les phénomènes de dilatation des granulats / contraction de la pâte de ciment sont réversibles. La valeur de conductivité résiduelle supérieure à celle obtenue à 300°C peut être liée à une réhydratation partielle des CSH pendant le refroidissement.

On constate également que les BRI présentent des valeurs de conductivité plus faibles que les BRL. Cette tendance est attribuée à la présence de déchets non cimentaires présentant des valeurs de conductivité plus faibles que le béton, tels que le bois ($\lambda \approx 0.15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), le plastique ($\lambda \approx 0.4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ou la brique ($\lambda \approx 0.84 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

3.3.1.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique, ou capacité thermique massique, détermine la quantité d'énergie à apporter pour éléver d'un degré la température d'une unité de masse donnée d'un composé.

On constate que la chaleur spécifique des bétons augmente faiblement avec la température. Cette augmentation est généralement due aux réactions endothermiques (consommatrice de chaleur) ayant lieu pendant le chauffage et liées notamment au départ de l'eau liée. Nous travaillons cependant ici en conditions isothermes, et la mesure ne se fait qu'une fois les réactions de consommation de chaleur latente terminée. L'accroissement des valeurs s'explique alors par la légère augmentation de porosité dans les bétons. En effet, l'air a une chaleur spécifique plus élevée que le béton ($cp = 1005 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour l'air sec contre $cp = 880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le béton).

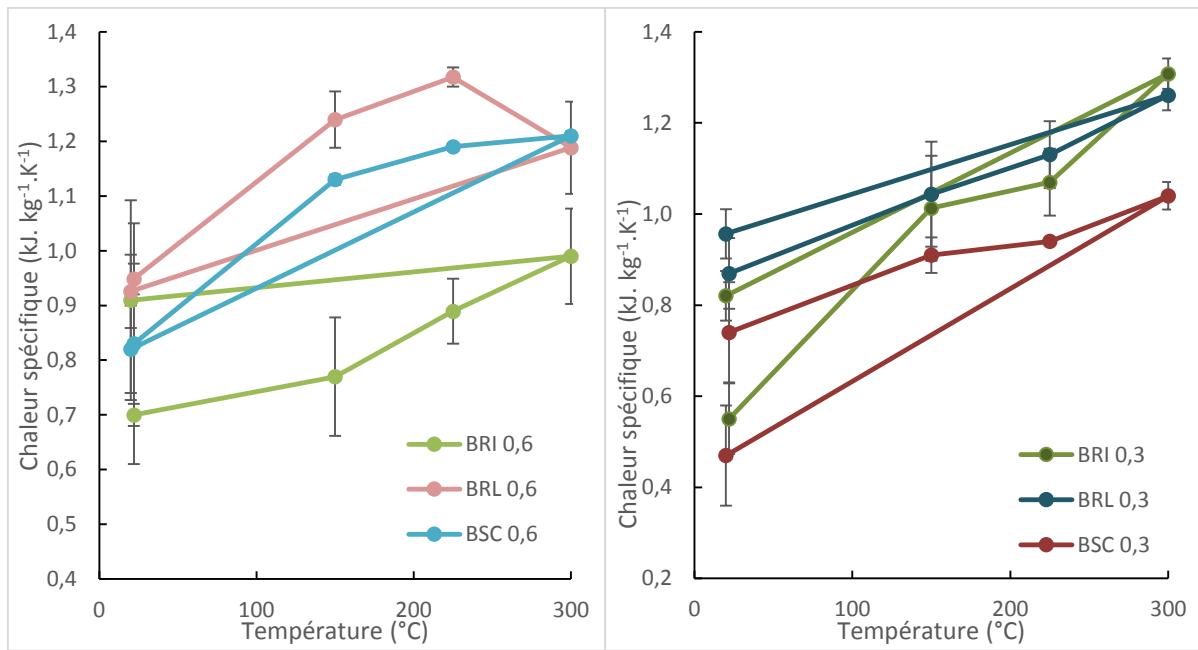


Figure 4-20. Evolution de la chaleur spécifique des bétons étudiés (a) à matrice ordinaire et (b) à matrice hautes performances en fonction de la température, à chaud et après refroidissement

La plus grande variabilité des valeurs obtenues pour les BRI (0,6 et 0,3) peut s'expliquer par la présence de déchets de démolition non cimentaires aux valeurs de chaleur spécifique très éloignées de celles du béton, et qui peuvent influer significativement sur la chaleur spécifique globale de l'échantillon.

3.3.2 Différence de température entre la surface et le cœur de l'éprouvette

On cherche à déterminer si nos bétons, qui présentent des propriétés thermiques légèrement différentes, ont la même réponse thermique lorsqu'ils sont soumis aux cycles de chauffage et refroidissement. Pour ce faire, trois éprouvettes de chaque formulation sont équipées de 2 thermocouples, l'un au centre et l'autre en surface, qui nous permettent de mesurer in situ la différence de température ΔT entre les deux au cours du chauffage.

ΔT est représenté en fonction de la température de surface Figure 4-21. Les pics positifs sont liés à une augmentation du ΔT , due à une réaction endothermique, consommatrice de chaleur. A l'inverse, les pics négatifs sont liés à une réaction exothermique, soit productrice de chaleur.

Les différences de répartition de la température au sein de l'éprouvette entre les bétons recyclés et de référence sont plus liées aux différences de consommation de chaleur latente et la fissuration du béton qu'aux différences de conductivité ou diffusivité thermiques

On observe pour chacun des bétons deux pics endothermiques principaux. Le premier, aux alentours de 300°C en surface, témoigne de la réaction de consommation de chaleur latente, due au départ de l'eau et à la décomposition d'une partie des hydrates. Cette différence maximale de température correspond au point d'inflexion de la courbe de perte de masse, témoignant que la majeure partie de l'eau libre et liée est éliminée. On remarque d'ailleurs que les bétons ordinaires présentent un pic

bien plus important que les bétons à matrice E/C 0.3 ce qui atteste de leur plus forte teneur en eau. Dans le cas des BHP, le pic apparaît à des températures un peu plus élevées, résultat déjà observé dans les travaux de Pliya et Kanéma sur des bétons de granulats silico-calcaires [Pliy 2010] [Kane 2007] et lié à la plus grande porosité des bétons ordinaires qui facilite la migration et l'élimination de l'eau.

Le second pic, autour de 600°C en surface résulte de deux réactions : la deshydroxylation de la portlandite qui commence à partir de 450°C, et la transformation allotropique du quartz α en quartz β ayant lieu à 570°C. Cette transformation est réversible. On observe bien un petit décrochement aux alentours de 500°C en surface sur les courbes de refroidissement. On observe une augmentation de l'amplitude de ce second pic vers 650°C en surface pour les BRL 0.6 et 0.3. Cette augmentation est probablement liée à la part de pâte attachée au granulat qui contient, pour les GRL, de la portlandite.

Par ailleurs la différence de température entre le centre et la surface de l'éprouvette devient plus faible à partir de $T = 450$ °C pour les bétons les plus fissurés (BRI). Aux phénomènes de conduction peuvent en effet s'ajouter les phénomènes de rayonnement ou de convection.

Si pour un type de matrice donné, les différents bétons ont des courbes d'allures similaires, chacun des bétons recyclés présente une petite particularité :

- Les BRL présentent un pic à 600°C en surface légèrement plus prononcé que les autres bétons, certainement dû à la présence de portlandite dans la pâte entourant les granulats recyclés GRL, soit une teneur globale plus importante dans le béton.
- Les BRI présentent un petit pic témoin d'une réaction exothermique autour de 400°C en surface. Cette particularité est attribuée aux déchets non cimentaires présents dans les GRI, et à la chaleur libérée par leur réaction de combustion pendant le chauffage.

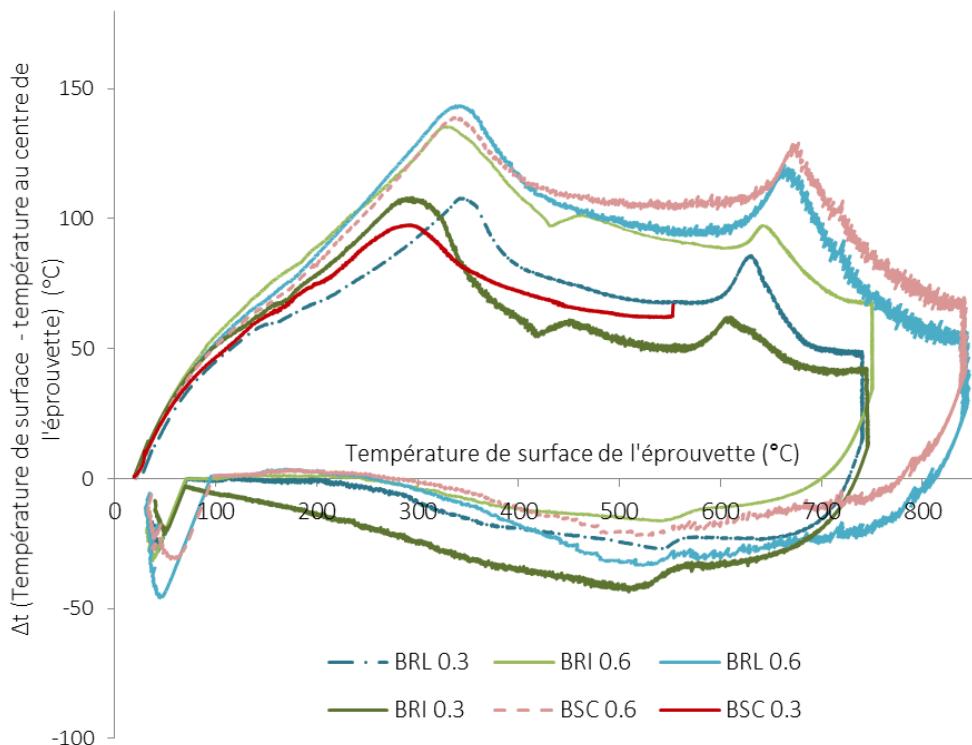


Figure 4-21. Variation de la différence de température entre le centre et la surface de l'éprouvette en fonction de la température de surface des bétons recyclés et de référence étudiés

[Note : lors du chauffage des éprouvettes de BSC 0.3, les trois thermocouples se sont rompus pendant le chauffage, nous présentons ici celui qui a tenu le plus longtemps.]

3.4 Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction de la température

Les propriétés mécaniques résiduelles des bétons recyclés et de référence (résistance en compression uni-axiale, résistance en traction par fendage et module d'élasticité dynamique) sont déterminées selon le protocole expérimental décrit dans le chapitre 3 à l'issue de chaque cycle de chauffage-refroidissement. Ces essais permettent d'évaluer l'impact de l'utilisation de granulats recyclés sur le comportement mécanique résiduel des bétons soumis à de hautes températures. La résistance au fendage permet d'estimer l'endommagement de l'interface pâte-granulat, et le module d'élasticité exprime l'évolution de la rigidité du matériau en fonction de la température.

3.4.1 Performances mécaniques des bétons étudiés

Les Tableau 4-6, Tableau 4-7, Tableau 4-8, présentent les valeurs absolues et relatives des performances mécaniques résiduelles des six formulations de béton testées, obtenues après les différents cycles de chauffage-refroidissement. On observe une bonne répétabilité des mesures avec des écart-types inférieurs à 5%.

Les Figure 4-22, Figure 4-23, Figure 4-24 illustrent les performances résiduelles relatives des différents bétons par rapport à leurs performances initiales. Ces valeurs permettent d'évaluer plus facilement la perte de performance avec la température de chacune des formulations.

Tableau 4-6. Résistance résiduelle en compression uni-axiale (les valeurs de BSC 0.6 et BSC 0.3 sont celles obtenues par Zhi Xing dans ses travaux de thèse [Xin 2010])

béton		20°C	150°C	300°C	450°C	600°C	750°C
BRL 0.6	$f_{c(T)}$ [MPa]	31,24	26,18	28,55	13,36	-	3,62
	<i>Ecart-type</i>	3,26	1,35	2,9	1,26	-	0,2
	$f_{c(T)} / f_{c(20)}$	1,0	0,83	0,91	0,43	-	0,12
BRI 0.6	$f_{c(T)}$ [MPa]	34,2	29	25,4	11,5	-	4,51
	<i>Ecart-type</i>	3,4	4,5	3,8	0,9	-	0,17
	$f_{c(T)} / f_{c(20)}$	1,0	0,85	0,74	0,34	-	0,13
BSC 0.6	$f_{c(T)}$ [MPa]	39,5	-	34,4	-	4,2	3
	<i>Ecart-type</i>	1,0	-	0,96	-	0,12	0,08
	$f_{c(T)} / f_{c(20)}$	1,0	-	0,96	-	0,12	0,08

	$f_{c(T)}$ [MPa]	55,47	47,65	50,68	25,07	-	7,2
BRL 0.3	<i>Ecart-type</i>	5,5	1,67	4,5	2,64	-	0,21
	$f_{c(T)} / f_{c(20)}$	1,0	0,86	0,91	0,45	-	0,13
	$f_{c(T)}$ [MPa]	55	47,9	40,79	15,77	-	7,82
BRI 0.3	<i>Ecart-type</i>	3,2	2,2	3,9	1,18	-	0,16
	$f_{c(T)} / f_{c(20)}$	1,0	0,87	0,74	0,29	-	0,11
	$f_{c(T)}$ [MPa]	81,2	-	75,7	-	9,5	7,1
BSC 0.3	<i>Ecart-type</i>	1,0	-	0,93	-	0,12	0,09
	$f_{c(T)} / f_{c(20)}$	1,0	-	0,93	-	0,11	0,09

Tableau 4-7. Résistance résiduelle en traction par fendage (les valeurs de BSC 0.6 et BSC 0.3 sont celles obtenues par Zhi Xing dans ses travaux de thèse [Xin 2010])

	béton	20°C	150°C	300°C	450°C	600°C	750°C
BRL 0.6	$f_{t(T)}$ [MPa]	4,38	3,68	3,09	1,17	-	0,28
	<i>Ecart-type</i>	1,5	0,96	1,14	0,21	-	0,3
	$f_{t(T)} / f_{t(20)}$	1,0	0,84	0,7	0,27	-	0,06
BRI 0.6	$f_{t(T)}$ [MPa]	4,44	3,75	2,59	1,2	-	0,44
	<i>Ecart-type</i>	1,2	0,72	0,85	0,9	-	0,7
	$f_{t(T)} / f_{t(20)}$	1,0	0,84	0,58	0,27	-	0,1
BSC 0.6	$f_{t(T)}$ [MPa]	3,7	-	3	-	0,4	0,2
	<i>Ecart-type</i>	0,33	-	0,21	-	0,04	0,02
	$f_{t(T)} / f_{t(20)}$	1,0	-	0,81	-	0,56	0,28
BRL 0.3	$f_{t(T)}$ [MPa]	5,3	4,9	3,94	2,06	-	0,55
	<i>Ecart-type</i>	1,07	0,48	0,72	0,81	-	0,15
	$f_{t(T)} / f_{t(20)}$	1,0	0,92	0,74	0,39	-	0,1
BRI 0.3	$f_{t(T)}$ [MPa]	5,64	4,49	3,33	1,41	-	0,38
	<i>Ecart-type</i>	0,44	1,28	0,44	0,09	-	0,26
	$f_{t(T)} / f_{t(20)}$	1,0	0,8	0,59	0,25	-	0,07

BSC 0.3	$f_{t(T)} \text{ [MPa]}$	5,2	-	4,6	-	0,8	0,4
	<i>Ecart-type</i>	0,76	-	0,52	-	0,03	0,07
	$f_{t(T)} / f_{t(20)}$	1,0	-	0,89	-	0,15	0,08

Tableau 4-8. Modules d'Young dynamiques résiduels (les valeurs de BSC 0.6 et BSC 0.3 sont celles obtenues par Zhi Xing dans ses travaux de thèse [Xin 2010])

	béton	20°C	150°C	300°C	450°C	600°C	750°C
BRL 0.6	$E(T) \text{ [MPa]}$	35.6	33.56	23.31	9.39	-	3.51
	<i>Ecart-type</i>	2.8	2.29	1.42	1.58	-	0.8
	$E(T)/E(20)$	1,0	0.94	0.65	0.26	-	0.4
BRI 0.6	$E(T) \text{ [MPa]}$	31.8	28.75	15.38	6.67	-	0,43
	<i>Ecart-type</i>	1.84	3.7	1.29	0.72	-	0.1
	$E(T)/E(20)$	1,0	0.9	0.48	0.21	-	0.01
BSC 0.6	$E(T) \text{ [MPa]}$	35.6	-	21.8	-	1.2	1.1
	<i>Ecart-type</i>	0,04	-	1.45	-	0,03	0,02
	$E(T)/E(20)$	1,0	-	0,61	-	0,03	0,03
BRL 0.3	$E(T) \text{ [MPa]}$	45.46	42.09	30.02	14.99	-	1.81
	<i>Ecart-type</i>	0.28	0.68	0.82	1.05	-	0.02
	$E(T)/E(20)$	1,0	0.93	0.66	0.33	-	0.04
BRI 0.3	$E(T) \text{ [MPa]}$	39	36.12	23.17	9.77	-	0,41
	<i>Ecart-type</i>	1.8	1.47	1.85	0.74	-	0.76
	$E(T)/E(20)$	1,0	0.93	0.59	0.25	-	0.01
BSC 0.3	$E(T) \text{ [MPa]}$	45,2	-	31.2	-	1.6	0,5
	<i>Ecart-type</i>	0,76	-	0,65	-	0,08	0,1
	$E(T)/E(20)$	1,0	-	0,69	-	0,04	0,01

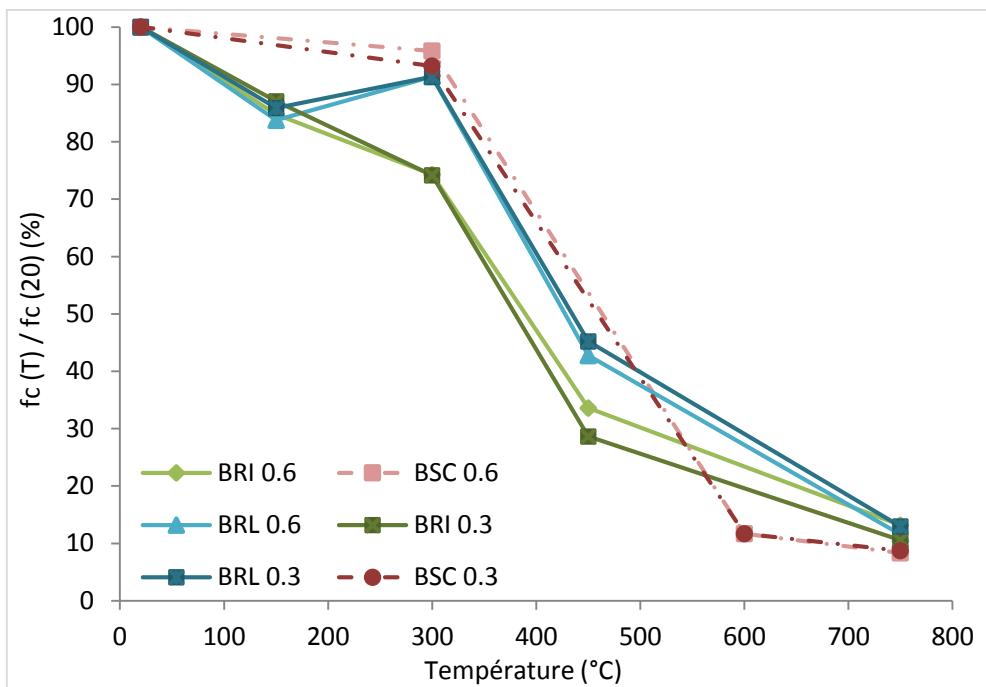


Figure 4-22. Résistance résiduelle en compression des bétons recyclés et de référence en fonction de la température de chauffage

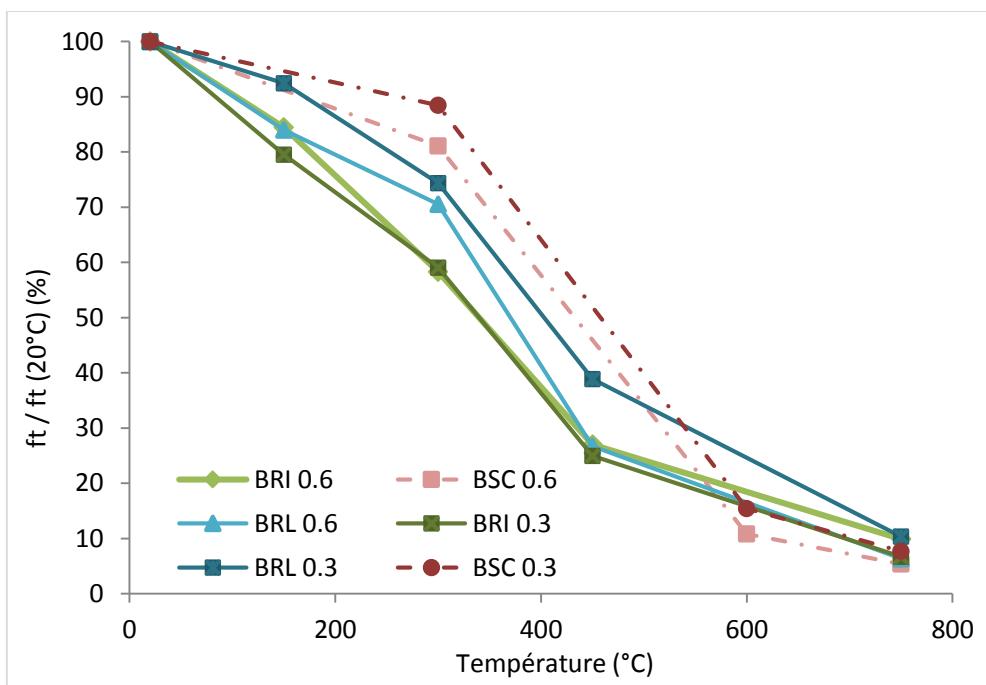


Figure 4-23. Résistance résiduelle en traction par fendage des bétons recyclés et de référence en fonction de la température de chauffage

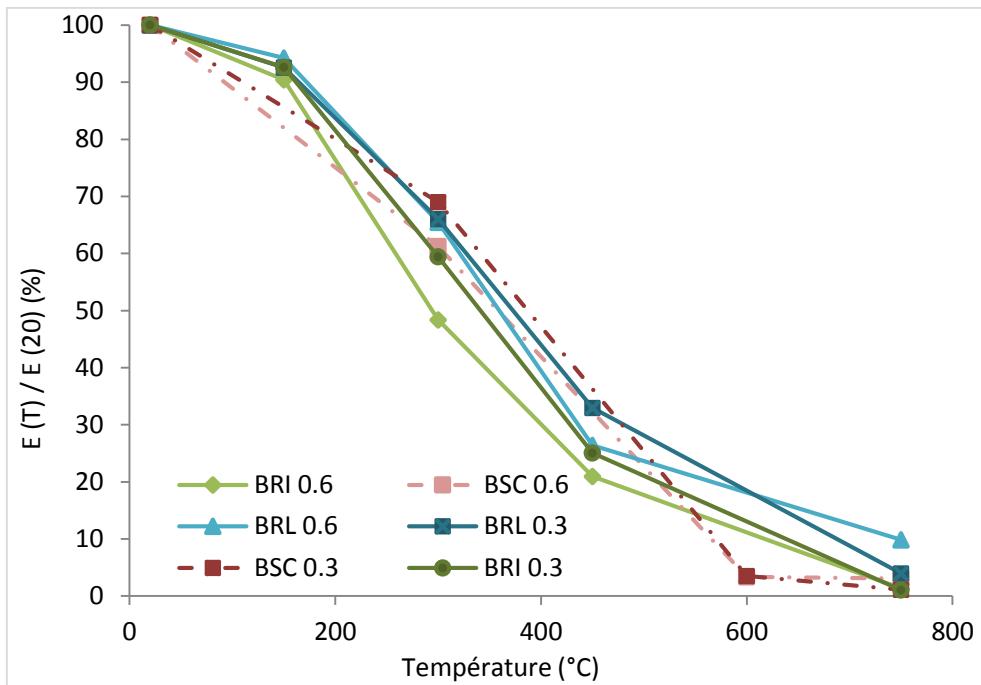


Figure 4-24. Modules d'Young résiduels dynamiques des bétons recyclés et de référence en fonction de la température de chauffage

Tous les bétons, recyclés ou de référence, présentent la même allure générale. Les courbes de résistances résiduelles à la rupture en compression présentent clairement deux paliers, avec un assez bon maintien de la résistance jusqu'à 300°C et une perte de performances beaucoup plus franche au-delà. Les résistances à la rupture résiduelles en traction par fendage et les modules d'Young, en revanche, subissent une perte de performances beaucoup plus linéaire.

3.4.2 Comparaison entre le béton recyclé de laboratoire ordinaire et son béton parent

L'évolution de la résistance résiduelle en compression en fonction de la température des bétons recyclés de laboratoire ordinaires et des bétons de référence ordinaires est très voisine. On observe dans les deux cas à 300°C une résistance en compression supérieure à 90% de la résistance initiale, mesurée à température ambiante. Une particularité cependant est observée dans le cas des BRL (ordinaire et à hautes performances) : on note systématiquement une perte de performances modérée entre 20°C et 150°C, de l'ordre de 15%, suivie d'une amélioration de la résistance qui permet de ré-atteindre plus de 90% de la résistance initiale. Ce fait a déjà été observé et discuté à plusieurs reprises dans la littérature [Hage 2004] [Pliy 2010] [Fares 2007] et a fait l'objet de différentes interprétations.

- Khoury [Khoury 1992] suppose qu'entre 20°C et 150°C la baisse de résistance résulte de la réduction des forces de cohésion Van der Walls entre les feuillets de CSH. La diminution de l'énergie de surface des feuillets de CSH conduirait à la formation de groupes silanol ($Si - OH - HO - Si$) qui présentent des forces de liaison plus faibles que les groupements siloxane ($Si - O - Si$). Puis à 300°C, le départ de l'eau conduit à la réaction suivante : $(Si - OH - HO - Si) \rightarrow Si - O - Si + H2O \uparrow$

La plus forte cohésion entre les feuillets conduirait alors au gain de résistance observé expérimentalement.

- Dias [Dias 1990] suggère que pendant la montée en température, la migration de l'eau libre dans les pores vers les zones plus froide du matériau conduit à une hydratation supplémentaire de la matrice, et donc un gain de la résistance mécanique.

On peut supposer que dans le cas de nos BRL, le mortier entourant les granulats étant encore relativement jeune, une éventuelle réhydratation peut conduire à la formation de nouvelles liaisons entre l'ancienne et la nouvelle pâte, renforçant ainsi l'interface entre les deux. L'absence de point de mesure à 150°C pour les BSC ne nous permet pas de conclure sur leur comportement entre 20°C et 300°C.

A partir de 450°C, on constate une diminution constante de la résistance en compression avec la température, avec une pente semblable pour les BRL et les BSC. Cette perte de résistance est due à l'apparition de fissures, liée à différents phénomènes, comme la deshydroxylation de la portlandite ou encore l'incompatibilité de déformation entre la pâte de ciment et les granulats.

Les BRL et BSC présentent une évolution du module résiduel quasi-identique avec la température. Ceci permet de conclure sur la faible influence de la quantité de pâte et du nombre de zones interfaciales sur cette caractéristique.

Les valeurs de résistance résiduelle en fendage par traction sont en revanche légèrement inférieures dans le cas des BRL 0.6 alors que leur valeur absolue à température ambiante est plus élevée. Le comportement en traction du béton est lié à la qualité de l'adhérence pâte-granulat. Si le nombre plus élevé d'interfaces ne semble pas avoir d'influence à température ambiante, on peut supposer que ces zones particulières sont un point de départ de fissuration privilégié à haute température, et qu'alors, leur plus grand nombre impacte légèrement la résistance en traction du matériau chauffé.

La comparaison du béton parent (BSC 0,6) avec le béton de granulat recyclé de même formulation (BRL 0,6) n'a pas mis en évidence d'influence défavorable des caractéristiques propres aux granulats recyclés (pâte supplémentaire attaché au granulat d'origine, un plus grand nombre de zones interfaciales et une plus forte teneur en eau) sur l'évolution de la résistance en compression et du module d'élasticité avec la température. En revanche, par rapport au béton BSC 0,6, la résistance en traction résiduelle du béton recyclé BRL 0,6 diminue un plus rapidement.

3.4.3 Comparaison entre les bétons recyclés à matrice ordinaires et hautes performances

L'analyse de la fissuration réalisée paragraphe 3.1 avait mis en évidence l'influence favorable d'une matrice hautes-performances sur la longueur cumulée des fissures et le pourcentage de surface fissurée après traitement à 450°C. Il s'ensuit logiquement une amélioration sensible du module d'Young et de la résistance à la traction résiduels. L'influence sur la résistance en compression est, comme pour les bétons de référence, plus faible.

3.4.4 Comparaison entre les deux types de bétons recyclés, BRL et BRI

Les évolutions des résistances à la rupture et du module d'Young résiduels des BRL et BRI en fonction de la température divergent à partir de 300°C. Cela s'observe pour les deux rapports E/C, 0.3 et 0.6. Les propriétés mécaniques résiduelles relatives des bétons de granulats recyclés industriels sont inférieures d'environ 10% à celles des bétons de granulats recyclés de laboratoire. Ces résultats sont cohérents avec l'analyse de la fissuration sur les rondelles. A 450°C, la longueur cumulée des fissures des BRI est pratiquement deux fois plus élevée que celle des BRL.

Cette variation ne peut être liée à l'état hydrique du béton avant chauffage, celui-ci étant le même pour tous les bétons étudiés.

En revanche, deux hypothèses pouvant expliquer la différence de comportement entre les différents types de bétons recyclés peuvent être retenues :

- A 300°C, une potentielle réhydratation de la pâte des GRL induirait un renforcement de l'interface « ancienne pâte – nouvelle pâte » des BRL, soit une amélioration globale des performances mécaniques.
- Nous avons vu dans le chapitre 2 que l'on trouve parmi les GRI des déchets non cimentaires, et combustibles. On peut alors supposer que pendant le chauffage, la combustion de ces déchets entraîne l'apparition de porosité et de fissuration au sein de la matrice, soit la multiplication de zones de faiblesse qui conduisent à une perte de performances mécaniques plus prononcées que dans le cas des BRL. Cette tendance se retrouve dans les valeurs du module d'élasticité, qui sont très proches en relatif, mais clairement inférieures en absolue pour les BRI.

L'hypothèse de la combustion des déchets non cimentaires dans les BRI a été confortée visuellement par l'apparition de « coulures » sur les éprouvettes chauffées à 300°C (Figure 4-25) ainsi que par le pic exothermique enregistré par les thermocouples au cours du chauffage (Figure 4-21).



Figure 4-25. Combustion de déchets de construction non cimentaires dans les éprouvettes de BRI

4. Conclusion

Ce chapitre présente une analyse comparée de l'évolution des propriétés physiques, thermiques et mécaniques des bétons recyclés étudiés et de bétons naturels de référence avec la température. Ces bétons ont été soumis à des cycles de chauffage et refroidissement à vitesse lente ($0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) jusqu'aux températures cibles 150°C , 300°C , 450°C et 750°C . Trois types de granulats sont comparés, deux recyclés et un naturel de référence, ainsi que deux matrices cimentaires à compacités différentes (rapport E/C 0.6 et 0.3).

Il est avant tout important de noter qu'aucun éclatement n'a été observé pour les formulations de bétons recyclés lors des cycles de chauffage – refroidissement, tandis que 20% des éprouvettes de béton à hautes performances de granulats naturel de référence silico-calcaires ont éclaté. Cette caractéristique est attribuée à la plus grande porosité des bétons recyclés (2 à 4% supérieure à la porosité des bétons de référence) qui permet une évacuation plus rapide de la vapeur d'eau, et donc une montée en pression moindre [Noum 2009]. L'étude approfondie de la fissuration des éprouvettes a montré que la majeure partie de la fissuration intervient aux interfaces pâte-granulat d'origine ou ancienne pâte - nouvelle pâte. Dans le cas des bétons à matrice hautes performances, on n'observe que très peu de fissures à l'interface entre les deux pâtes. On note, en revanche, des fissures entre le granulat d'origine et la nouvelle pâte ou l'ancienne pâte. Ceci peut s'expliquer par une plus grande dilatation différentielle entre la pâte et le granulat qu'entre les deux pâtes.

A 750°C le pourcentage de l'aire fissurée des bétons recyclés est inférieur à celui des bétons de référence à 600°C .

Nous avons vu dans le chapitre 3 que les bétons recyclés présentent des caractéristiques physiques particulières, en ce qu'ils sont moins denses et plus poreux que les bétons de granulats naturels de même formulation. Cependant, les campagnes d'essai menées sur des bétons chauffés indiquent que ces caractéristiques évoluent de la même manière pour les bétons de granulats recyclés que pour les bétons de granulats naturels de référence. On constate que la quantité de pâte totale ainsi que le nombre d'interfaces a peu d'influence sur l'évolution de ces caractéristiques avec la température.

Les bétons recyclés présentent des propriétés thermiques un peu différentes de celle des bétons naturels, avec notamment une plus faible conductivité thermique, et une plus forte diminution des propriétés thermiques avec la température, liées à leur plus grande porosité. Pour autant, nous avons pu constater que les bétons recyclés ont une réponse thermique proche de celles des bétons naturels lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées. Les différences de répartition de la température au sein de l'éprouvette entre les bétons recyclés et de référence sont plus liées aux différences de consommation de chaleur latente et la fissuration du béton qu'aux différences de conductivité ou diffusivité thermiques. Une différence notoire est apparue pour les bétons recyclés industriels, BRI, pour lesquels on constate une brève réaction exothermique, liée à la combustion de déchets non cimentaires trouvés dans les GRI. On note ici l'importance fondamentale du tri. Nous avons observé un endommagement plus important des BRI par rapport aux BRL, et ce quelle que soit la compacité de la matrice. En effet, la présence de ces déchets impacte aussi bien le développement de la fissuration, les performances mécaniques résiduelles (environ 10 % inférieures à celles des BRL, avec la création de porosité et de sites de faiblesse préférentiels lors de la combustion des déchets), que les performances thermiques (influencées par les performances thermiques intrinsèques des déchets).

Par ailleurs, nous constatons que l'évolution des propriétés physiques, thermiques et mécaniques avec la température des bétons de granulats recyclés de laboratoire et des bétons de référence sont très proches, et ce particulièrement pour les bétons à matrice ordinaire (dont l'ancienne pâte et la nouvelle pâte ont la même composition). Les performances mécaniques résiduelles du BRL 0.3 sont légèrement plus éloignées de celles du BSC 0.3.

Références bibliographiques

[Baro 1994] v. Baroghel-Bouney, Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons – méthode, analyse, interprétations, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Ministère de l'Equipement des Transports et du Tourisme, 1994

[Dias 1990] WPS. Dias, GA. Khoury, and PJE. Sullivan. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700°C. *ACI Material Journal*, 87 (1990) 160-166.

[Eurocode 2] European Committee for Standardization, EN 1992-1-2, in Eurocode 2 Design of Concrete Structures, Brussels, CEN, (2004)

[Fare 2007] Hanaa FARES, Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2007)

[Hage 2004] I. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004

[Kane 2007] M. Kanéma, Influence des paramètres de formation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2007)

[Khou 1992] GA. Khoury. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of Concrete Research*, 161 (1992) 291-309.

[Noum 2009] Albert N. Noumowe, Rafat Siddique, G. Debicki, Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C), *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1855–1861

[Pliy 2010] P. Pliya, Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2010)

[Rile 2004] Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Rilem publications SARL, 2004

[Sarh 2013] Salah R. Sarhat and Edward. G. Sherwood, Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperature, *Journal of Material in Civil Engineering*, 25, (2013) 1721-1730

[Xiao 2013] J. Xiao, Y. Fan, M.M Tawana, Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures, *Berlin – Structural Concrete* 14, 2, (2013)

[Xing 2010] Zhi XING, Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (2011)

[Xing 2011] Zhi Xing, Anne-Lise Beaucour ,Ronan Hebert, Albert Noumowe, Béatrice Ledesert, Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 392–402

Chapitre 5. Impacts environnementaux et analyse de cycle de vie

1. Introduction

Le contexte écologique actuel incite les entreprises, et notamment celles du bâtiment, à limiter leurs impacts environnementaux afin de réduire le réchauffement climatique et d'aller vers une gestion optimisée de leurs déchets. Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) génère à lui seul plus de 250 millions de tonnes de déchets annuellement, et est responsable d'une grande partie de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre. Il est donc important, afin d'atteindre les objectifs fixés de réduction des émissions de gaz à effet de serre entre autres, de trouver des solutions plus respectueuses de l'environnement.

Le béton, matériau très utilisé dans le domaine de la construction, est présent en France dans 60% des logements individuels et dans 90% des logements collectifs. Il est donc tout à fait naturel de s'intéresser aux impacts environnementaux associés à sa production, sa destruction et aux ingrédients entrant dans sa composition.

D'après le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, la production de granulats en France métropolitaine était estimée à 379 millions de tonnes en 2011. 54,1 % de la production de granulats proviennent de roches massives, d'origine calcaire (100 millions de tonnes) ou éruptive (autrement dit siliceuse ; 105 millions de tonnes). 39,3 % proviennent de l'exploitation de gisements de roches meubles d'origine alluvionnaire (119 millions de tonnes), de granulats marins (7 millions de tonnes) ou d'autres sables (23 millions de tonnes). Le reste provient de matériaux de recyclage, pour l'essentiel issus de la démolition (19 millions de tonnes), mais également de schistes, de laitiers et de mâchefers (6 millions de tonnes). La masse de granulats recyclés est à peu près constante depuis quelques années.

La présente analyse vise donc à évaluer l'intérêt environnemental du recyclage des déchets de démolition sous forme de nouveaux granulats.

2. Notion de déchet inerte et intérêt du recyclage

Actuellement le secteur de la construction est le plus gros producteur de déchets. Avec près de 250 millions de tonnes déchets produits, il se classe en première place bien loin devant le secteur du tertiaire (24 millions de tonnes), de l'industrie (22 millions de tonnes) et pour finir de l'agriculture (avec 2 millions de tonnes).

Les déchets des BTP sont, pour la plupart, considérés comme des déchets inertes. Le terme "déchet" est défini dans l'article L 541-1 du code de l'environnement.

Ce sont les Articles R 541-7 à R 541-11 du Code de l'environnement qui définissent le cadre réglementaire relatif aux déchets inertes. D'après l'Article R541-8 Modifié par Décret n°2011-828 du 11 juillet 2011 - art. 8, un déchet inerte est « tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine » (par exemple des pavés, sables, gravats, tuiles, béton, ciment, carrelage...) [R. 541-8].

Les déchets des BTP sont générés lors de la construction, la rénovation, la maintenance ou la réhabilitation d'ouvrages et bâtiments et surtout lors de la déconstruction ou la démolition. Les principaux matériaux pouvant être à l'origine de déchets inertes sont :

Les matériaux de construction parmi lesquels :

- Les matériaux minéraux naturels (pierre, marbre, grès, ardoise...),
- Le béton, le ciment,
- Les terres cuites (céramique, carrelage, tuile, brique...),
- Le verre : vitrage sans châssis, non armé,

Les terres et matériaux de terrassement (hors terre végétale).

La Figure 5-1 ci-dessous représente une enquête de l'ADEME sur le tri et la valorisation des déchets du BTP sur 39 plates-formes françaises. Cette enquête révèle que le matériau inerte est le plus présent dans les déchèteries, et parmi eux le béton représente près de la moitié des entrants.

Le béton est donc un matériau à fort potentiel de valorisation du fait de son abondance. La répartition des tonnages du bâtiment par sous-activités indique que 75 % des déchets inertes proviennent de la démolition (Figure 5-2).

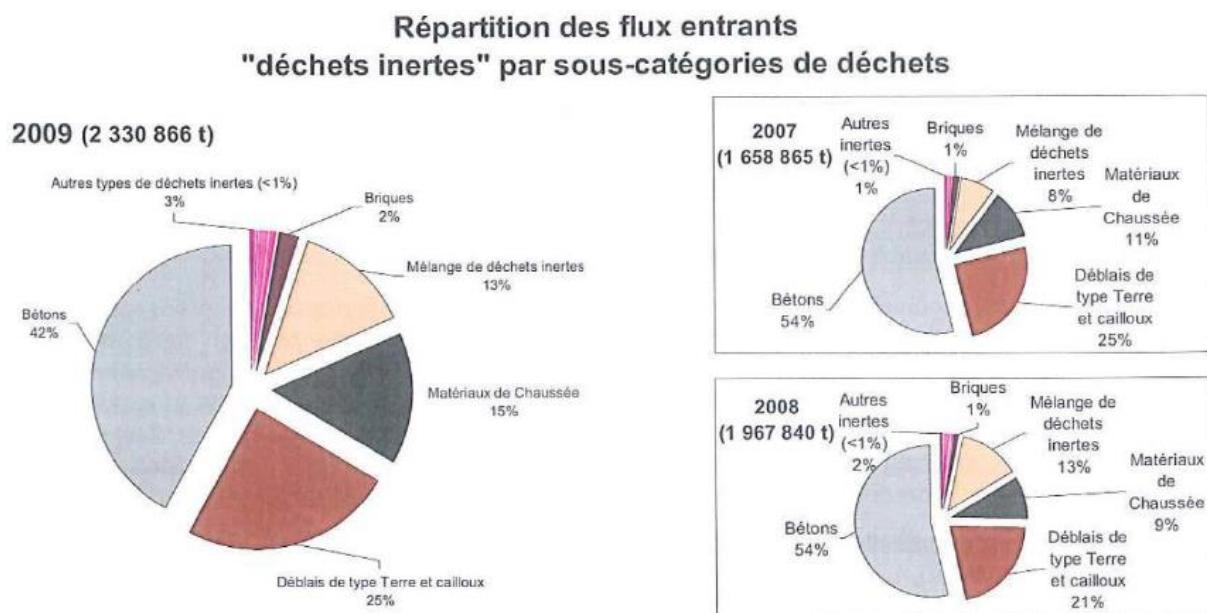


Figure 5-1. Répartition des flux entrants de déchets inertes [ADEME 2012]

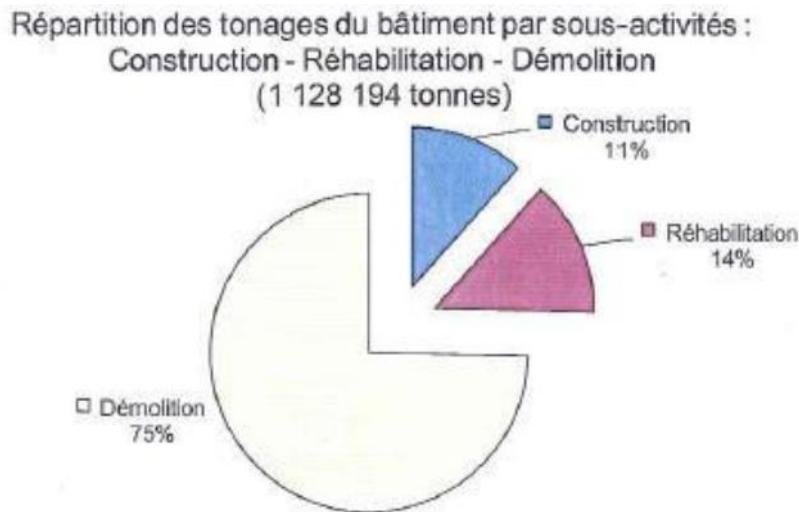


Figure 5-2. Répartition par tonnage des sous-activités du bâtiment [ADEME 2012]

Le Tableau 5-1 résume les caractéristiques mécaniques du béton, de l'acier et du bois. On constate que l'acier présente des performances mécaniques largement supérieures au béton et au bois, qui ont des propriétés comparables. On note en revanche la consommation en énergie grise du béton, qui est nettement inférieure à celle de l'acier et du bois. Celle-ci est 32 fois moins importante que celle de l'acier. Le calcul de cette énergie grise prend en compte l'analyse du cycle complet de vie du produit : conception, extraction et transport des matières premières, transformation des matières et fabrication du produit, commercialisation, usage et mise en œuvre et enfin, son recyclage. On calcule ainsi la somme des énergies nécessaires de la conception au recyclage d'un matériau. Cette quantité d'énergie nécessaire est exprimée en kWh (10 kWh = 1 litre de mazout).

La faible consommation en énergie grise du béton est donc un atout évident pour favoriser son recyclage.

Tableau 5-1. Caractéristiques mécaniques comparatives de matériaux de construction

	Acier	Bois	Béton
Résistance à la compression	300 MPa	25 MPa	20 MPa à 40 MPa
Résistance à la traction	235 à 355 MPa	24 à 32 MPa	2,1 à 2,7 MPa
Module d'Young	210 GPa	12 GPa	20 à 50 GPa
Energie grise	60 000 kWh/m ³	2200 kWh/m ³	1850 kWh/m ³

3. Impacts environnementaux et analyse de cycle de vie (ACV)

Le calcul des impacts environnementaux d'un produit est régi par les normes ci-dessous :

ISO 14040, créée en 1997 et actualisée en 2006. Elle décrit les principes Généraux de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) ;

ISO 14044, datant de 2006, qui spécifie les exigences et donne les lignes directrices pour la réalisation d'analyses du cycle de vie (ACV) ;

ISO 14020, qui présente les principes généraux pour une Déclaration Environnementale ;

NF P 01 010, datant de décembre 2004, norme française intitulée « Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction ». Elle définit le contenu et le mode de réalisation de la Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) dans le cadre des produits de construction. Les FDES permettent aux concepteurs (architectes ou ingénieurs) de recommander aux maîtres d'ouvrage les produits en adéquation avec les exigences de leur projet constructif, dans le cadre d'une démarche de haute qualité environnementale (HQE®) par exemple ;

ISO 14025, qui définit le Marquage et la Déclaration Environnementale de type III consistant en la fourniture de données quantitatives sur les impacts environnementaux d'un produit (souvent sous forme de diagrammes). Un éco-profil, élaboré volontairement par un industriel à l'issue d'une analyse du cycle de vie, donne une photographie à un instant donné des impacts environnementaux du produit et peut être actualisé périodiquement.

Nous cherchons ici à évaluer l'impact environnemental des bétons à base de granulats recyclés par l'intermédiaire d'une analyse de cycle de vie, en suivant les recommandations de la norme ISO 14040 [ISO 14040].

Une analyse de cycle de vie est articulée en quatre étapes, cadrées par la série de normes ISO 14040, et décrites ci-après :

3.1 Définitions des objectifs et du champ de l'étude

L'étape de définition des objectifs et champs de l'étude permet de justifier les choix et les partis-pris au cours de l'ACV. Le résultat final en dépendra et cette analyse ne pourra être utilisée dans un autre contexte.

3.1.1 Unité fonctionnelle

Cette étape consiste à définir la fonction du produit étudié et son « unité fonctionnelle », soit la base de comparaison pour évaluer l'impact des différentes alternatives étudiées. La comparaison doit se faire à qualité, quantité et durée de service égales, afin de permettre la confrontation des produits. Une unité fonctionnelle mal définie fera perdre l'intérêt de l'analyse.

3.1.2 *Frontières du système*

Les frontières du système dépendent des objectifs de l'étude, du choix d'inclure ou d'exclure certains flux ou processus. Une ACV consiste en une analyse des impacts environnementaux « from cradle to grave » (soit littéralement : du berceau à la tombe). On considère donc toutes les étapes du cycle de vie. En pratique cependant, certaines étapes sont relativement complexes (comme par exemple la fin de vie, avec l'impact du recyclage) et les choix doivent être affinés au fur et à mesure de l'étude.

3.2 Analyse de l'inventaire

L'inventaire de cycle de vie (ICV) est la phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants, pour un système de produits donné au cours de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie.

La collecte des données constitue la phase la plus longue de l'étude. En effet, la qualité des données influant directement sur la qualité des résultats obtenus, il est important de s'assurer de la fiabilité des informations collectées. Il est préférable de collecter des données primaires ou spécifiques, c'est-à-dire des données qui proviennent de mesures faites sur site. Il est cependant difficile d'obtenir cette précision, c'est pourquoi l'on considère souvent des données secondaires ou génériques provenant de sources publiées.

L'inventaire devra être suffisamment bien réalisé pour qu'une personne tierce soit capable de reproduire l'analyse à partir de ces données.

3.3 Evaluation de l'impact

Cette phase est destinée à comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement tout au long de son cycle de vie.

Cette phase permet de se poser les questions suivantes :

- Les données sont-elles assez fiables et suffisantes pour réaliser l'ACV ?
- Les règles de coupure des données sont-elles pertinentes ?
- Les frontières ont-elles été bien définies ?

3.4 Interprétation des résultats

Cette dernière phase a pour objectif d'analyser les résultats et d'expliquer les limites de l'inventaire et/ou de l'évaluation des impacts. Elle met en avant les points forts et les points faibles d'un système et les paramètres ou les étapes sensibles.

Suivant la norme, cette étape s'appuie sur l'identification des points significatifs de l'inventaire et de l'évaluation des impacts du cycle de vie accompagnée de différents contrôles. On peut parfaire cette

interprétation en réalisant une analyse d'incertitude qui consiste à appliquer à chaque donnée de l'inventaire un coefficient de fiabilité afin de voir son influence sur le résultat final.

Il est cependant important de noter que les résultats d'ACV s'appuient sur des bases de données mondiales. Elles sont, dans la mesure du possible adaptées au contexte géographique de l'étude, mais présentent malgré tout des incertitudes. Plus qu'une quantification absolue des impacts environnementaux, l'ACV permet la comparaison de deux produits ou systèmes entre eux.

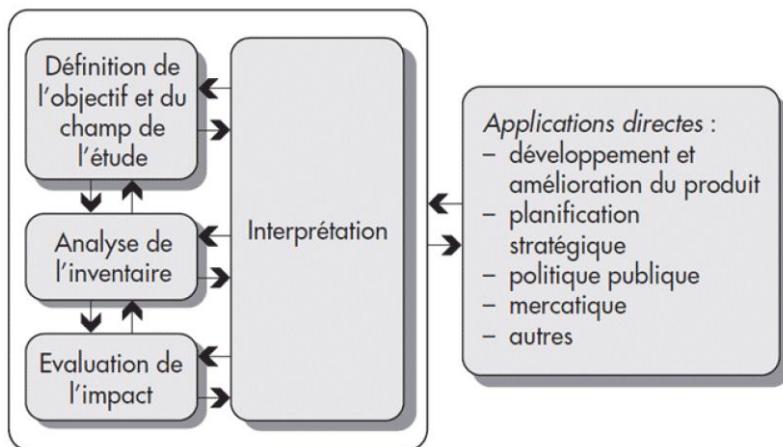


Figure 5-3. Étapes d'une analyse du cycle de vie

4. Evaluation environnementale des granulats

L'exploitation croissante des carrières de granulats associée au renouvellement du parc immobilier générant de grandes quantités de déchets de construction et de déconstruction a poussé les professionnels du secteur à envisager la possibilité de se servir de ces déchets sous forme de granulats dans la composition de nouveaux bétons [Eval UNPG] [Mod UNPG].

Si les bétons à base de granulats recyclés sont viables techniquement de par leurs caractéristiques techniques et chimiques, sont-ils intéressants d'un point de vue environnemental ? Jusqu'à présent, le meilleur moyen d'évaluer les impacts environnementaux associés à un produit est de réaliser son analyse de cycle de vie.

Les informations données par le rapport de l'ADEME [ADEME 2012] permettent de comparer dans la globalité les impacts environnementaux issus de la mise à disposition d'une tonne de granulats, selon leur source (recyclés, meubles ou massifs) (Figure 5-4). Pour chaque entrée, les résultats sont normalisés sur 100% par rapport au système le plus impactant des trois.

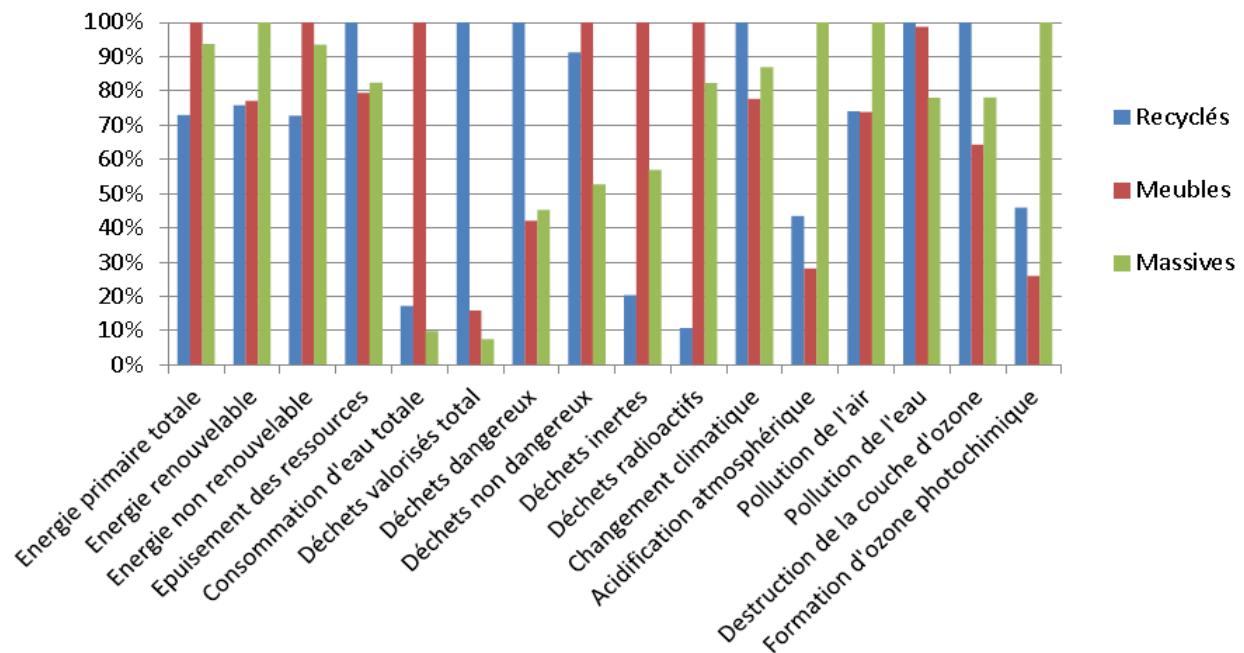


Figure 5-4. Comparaison des impacts de granulats selon leur source [ADEME 2012]

Le graphique (Figure 5-4) montre clairement qu'il n'y a pas un type de granulat plus impactant que les autres. Il est impossible de statuer à première vue sur l'intérêt environnemental d'un granulat plutôt qu'un autre. On observe ainsi que la consommation d'énergie primaire totale est dominée par les granulats provenant de roches massives ou meubles, la consommation nécessaire pour les granulats recyclés étant environ 30% inférieure.

La consommation d'eau est largement supérieure pour les roches meubles, la production des granulats recyclés n'en représentant que 10%. Au contraire, une importante quantité de déchets dangereux est générée par les granulats recyclés.

Le rapport de l'ADEME nous communique les impacts environnementaux finaux des granulats au format des fiches de déclarations environnementales et sanitaires mais ne donne pas d'informations dans le détail. Notre modélisation sur le logiciel Simapro nous permettra d'explorer dans le détail les éléments responsables des impacts environnementaux étudiés pour un béton recyclé et un béton naturel.

5. Définition des objectifs et du champ d'étude

Afin de détailler les impacts environnementaux causés par la fabrication d'un béton recyclé comparativement à un béton naturel, nous réalisons notre propre analyse de cycle de vie.

5.1 Champ de l'étude

Cette étude est une analyse comparative des impacts environnementaux entre un béton naturel et de deux bétons recyclés.

L'inventaire du cycle de vie comprendra, dans la mesure du possible, tous les entrants et sortants des étapes d'élaboration des granulats. Dans cette étude, nous ne considérerons que la mise à disposition des granulats sur le site de fabrication puis son transport jusqu'au site de fabrication du béton et la fin de vie du béton. De ce fait, les étapes d'utilisation en cours de vie ne seront pas prises en compte. En effet, les différents systèmes comparés auraient subi exactement la même « vie en œuvre », et cette étape n'est donc pas significative.

L'étude a été modélisée à l'aide du logiciel *Simapro*, spécialisé pour la réalisation d'analyses de cycle de vie, et de la base de données *EcoInvent*. La modélisation est associée à des modules et données présents dans cette base de données mais certains d'entre eux ont été créés ou modifiés afin d'être le plus proches possible de la réalité.

5.2 Unité fonctionnelle

Ce qui nous servira de base dans cette étude et donc d'unité fonctionnelle sera l'élaboration d'un m³ de béton naturel, puis recyclé selon deux scénarios différents.

5.3 Objectifs de l'étude

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Présenter en détail les impacts environnementaux générés par la production d'un m³ de béton afin d'évaluer l'intérêt d'étudier les bétons à base de granulats recyclés sur le plan environnemental. Nous avons choisi de travailler à partir de la formulation BRL 0.6 réellement étudiée dans le cadre de ces travaux de thèse (chapitre 3).
- Comparer les impacts environnementaux des bétons recyclés et des bétons naturels.
- Déterminer les éléments principalement responsables des impacts environnementaux.
- Identifier les points sensibles et les axes d'amélioration d'un point de vue environnemental.
- Apporter un avis scientifique sur la viabilité de ces granulats.

Afin d'étudier les indicateurs les plus pertinents dans notre cas, différentes méthodes de calcul ont été croisées et utilisées. Nous retenons principalement :

- Le changement climatique (kg CO₂ eq)
- La consommation d'énergie primaire totale (MJ eq)
- La consommation d'énergie renouvelable (MJ eq)
- L'épuisement des ressources (kg Sb eq)
- La production de déchets dangereux (kg)

6. Inventaire du cycle de vie

6.1 Hypothèses générales

Cette partie du rapport a pour but de décrire les règles générales et les hypothèses appliquées à la modélisation.

La première analyse, qui fait office d'introduction, consiste à détailler les impacts environnementaux d'élaboration d'un m³ de béton. Elle comprend les trois premières phases classiques du cycle de vie telles que : l'approvisionnement en matières premières, la distribution jusqu'au site de production, et la fabrication du béton, qui sont complétées par une étape de fin de vie. Nous considérons trois alternatives :

- **Une alternative sans recyclage** dans laquelle des granulats naturels sont utilisés et les déchets de démolitions placés en installation de stockage en fin de vie
- **Une alternative avec recyclage in-situ**, soit réutilisation des déchets de chantier sur le site même de démolition, et ne présentant donc pas d'étape de transport jusqu'au site de fabrication. L'étape de fin de vie les destine à un nouveau recyclage.
- **Une alternative avec recyclage hors site** comprenant une étape de transport depuis le chantier de démolition vers un autre chantier de construction. L'étape de fin de vie les destine à un nouveau recyclage.

La formulation considérée est résumée Tableau 5-2. Afin de ne faire varier que le paramètre « cycle de vie » dans l'étude, nous avons choisi d'utiliser la même formulation pour les bétons naturels ou recyclés, malgré la différence de densité entre les granulats naturels et recyclés.

Tableau 5-2. Formulation étudiée. Données pour un m³

matériaux	Quantité (en kg)
Ciment	362
Granulats	952
Sable	766
Eau	182

La formulation retenue étant similaire dans les trois alternatives étudiées, les résultats ne seront pas impactés par la mise à disposition de ciment ou de sable, identiques dans tous les cas.

Cette étude est faite dans un cadre français, c'est-à-dire prenant en compte autant que possible des données adaptées à la France notamment en ce qui concerne le mix électrique, d'origine principalement nucléaire et produisant peu de gaz à effet de serre.

Lors de l'analyse de cycle de vie de bétons de granulats recyclés, se pose souvent la question du « début de vie » des granulats recyclés. Il est parfois supposé qu'il concorde avec la fabrication du béton dit « parent », qui a été concassé pour les obtenir (comme dans l'étude de l'ADEME évoquée

précédemment [ADEME 2012]). Nous faisons ici l'hypothèse de prendre comme début de vie la démolition de l'ouvrage amené à être recyclé, et non la construction de cet ouvrage.

6.2 Phase de production

Les matériaux et équipements utilisés pour la production de granulats sont des métaux, des alliages, des matériaux plastiques, des produits chimiques et des minéraux. La production de tous ces éléments nécessite de l'énergie et l'extraction de matières premières, tout un cycle de production est ainsi associé aux éléments nécessaires pour la fabrication des granulats. Ces données sont déjà incluses dans la base de données EcoInvent.

La fabrication de granulats nécessite différentes énergies telles que des carburants, essence et diesel, de l'électricité et du gaz naturel. Ces énergies et carburants ainsi que leur production sont pris en compte dans la base de données EcoInvent, à un niveau européen moyen ou à un niveau français si les modules correspondants sont disponibles.

Le procédé classique de production de granulats naturels suit principalement les grandes étapes suivantes [ADEME 2012] :

- Découverte du gisement : les niveaux non exploitables sont enlevés afin de mettre à jour le gisement.
- Extraction : les matières premières sont ensuite exploitées selon les techniques classiques
- Transport interne et traitement : les matières premières extraites sont transportées vers l'unité de traitement par des tombereaux ou des convoyeurs. Le traitement se décompose en plusieurs phases selon le type de transformation (concassage, criblage, lavage)
- Stockage : Les granulats sont stockés en tant que granulats primaires ou secondaires
- Transport externe : Cette étape consiste à acheminer les granulats jusqu'au client.

Les différents éléments et flux pris en compte pour la réalisation des modules d'informations environnementales de la production de granulats sont les suivants :

- L'extraction des matières premières minérales
- Les consommations énergétiques
- Les consommations d'eau
- Les transports routiers

La norme NF P 01-010 permet d'exclure des frontières du système les flux suivants :

- L'éclairage, le chauffage et le nettoyage des ateliers
- Le département administratif
- Le transport des employés

Sont également exclus :

- Les consommables en très petites quantités tels que les lave-glaces, batteries, filtres...
- Les vêtements de sécurité tels que les gants, chaussures, casques...

- Les équipements de signalisation tels que les panneaux, piquets, bois...
- Les éléments de quincaillerie tels que la boulonnerie, la visserie...
- Les outils de manutention, les produits d'hygiènes, les floculants...
- Les consommables du site tels que l'oxygène, l'acétylène.
- Le transport amont des engins du parc matériel du site de production

Il nous est possible de ne pas prendre en compte ces derniers éléments dans la mesure où leur masse est très faible par rapport à la masse totale annuelle de consommables et car ils ne présentent pas de caractère dangereux.

Les données de l'inventaire proviennent de huit sites de production de granulats issus de roches massives, de huit sites de production de granulats issus de roches meubles et de sept sites de production de granulats recyclés. Ces données proviennent du guide sectoriel 2012 de l'ADEME concernant les carrières de granulats et sites de recyclage. Il a été rédigé en partenariat avec l'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG).

7. Résultats

L'évaluation des impacts environnementaux est résumée dans les Tableau 5-3Tableau 5-4 Tableau 5-5 suivants pour les trois alternatives étudiées.

Les impacts sont détaillés en plusieurs catégories :

- A1 : extraction des matières premières
- A2 : transport (livraison) des matières premières
- A3 : fabrication
- A4 : transport vers le chantier de mise en œuvre
- B : vie en œuvre
- C1 : démantèlement, démolition
- C2 : transport
- C3 : traitement des déchets valorisés
- C4 : élimination
- D : réutilisation (ici nous avons choisi d'employer la méthode des stocks)

Afin de simplifier la lecture, ces postes ont été regroupées selon trois grands axes :

- A1 + A2 : production des matières premières
- A3 + A4 : mise en œuvre
- C1 + C2 + C3 + C4 + D : fin de vie

La vie en œuvre de l'ouvrage (B) n'a pas été considérée, puisqu'impactée principalement par son utilisation, elle a été jugée identique dans les trois cas, et donc sans intérêt direct ici.

Tableau 5-3. Impacts environnementaux d'un m³ de béton naturel sans recyclage

Catégorie d'impact	Unité	Total	Production matières premières	Mise en œuvre	Fin de vie
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	3,80E+02	3,25E+02	5,34E+00	4,92E+01
Non renewable, fossil	MJ eq	2,54E+03	1,53E+03	7,80E+01	9,38E+02
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,15E+00	6,84E-01	3,55E-02	4,28E-01
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,09E-05	1,04E-05	6,64E-07	9,78E-06
Bulk waste	kg	2,27E+03	5,43E+00	4,83E-02	2,26E+03
Hazardous waste	kg	4,71E-03	1,79E-03	7,42E-05	2,85E-03

Tableau 5-4. Impacts environnementaux d'un m³ de béton recyclé in situ

Catégorie d'impact	Unité	Total	Production matières premières	Mise en œuvre	Fin de vie
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	3,55E+02	3,23E+02	5,34E+00	2,67E+01
Non renewable, fossil	MJ eq	1,98E+03	1,49E+03	7,80E+01	4,11E+02
Abiotic depletion	kg Sb eq	9,13E-01	6,91E-01	3,55E-02	1,87E-01
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,46E-05	9,98E-06	6,64E-07	3,92E-06
Bulk waste	kg	6,31E+00	4,37E+00	4,83E-02	1,89E+00
Hazardous waste	kg	2,56E-03	1,49E-03	7,42E-05	9,90E-04

Tableau 5-5. Impacts environnementaux d'un m³ de béton recyclé hors site

Catégorie d'impact	Unité	Total	Production matières premières	Mise en œuvre	Fin de vie
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	3,58E+02	3,26E+02	5,34E+00	2,67E+01
Non renewable, fossil	MJ eq	2,02E+03	1,54E+03	7,80E+01	4,11E+02
Abiotic depletion	kg Sb eq	9,34E-01	7,12E-01	3,55E-02	1,87E-01
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,50E-05	1,04E-05	6,64E-07	3,92E-06
Bulk waste	kg	6,62E+00	4,68E+00	4,83E-02	1,89E+00
Hazardous waste	kg	2,70E-03	1,64E-03	7,42E-05	9,90E-04

Tableau 5-6. Méthodes utilisées

EPD 2007 (draft version) V1.02
CML 2 baseline 2000 V2.04 / World, 1990
EDIP/UMIP 97 V2.04 / EDIP World/Dk

Les Figure 5-5Figure 5-6Figure 5-7 suivantes illustrent plus clairement l'influence de chaque poste sur les impacts environnementaux globaux.

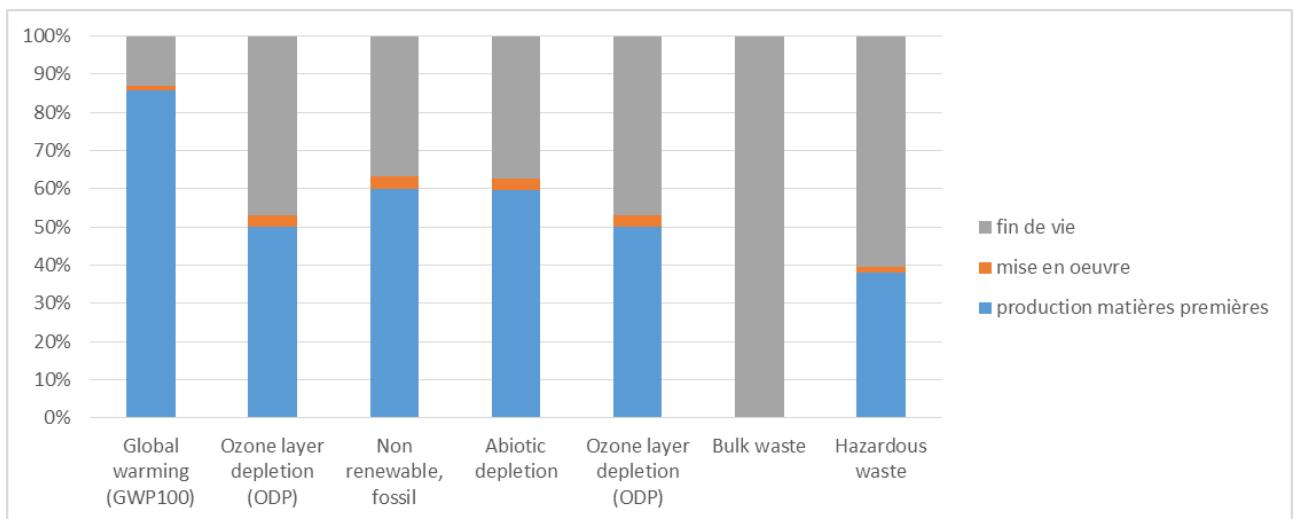


Figure 5-5. Répartition des impacts - alternative sans recyclage

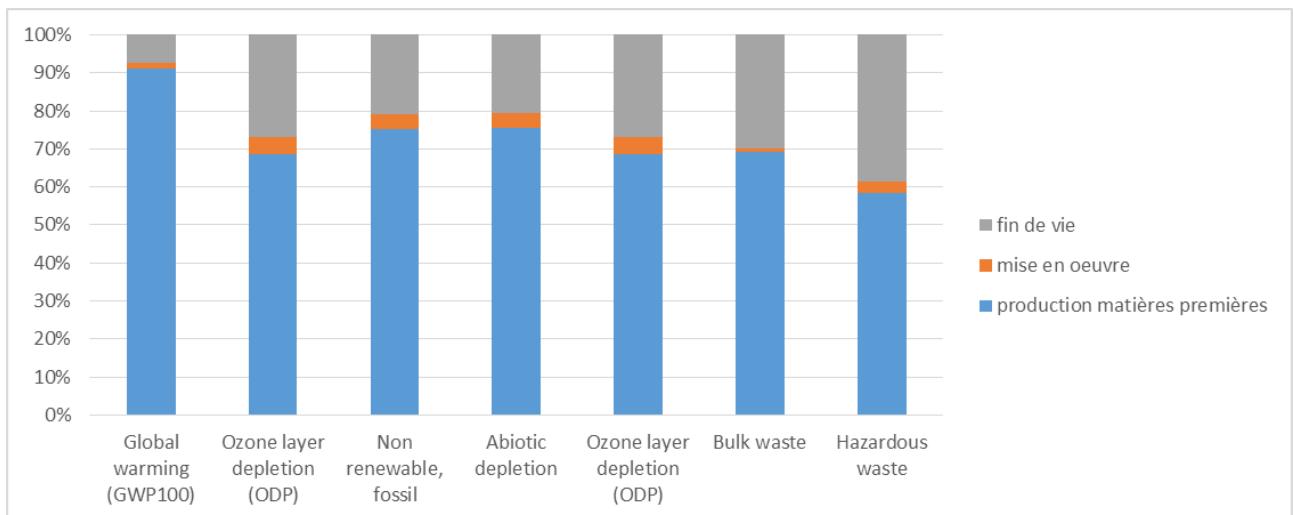


Figure 5-6. Répartition des impacts - alternative avec recyclage in-situ

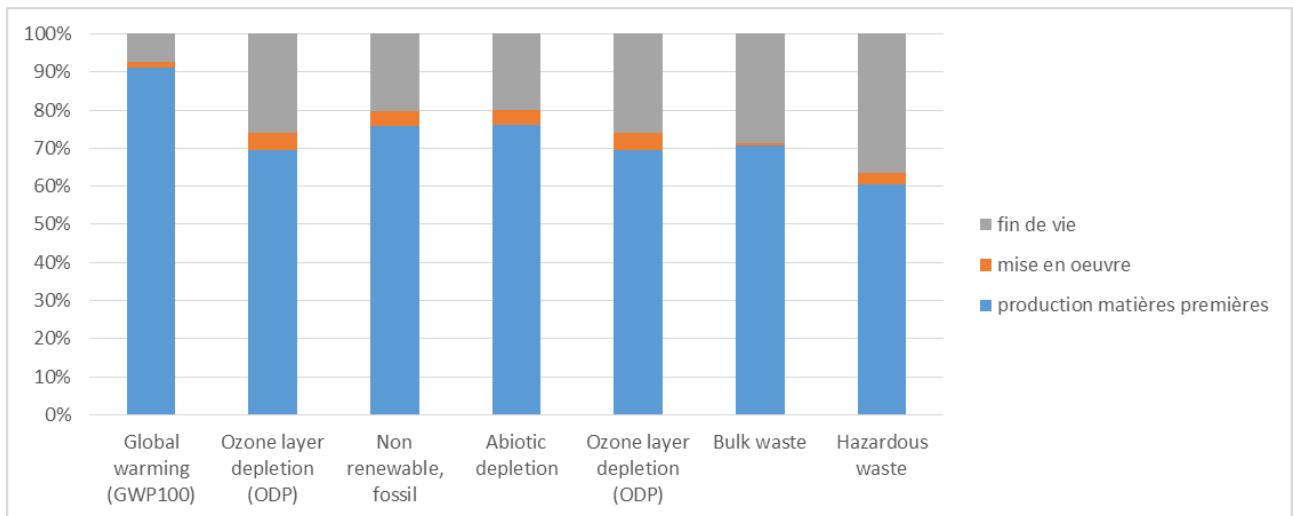


Figure 5-7. Répartition des impacts - alternative avec recyclage hors site

Ces graphiques nous permettent de voir que dans les trois systèmes étudiés, les matières premières sont principalement responsables des impacts environnementaux sélectionnés. Cette première observation conforte l'hypothèse de l'intérêt du recyclage. La mise en œuvre est très peu impactante. Dans le cas de l'hypothèse sans recyclage, en revanche, la fin de vie est très influente concernant la production de déchets.

Les deux scenarii avec recyclage donnent des résultats très proches, et la différence entre les deux est liée à l'étape de transport supplémentaire dans l'hypothèse avec un recyclage hors site. On voit cependant que cette étape de transport (relativement courte, 50km) reste négligeable devant le reste.

7.1 Comparaison des différents scenarii étudiés

Les valeurs relatives totales calculées nous permettent de comparer les différents scénarii étudiés pour chacune des différentes catégories d'impact retenues (Figure 5-8).

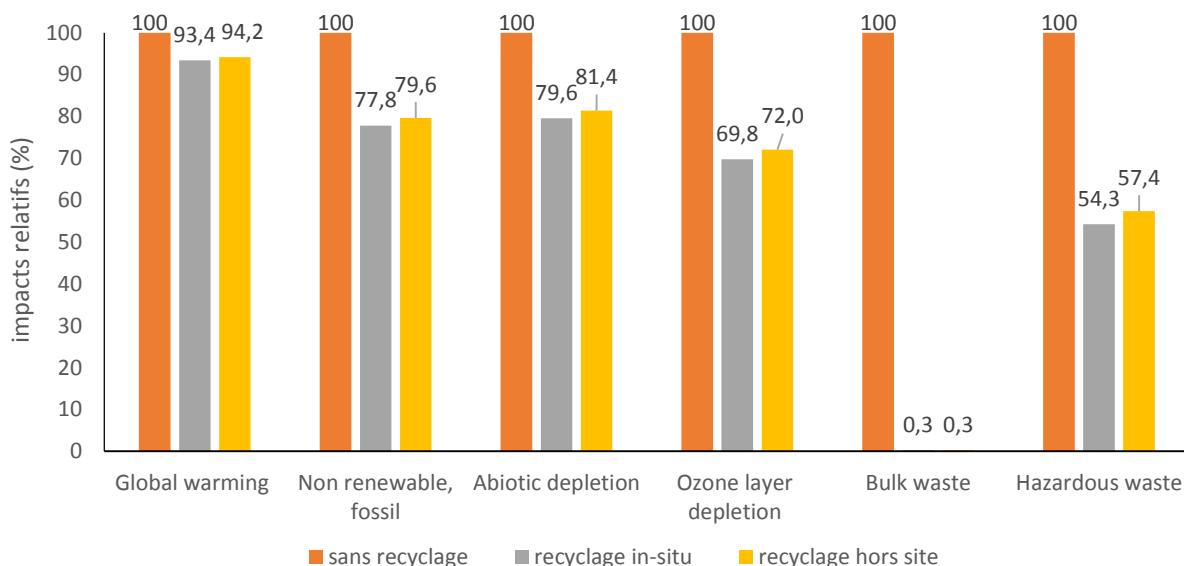


Figure 5-8. Comparaison des impacts pour les trois scénarii étudiés

Nous constatons que l'alternative « sans recyclage » est le scenario le plus impactant dans toutes les catégories retenues.

Les travaux de l'ADEME (point 4.1) indiquaient une plus grande responsabilité des granulats recyclés dans le réchauffement climatique par rapport aux granulats naturels. Or nous voyons ici que leur utilisation dans un béton destiné à être lui-même recyclé permet de diminuer leur impact de 6-7% par rapport à un scénario sans recyclage.

Les valeurs obtenues concernant l'énergie non renouvelable sont en accord avec les résultats communiqués à l'ADEME qui indiquaient 20% d'écart entre la mise à disposition de granulats de roches massives et de granulats recyclés.

Il était étonnant de trouver dans les résultats de l'ADEME les catégories « épuisement des ressources » et « déchets dangereux » largement dominés par les granulats recyclés. Nous voyons ici que les deux alternatives comprenant l'utilisation de granulats recyclés ainsi que le recyclage du béton en fin de vie permettent, conformément à ce qui est attendu, une diminution de l'impact « épuisement des ressources » de l'ordre de 20% et de l'impact « déchet dangereux » de 40 à 50%.

Enfin, nous constatons l'impressionnant écart entre les alternatives avec et sans recyclage concernant la production de déchets inertes. Dans le cas du scenario sans recyclage le béton en fin de vie est placé en installation de stockage, alors qu'il est réutilisé sous forme de granulats dans les deux autres scenarii. Il est donc normal de trouver une différence de l'ordre de 100% entre les deux types de « fin de vie » retenues.

7.2 Influence du transport

Il est intéressant de noter le peu de différence entre les deux alternatives de recyclage, sachant que l'une (recyclage hors site) comprend une étape de transport de plus que l'autre (recyclage in-situ).

D'après le rapport de l'ADEME, le transport en camion benne génère environ 200 g de CO₂ par tonne de matière transportée sur une distance d'un kilomètre.

La Figure 5-9 suivante nous montre l'importance de la localisation des sites de fabrication de granulats. En effet, l'impact CO₂ engendré par le transport des granulats jusqu'au site de fabrication du béton devient supérieur à celui de la fabrication de granulats à partir de 15 km.

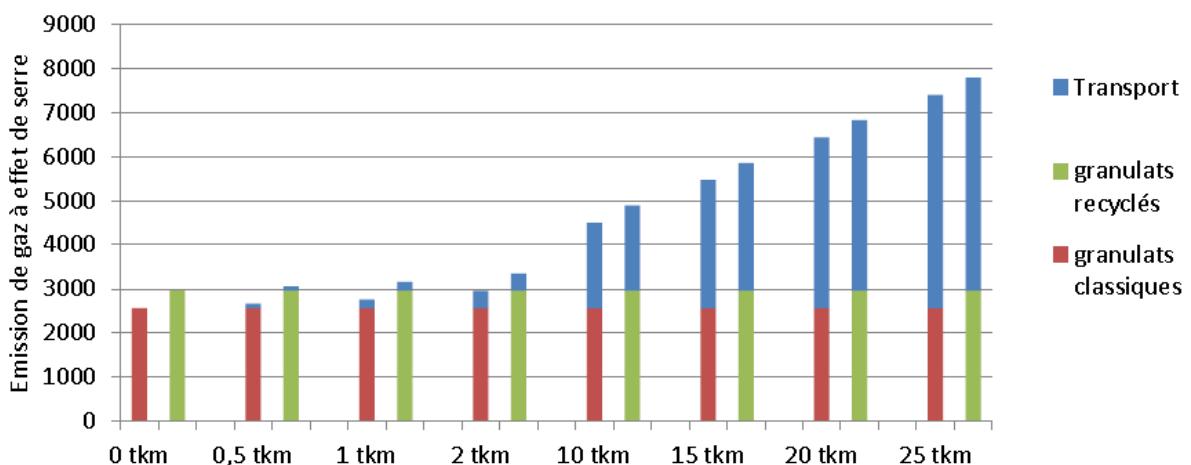


Figure 5-9. Emissions de gaz à effet de serre (en g CO₂ eq) liées au transport (en tonne par km)

8. Conclusion

Lorsque l'on compare les résultats donnés dans l'étude de l'ADEME et ceux obtenus lors de notre étude, on constate à quel point il est délicat de tirer des conclusions nettes d'analyses de cycle de vie.

En effet, on remarque notamment que le choix des indicateurs permet très facilement d'orienter dans un sens ou dans l'autre l'issue de l'étude. De la même manière, le choix du « début de vie » du granulat recyclé a une influence très importante. En effet, on peut décider de démarrer le cycle de vie du granulat au moment où sont récupérés les déchets de démolition de chantier destinés à être recyclés. Certaines études placent le début de vie au moment de la fabrication du béton parent destiné à être recyclé. On comprend que cette alternative a un impact très lourd sur l'analyse puisqu'elle implique notamment l'utilisation de ciment, le matériau le plus impactant d'un point de vue environnemental, entrant dans la composition du béton.

La production de granulats recyclés permet de limiter l'exploitation des carrières et les surfaces de travail nécessaires. Pourtant, cet indicateur est très difficilement quantifiable. Il n'est cependant pas à négliger et peut présenter un intérêt financier très intéressant.

Enfin, nous avons également vu qu'il est primordial de tenir compte de la distance entre le site de fabrication de granulats et le site d'élaboration du béton. Les impacts environnementaux engendrés par le transport des granulats sont très rapidement supérieurs à ceux dus à la fabrication des granulats et peuvent également générer des surcoûts importants.

Références bibliographiques

- [ADEME 2012]** Guide sectoriel 2012, carrières de granulats et sites de recyclage, ADEME (2012)
- [ISO 14040]** Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre (2006)
- [ISO 14044]** Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices (2006)
- [NF P 01 010]** Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction (2004)
- [ISO 14025]** Marquages et déclarations environnementaux -- Déclarations environnementales de Type III -- Principes et modes opératoires (2006)
- [R. 541-8]** Code de l'environnement, article R. 541-8
- [Eval UNPG]** Evaluation des impacts environnementaux potentiels de la production de granulats en France – UNPG
- [Mod UNPG]** Module d'informations environnementales de la production de granulats recyclés – UNPG
- Base de données *Ecoinvent*

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ces travaux de thèse de doctorat était de contribuer expérimentalement à la compréhension du comportement des bétons de granulats recyclés soumis à des températures élevées, afin, notamment, d'aider à la conception d'ouvrages moins impactants d'un point de vue environnemental et plus sûrs. Nous nous sommes intéressés à l'influence du granulat recyclé sur le comportement du béton à haute température, en fonction de la compacité de la matrice cimentaire.

Deux sortes de granulats recyclés ont été considérées : des « granulats recyclés de laboratoire » (GRL) issus d'un béton naturel coulé et concassé au laboratoire, et des « granulats recyclés industriels » (GRI) issus de déchets de chantier de démolition. Les propriétés des bétons qui les contiennent sont comparées à celles de bétons de granulats naturels appelés granulats de référence par la suite. L'étude bibliographique a souligné l'influence de la nature des granulats d'origine sur le comportement du béton les incorporant, et particulièrement à haute température. Les granulats de référence, les GRL et les GRI, sont tous de même nature pétrographique à savoir silico-calcaire. L'étude des caractéristiques des granulats recyclés a montré dans quelle mesure la présence de mortier attaché au granulat d'origine modifiait les propriétés physiques des granulats recyclés. Leur densité est en effet plus faible de près de 10% que celles des granulats naturels, et leur porosité accessible à l'eau sous vide s'en trouve augmentée (elle se situe entre 14 et 19% contre 6% pour les granulats de référence). La présence de mortier leur confère également un coefficient d'absorption d'eau plus élevé, de l'ordre de 6 à 7%, contre seulement 2% pour des granulats naturels. Cette caractéristique à elle seule impacte fortement la mise en œuvre du béton.

Les deux granulats recyclés étudiés (GRL et GRI), diffèrent par le pourcentage de mortier attaché au granulat d'origine, plus élevé dans les cas des GRL que dans celui des GRI, variation certainement due au transport des GRI. Cette différence se reflète dans les valeurs de porosité, légèrement plus élevées pour les GRL que pour les GRI. Elle peut également être due à la compacité de la matrice entourant les granulats, connue pour les GRL (avec un rapport E/C de 0.6), mais inconnue dans le cas des GRI. Les analyses DRX de la pâte de ciment autour des granulats indiquent que les GRL contiennent de la portlandite et des silicates de calcium, qui peuvent laisser présager des réactions d'hydratation supplémentaires. Aucune trace de ces deux composés n'a été observée dans les GRI. On suppose que la portlandite a été complètement dissoute ou carbonatée, et que les réactions d'hydratation sont toutes terminées. Enfin, nous avons trouvé parmi les GRI des déchets de démolitions non cimentaires (bois, plastique, bitume, verre...) dont la taille est de l'ordre du centimètre et dont les caractéristiques, très éloignées de celles du béton, peuvent influencer le comportement de celui-ci, notamment à température élevée.

Les granulats étudiés ont été incorporés dans des bétons à matrice cimentaire ordinaire, avec un rapport E/C égal à 0.6, ou à matrice hautes performances, avec un rapport E/C de 0.3.

Le chapitre 3 a mis en évidence dans quelle mesure l'utilisation de granulats recyclés influence les propriétés physiques et mécaniques des bétons selon le rapport E/C de la matrice. L'influence de la qualité du granulat recyclé a également été analysée, en comparant des bétons réalisés avec des granulats recyclés de laboratoire et des granulats industriels.

Les caractéristiques particulières des granulats recyclés (présence de mortier et de zones de transition interfaciales) confèrent aux bétons recyclés une plus grande porosité que celle des bétons naturels de référence. La porosité des granulats recyclés a un impact important sur la résistance en compression du béton recyclé, et ce particulièrement à faible E/C : les bétons recyclés à matrice hautes performances présentent une perte de résistance d'environ 30% par rapport à la référence. La qualité du granulat recyclé dépend en effet de la qualité de son béton parent. Il n'est théoriquement pas possible de formuler un béton recyclé avec une résistance à la rupture en compression supérieure à celle du béton parent des granulats utilisés. Les valeurs de modules d'Young et de résistance en traction sont en revanche proches pour les bétons recyclés et de référence, et permettent de conclure quant à la bonne qualité d'interface dans les bétons recyclés. Des analyses réalisées au MEB couplé avec l'EDS ont d'ailleurs indiqué une forte concentration d'un composé riche en calcium au niveau des frontières « ancienne pâte / nouvelle pâte » dans les bétons recyclés, qui améliore probablement la qualité de l'interface.

A température ambiante, les BRI présentent une résistance en compression légèrement supérieure à celle des BRL, mais un module d'élasticité plus faible. Ces résultats s'expliquent probablement par l'âge et la plus faible quantité de pâte contenue dans les GRI par rapport aux GRL. Les GRI proviennent en effet d'un béton âgé d'une quarantaine d'années, dans lequel toutes les réactions d'hydratation sont terminées, renforçant ainsi la résistance en compression. Le plus faible module d'élasticité est, quant à lui, probablement dû à la présence de déchets de démolition non cimentaires parmi les GRI, et dont la valeur de module d'Young est inférieure à celle du béton.

Le quatrième chapitre présente une analyse comparée des propriétés physiques, thermiques et mécaniques des bétons recyclés étudiés et des bétons naturels de référence après traitement thermique. Les différents bétons sont soumis à des cycles de chauffage et refroidissement à vitesse lente (0.5°C/min) jusqu'aux températures cibles de 150°C, 300°C, 450°C et 750°C.

Aucun éclatement n'a été observé pour les formulations de bétons recyclés lors des cycles de chauffage – refroidissement, tandis que 20% des éprouvettes de béton à hautes performances de granulats naturel de référence silico-calcaires ont éclaté à 750°C. Ce résultat est attribué à la plus

grande porosité des bétons recyclés par rapport aux bétons naturels, qui permet une évacuation plus rapide de la vapeur d'eau, et donc une montée en pression moins importante. L'étude approfondie de l'endommagement des éprouvettes a montré que la majeure partie de la fissuration intervient aux interfaces pâte-granulat ou ancienne pâte - nouvelle pâte. Dans le cas des bétons à matrice hautes performances, on n'observe que très peu de fissures à l'interface entre les deux pâtes. On note, en revanche, des fissures entre le granulat d'origine et la nouvelle pâte ou l'ancienne pâte. Il y a une dilatation différentielle entre la pâte et le granulat qui n'est pas observée entre les deux pâtes.

Les différentes campagnes d'essais menées sur des bétons chauffés indiquent que les caractéristiques physiques des bétons (densité, porosité) varient de la même manière pour les bétons de granulats recyclés que pour les bétons de granulats naturels de référence. La quantité de pâte totale ainsi que le nombre d'interfaces semblent avoir peu d'influence sur l'évolution de ces caractéristiques avec la température. De la même manière, nous avons constaté que les bétons recyclés ont une réponse thermique proche de celles des bétons naturels lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées. Les différences de répartition de la température au sein de l'éprouvette entre les bétons recyclés et de référence sont plus liées aux différences de consommation de chaleur latente et la fissuration du béton qu'aux différences de conductivité ou diffusivité thermiques.

On note cependant l'importance du tri lors de la déconstruction. En effet, nous avons observé un endommagement plus important des BRI par rapport aux BRL, quelle que soit la compacité de la matrice. La présence des déchets non cimentaires trouvés parmi les GRI semble impacter aussi bien le développement de la fissuration, les performances mécaniques résiduelles (avec la création de porosité et de sites de faiblesse préférentiels lors de la combustion des déchets), que les performances thermiques (influencées par les performances thermiques intrinsèques des déchets).

Enfin, une analyse de cycle de vie a été réalisée afin d'évaluer l'intérêt environnemental du recyclage des déchets de démolition sous forme de nouveaux granulats. Trois alternatives ont été comparées et analysées : une alternative « sans recyclage », une alternative avec « recyclage in situ » et une alternative avec un « recyclage hors site ». Les scenarii avec recyclage ont clairement été jugés les moins impactants d'un point de vue environnemental. Cependant, les résultats d'une telle étude sont à analyser avec précaution. En effet, nous avons remarqué que le choix des indicateurs permet très facilement d'orienter dans un sens ou dans l'autre l'issue de l'étude. De la même manière, le choix du « début de vie » du granulat recyclé a une influence très importante dans le résultat final. Les deux alternatives avec recyclage diffèrent uniquement par une étape de transport supplémentaire dans le cas du scenario « recyclage hors site ». Dans notre cas, ce paramètre influe assez peu sur le résultat final, la distance prise en compte étant relativement faible (50 km).

Cependant, c'est un aspect à prendre absolument en compte, puisque nous avons vu que les impacts environnementaux engendrés par le transport des granulats sont très rapidement supérieurs à ceux dus à la fabrication des granulats et peuvent également générer des surcoûts importants.

En ce qui concerne les perspectives, cette étude expérimentale des granulats recyclés pourrait être approfondie selon plusieurs axes afin d'améliorer et de compléter la compréhension des phénomènes ayant lieu dans les bétons recyclés à haute température.

- La porosité des granulats et des bétons a été étudiée et permet de comprendre une partie des phénomènes de transfert au sein du matériau. Il serait cependant intéressant de poursuivre cette étude par une analyse de la perméabilité, qui permettrait d'évaluer la connectivité des pores entre eux. Les résultats confirmeraient ou infirmeraient l'hypothèse selon laquelle les bétons recyclés, plus poreux, évacuent plus facilement la pression de vapeur au cours du chauffage que les bétons naturels.
- L'analyse de la zone de transition interfaciale pourrait être approfondie par une caractérisation du composé riche en calcium observé au niveau des interfaces ancienne pâte – nouvelle pâte dans les bétons recyclés. Il serait intéressant de déterminer dans quelle mesure ce composé affecte la qualité de l'ITZ. Possède-t-il une résistance mécanique intrinsèque, ou sa seule action consiste-t-elle à remplir les pores en périphérie de la frontière entre les deux pâtes ? De la même manière, il serait intéressant de suivre l'évolution de l'ITZ en fonction du temps de maturation du béton, et en fonction de la température de chauffage.
- Nous avons vu que la qualité des granulats dépend entièrement de celle du béton parent dont ils sont issus. Il serait donc intéressant de recycler un béton à hautes performances sous forme de granulats, et de voir si le béton recyclé les incorporant peut égaler les propriétés mécaniques d'un béton naturel de rapport E/C équivalent.
- Enfin, nous avons travaillé ici à vitesse de chauffage faible ($0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) en respectant les recommandations du comité RILEM TC-200, afin d'assurer l'homogénéité de la température au sein du matériau et de suivre précisément chaque transformation physique ou microstructurale ayant lieu au cours de la montée en température. La suite logique de ce travail consisterait en une caractérisation des bétons à l'issue d'un chauffage rapide, suivant la norme ISO 834 qui vise à simuler un réel incendie.

ANNEXE – COURBES DREUX GORISSE DES GRANULATS DE BETON RECYCLES

