Béton recyclé au jeune âge.

Emmanuel Rozière, A.Z. Bendimerad, Jean-Claude Souche, P. Devillers, Marie Salgues, Ahmed Loukili, Eric Garcia-Diaz

▶ **To cite this version:**

Emmanuel Rozière, A.Z. Bendimerad, Jean-Claude Souche, P. Devillers, Marie Salgues, et al.. Béton recyclé au jeune âge.. Le béton recyclé, Ifsttar, 792 p., 2018, 978-2-85782-747-4. hal-02926760

HAL Id: hal-02926760

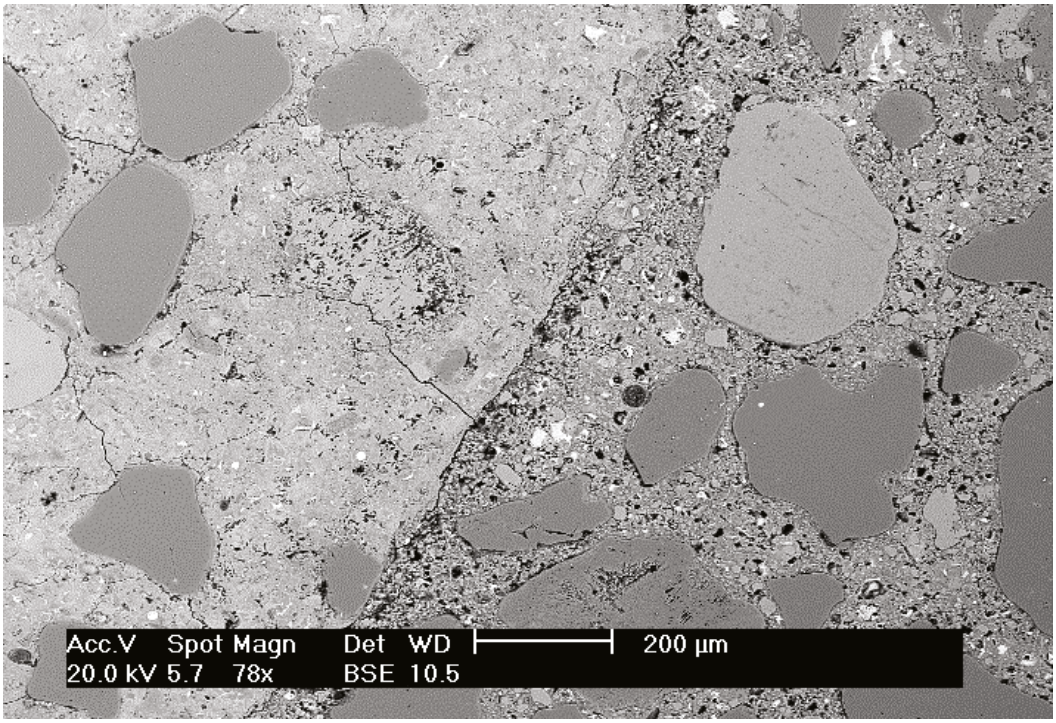
https://imt-mines-ales.hal.science/hal-02926760

Submitted on 1 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le béton recyclé



sous la direction de
François DE LARRARD et Horacio COLINA

François de Larrard et Horacio Colina

Le béton recyclé

Traduit de l'anglais par André Lecomte

IFSTTAR

Sous la direction de :

François DE LARRARD
Directeur Scientifique, Groupe LafargeHolcim, Directeur scientifique du projet national RECYBETON

Horacio COLINA
Directeur du Pôle Recherche, ATILH, Directeur du projet national RECYBETON

Comment citer cet ouvrage :

de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

Comment citer une partie de cet ouvrage :

[Auteurs], 2018, Titre du chapitre. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - Ifsttar
14-20 boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée cedex 2
www.ifsttar.fr
Les collections de l'Ifsttar
ouvrages scientifiques
Réf : OSI4
ISBN 978-2-85782-747-4 - ISSN 2558-3018
Novembre 2018

En application du code de la propriété intellectuelle, l'Ifsttar interdit toute reproduction intégrale ou partielle du présent ouvrage par quelque procédé que ce soit, sous réserve des exceptions légales.

Cet ouvrage est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International. Les termes de cette licence sont accessibles à l'adresse http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Chapitre 8.
Béton recycle au jeune âge

E. Rozière[1]*, A. Z. Bendimerad*[1]*, J-C. Souche*[2]*, P. Devillers*[3]*,*
M. Salgues[2]*, A. Loukili*[1]*, E. Garcia-Diaz*[2]

Résumé – Ce chapitre présente la méthodologie et les résultats d'une étude expérimentale portant sur le comportement au jeune âge de bétons incorporant des granulats de béton recyclé (GBR). Il s'intéresse plus particulièrement à la mesure du coefficient et de la cinétique d'absorption d'eau des gravillons de GBR, au comportement du béton frais en condition de séchage normal et sévère, et à l'évaluation des propriétés du béton en cours de durcissement.

Les gravillons de GBR utilisés dans cette étude, fournis par le Projet National RECYBETON, présentent une absorption d'eau élevée. Leur taux de saturation atteint 90 % dans les deux premières heures, et plus rapidement encore si les gravillons sont immergés dans la pâte de ciment fraîche. Le suivi de leur absorption d'eau au sein de la pâte fraîche a également montré qu'une partie de l'eau absorbée pouvait se libérer en cas d'exposition à un séchage sévère. Le passage d'un régime de séchage normal à un régime de séchage sévère accroît le taux d'évaporation, mais n'augmente pas le ratio « retrait/perte de masse ». Toutefois, de plus grandes amplitudes de retrait sont observées en raison d'un retrait plastique accéléré qui, dans ce cas, se développe avant la prise.

Le concept de pression d'entrée air a été utilisé pour analyser la sensibilité à la fissuration du béton frais. La valeur de cette pression a été estimée pour divers bétons, avec ou sans gravillons de GBR. Une bonne corrélation entre la pression d'entrée d'air et la dépression capillaire au moment de la fissuration a été trouvée. Le rapport eau efficace sur liant (E_{eff}/L) influence directement la pression d'entrée d'air. Ce rapport (E_{eff}/L) prend en compte l'état initial de saturation des gravillons de GBR.

Entre la prise et 24 heures, l'évolution du retrait plastique, du module d'élasticité et de la résistance à la traction a été suivie en continu. La saturation initiale en eau des gravillons de GBR a une influence limitée sur ces propriétés. Des essais de retrait empêché seraient nécessaires pour analyser l'influence du taux de GBR sur la sensibilité à la fissuration, et pour estimer la relaxation.

1. Centrale Nantes, GeM, Nantes.
2. IMT Mines Alès, C2MA, Alès.
3. ENSAM, École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, Montpellier.

8.1. Introduction

La fissuration provoquée par le retrait altère la durabilité des bétons et des ouvrages en béton, en favorisant la pénétration des agents chimiques agressifs et, incidemment, la corrosion des aciers. Plusieurs phénomènes sont susceptibles d'engendrer la fissuration du béton au jeune âge. Le premier résulte de la dépression capillaire qui apparaît dans la pâte de ciment fraîche [Radocea, 1994 ; Slowik *et al.*, 2008]. Elle est causée par l'évaporation, lorsque le béton n'est plus recouvert par l'eau du ressuage ou par de l'eau de cure. Dès que la pression de l'air devient suffisante pour pouvoir pénétrer dans la structure poreuse, des fissures apparaissent. Si la vitesse d'évaporation dépasse la vitesse de ressuage, le retrait plastique se développe alors [Wittmann, 1976]. Le séchage accéléré du béton frais est donc un facteur propice à l'amplification du retrait plastique [Turcry et Loukili, 2006 ; Mbemba, 2010]. Le second phénomène est le retrait empêché au contact d'un béton durci. Le retrait plastique ne peut se développer librement dans la plupart des ouvrages en béton. Par ailleurs, le module d'élasticité du béton se développe et croit dès le très jeune âge, alors que la résistance à la traction est encore relativement faible, contraste qui induit vraisemblablement des contraintes importantes. Par conséquent, la période qui sépare le coulage du béton et le début du durcissement doit être considérée comme une phase critique vis-à-vis de la fissuration [Hammer *et al.*, 2007 ; Roziere *et al.*, 2015]. Les granulats de béton recyclé (GBR) sont réputés favoriser le retrait et le fluage du béton, et réduire sa résistance et son module d'élasticité, pour une teneur en liant donnée. C'est pourquoi les bétons ont été formulés ici soit à résistance constante, soit à affaissement constant. Par ailleurs, les études traitant du comportement au jeune âge sont plutôt rares. Enfin, les GBR sont des granulats poreux, ayant des cinétiques et des valeurs d'absorption d'eau variables. Leur taux initial de saturation risque donc d'avoir une influence significative sur l'eau efficace de la pâte de ciment et, donc aussi, sur toutes les propriétés du béton.

L'étude présentée ici s'intéresse à la caractérisation des gravillons de GBR et de bétons de GBR à l'état frais et durci, entre le malaxage et 24 heures. Deux laboratoires ont participé à ces travaux : le Centre des Matériaux des Mines d'Alès (C2MA), IMT Mines Alès, et l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), Centrale Nantes. Les bétons ont été testés en condition de séchage normal et sévère, respectivement. Le séchage sévère, qui accentue la fissuration du béton frais, est manifestement prépondérant. Deux paramètres principaux ont été étudiés : le taux de gravillons de GBR et leur saturation initiale en eau.

Ce chapitre donne tout d'abord un « état de l'art » où sont décrits les phénomènes qui provoquent la fissuration du béton au jeune âge, en rappelant les principaux résultats recensés. Le programme expérimental réalisé, qui comporte deux parties, est ensuite présenté. Les résultats et discussions s'intéressent au taux d'évaporation, à l'amplitude du retrait plastique et à la sensibilité à la fissuration. Ils concernent tout d'abord le comportement du béton frais, puis celui du béton en cours de durcissement.

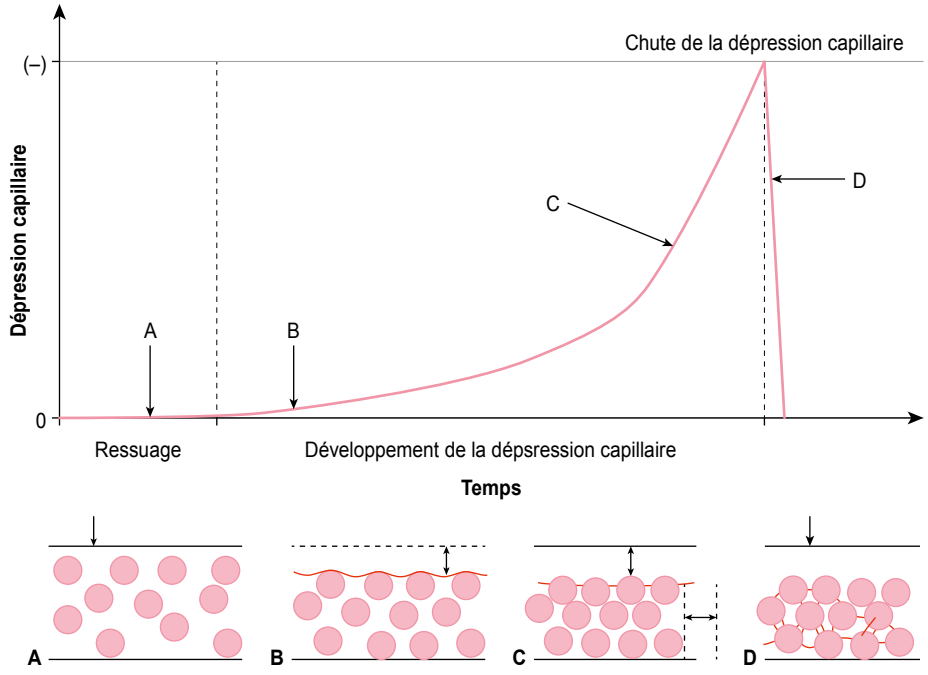
8.2. État de l'art

L'étude présentée dans ce chapitre traite principalement du retrait plastique et de la fissuration au jeune âge des bétons de GBR. Les résultats disponibles dans la littérature sont plutôt rares, mais ils ont toutefois permis d'orienter cette étude. Deux périodes sont critiques pour la fissuration des bétons frais et durcis : la première va de la mise en place du béton jusqu'à une et quatre heures ; la seconde couvre le temps de prise et le début du durcissement.

Les phénomènes qui apparaissent durant la première période critique ne sont pas spécifiques aux bétons. Ils concernent également la dessiccation des sols et autres suspensions concentrées [Radocea, 1994 ; Slowik *et al.*, 2008]. La couche d'eau superficielle disparaît progressivement avec l'évaporation (Figure 8.1). À la surface de l'échantillon, des ménisques apparaissent entre les particules et provoquent une augmentation de la pression capillaire. Lorsque la courbure des ménisques devient forte, le système des forces de traction entre les particules devient instable et l'air commence à pénétrer dans les pores. Il se produit alors un « percement » local de la pression capillaire. Le concept d'entrée d'air est utilisé pour décrire ce phénomène [Slowik *et al.*, 2008]. La pression d'entrée d'air est la pression

Figure 8.1

Montée de la pression capillaire dans une suspension en cours de séchage, d'après [Slowik *et al.*, 2008]



capillaire pour laquelle l'air est susceptible de pénétrer dans le système. Lorsque la pression capillaire atteint une valeur limite, appelée valeur d'entrée d'air, l'air commence à remplir les pores les plus gros. La tension capillaire provoque alors une compression dans les plus petits pores, ce qui conduit à un réarrangement des grains [Slowik et Ju, 2011]. Cependant, la diminution de volume n'est pas égale à l'eau perdue, et des tensions horizontales commencent à se développer. Une fissuration apparaît alors aux endroits où la pression d'entrée d'air est atteinte ; l'entrée d'air peut donc être corrélée à la fissuration [Souche *et al.*, 2016].

L'entrée d'air dépend de la composition et de la distribution granulaire du matériau. En mécanique des sols, le point d'entrée d'air est généralement déterminé à partir des courbes de teneur volumétrique en eau en fonction de la contrainte de succion. D'autres méthodes de détermination de l'entrée d'air ont été développées pour les matériaux cimentaires [Slowik *et al.*, 2008 ; Souche *et al.*, 2016].

Les GBR sont connus pour influencer le ressuage. Une quantité d'eau importante est effectivement absorbée par ces granulats durant le malaxage. D'après l'étude de [Poon *et al.*, 2004], l'utilisation des GBR à l'état saturé surface sèche (SSS) conduit à un ressuage durant la mise en œuvre, pour un rapport eau efficace sur ciment (E_{eff}/C) constant de 0,57.

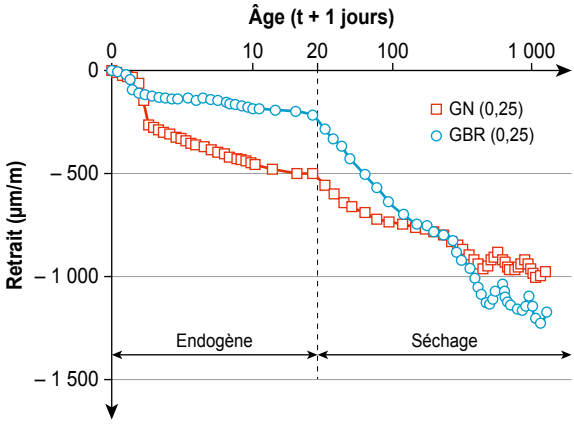
La deuxième période critique couvre le temps de prise et le début du durcissement. Lorsque le retrait plastique est empêché, des contraintes de traction se développent. La fissuration se produit lorsque les contraintes de traction dépassent la résistance à la traction [Ravina et Shalon, 1968 ; Hammer *et al.*, 2007]. En outre, la capacité de déformation en traction est minimale à cette période. En effet, durant cette phase, le module d'élasticité se développe plus précocement et plus rapidement que la résistance à la traction, ce qui réduit la capacité de déformation. Ensuite, elle augmente concomitamment à la résistance à la traction [Roziere *et al.*, 2015].

Les GBR ont une influence sur tous les paramètres impliqués dans la fissuration par retrait empêché. D'une part, l'augmentation du taux de GBR conduit à un retrait de séchage supérieur (Figure 8.2), et parfois à une résistance inférieure. Une résistance équivalente ou supérieure peut être obtenue par le biais de la formulation. D'autre part, le module d'élasticité est réduit et le fluage est augmenté. Il n'est donc pas facile de prévoir le rôle des GBR vis-à-vis de la sensibilité à la fissuration.

Par ailleurs, la saturation en eau initiale des granulats poreux est susceptible d'influencer le retrait plastique et les autres propriétés du béton [Cortas *et al.*, 2014]. Comme indiqué Figure 8.2, le retrait est plus faible en condition scellée [Maruyama et Sato, 2005]. Les GBR saturés peuvent donc atténuer le retrait endogène par un mécanisme de désorption de leur eau absorbée, dans un processus de « cure interne ». L'eau absorbée durant la prise est influencée par la cinétique d'absorption des granulats. Si les granulats sont initialement secs ou partiellement saturés, l'eau restant dans la pâte de ciment au moment de la prise est alors supérieure à l'eau efficace théorique.

Figure 8.2

Déformation de bétons à haute performance avec un granulat naturel (GN) et avec un granulat de béton recyclé (GBR), E/C = 0,25, d'après [Maruyama et Sato, 2005]



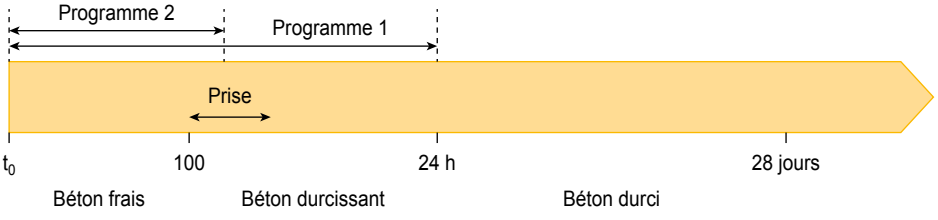
Par exemple, [Alhozaimy, 2009] a montré que des granulats calcaires secs n'absorbaient pas toute l'eau supplémentaire ajoutée pour compenser leur absorption, ce qui conduit à augmenter le rapport E/C réel, et donc aussi l'affaissement initial, mais à diminuer la résistance à la compression.

8.3. Résultats RECYBETON

L'eau absorbée ou libérée par les granulats poreux est susceptible d'influencer le comportement au jeune âge du béton, notamment vis-à-vis de la fissuration induite par le retrait. Deux programmes expérimentaux ont alors été conçus pour étudier les effets sur le retrait plastique de la proportion de GBR et de leur taux de saturation en eau initial (Figure 8.3). Dans le programme 1, l'effet d'une sollicitation extérieure sur le béton durcissant a été étudié en condition de « séchage normal », caractérisée par un vent faible [Bendimerad, 2016]. Le programme 2 concerne principalement le comportement du béton frais [Souche,

Figure 8.3

Programmes expérimentaux et stades de développement des propriétés du béton (t_0 est le premier contact entre le ciment et l'eau)



2015]. Afin d'exacerber l'effet de l'augmentation de la pression capillaire et de la fissuration avant la prise, la vitesse du vent a été augmentée. Il s'agit de la condition de « séchage sévère » décrite dans les paragraphes suivants.

8.3.1. Programme expérimental

8.3.1.1. Programme d'essais

Deux séries de bétons ont été étudiées [PN-RECYBETON, 2011] : l'une pour des applications en bâtiment, référencée B, l'autre des applications en génie civil, référencée GC. Elles ont été conçues avec différents rapports eau totale/liant (E_{tot}/L) en visant les classes de résistance C 25/30 et C 35/45 respectivement.

L'absorption d'eau des granulats est un paramètre clé dans la formulation des bétons. De plus, les granulats peuvent être partiellement ou totalement saturés au moment de leur introduction dans le malaxeur. La saturation initiale en eau des granulats influence le comportement au jeune âge, mais aussi le comportement à long terme du béton, même si l'eau totale est maintenue constante [Cortas *et al.*, 2014]. L'utilisation de granulats recyclés modifie donc significativement l'eau disponible aux différents stades. Pour clarifier les échanges d'eau dans le béton frais, certaines notions doivent être précisées.

L'eau de pré-saturation (E_{ps}) correspond à la quantité d'eau présente dans les granulats avant malaxage. L'eau ajoutée (E_{aj}) est l'eau complémentaire introduite dans le malaxeur. L'eau absorbée (E_{abs}) correspond à l'absorption d'eau nominale des granulats, état saturé surface sèche (SSS). L'eau qui reste dans la pâte de ciment est appelée eau efficace (E_{eff}). L'eau totale (E_{tot}) introduit dans le mélange est donnée par la relation (8.1).

$$E_{tot} = E_{abs}(A) + E_{eff} = E_{ps} + E_{aj} \quad (8.1)$$

Dans l'étude présentée ici, « A » désigne la saturation initiale en eau des GBR, qui correspond au coefficient d'absorption d'eau Ab_{24} mesuré à 24 heures (état SSS) selon la norme [EN1097-6, 2001]. Pour les bétons à 1,2A, la teneur en eau des GBR est égale à 120 % de celle de l'état SSS, soit un degré de pré-saturation correspondant à l'absorption nominale, plus environ 1 % de la masse sèche des granulats.

Tableau 8.1

Conditions d'exposition

	Programme 1 Eau libre constante Condition de séchage normal		**Programme 2 Eau ajoutée constante Condition de séchage sévère**	
Famille de béton	B	GC	B	GC
HR (%)	50	50	45	45
Vent (m/s)	< 0,3	< 0,3	8	8

Deux programmes expérimentaux ont été réalisés. Les échantillons ont été testés sous deux régimes de vent différents, correspondant à la condition de séchage normal, – programme 1 –, ou à la condition de séchage sévère, – programme 2 – (Tableau 8.1). Dans le programme 1, la teneur en eau libre a été gardée constante. Dans le programme 2, l'eau ajoutée a été maintenue constante. À titre d'exemple, un béton de bâtiment (B) soumis au programme 1, contenant un sable naturel et des gravillons de GBR saturés à 1,2A, est désigné par : 1-B0S100G-1,2A. Tous les bétons étudiés sont détaillés dans le Tableau 8.2.

Tableau 8.2

Programme d'essais

		Taux de substitution			
		0S0G	**0S30G**	**30S0G**	**0S100G**
Saturation initiale en eau des GBR	0,3A	–	–	–	1-B0S100G-0,3A
	0,5A	–	–	–	2-B0S100G-0,5A 2-GC0S100G-0,5A
	0,7A	–	–	–	1-B0S100G-0,7A
	1A	1-B0S0G-1A 1-GC0S0G-1A	1-B0S30G-1A	1-B30S0G-1A	1-B0S100G-1A 1-GC0S100G-1A
	1,2A	2-B0S0G-1,2A 2-GC0S0G-1,2A	–	–	1-B0S100G-1,2A 2-B0S100G-1,2A 2-GC0S100G-1,2A

8.3.1.2. Matériaux et formules des bétons

Les GBR utilisés dans cette étude avaient un coefficient d'absorption d'eau élevé, soit 8,9 % pour le sable et 5,6 à 5,8 % pour les gravillons 4/10 et 10/20 respectivement [Sedran, 2013].

Les bétons de bâtiment (B) ont été formulés pour atteindre la classe de résistance C 25/30, ceux du génie civil (GC) la classe C 35/45. Pour chacun, différentes proportions de sable et de gravillons de GBR ont été utilisées. Ils ont été réalisés avec le même lot de ciment Portland CEM II/A-L 42,5 N provenant de la même cimenterie. Le ciment a une composition de Bogue déclarée de 61 % C_3S, 0 % C_2S, 7,9 % C_3A, 12 % C_4AF, un $Na2O_{eq}$ de 0,59 %, une finesse Blaine de 370 m^2/kg, et une masse volumique de 3,09 kg/dm^3.

Les fillers calcaires ont été pris en compte dans la teneur en liant (L), définie comme la somme des masses de ciment et de calcaire (en kg/m^3).

Les formules de béton testées sont conformes à celles du Projet National RECYBETON [Sedran, 2013] (Tableaux 8.3 et 8.4).

Tableau 8.3

Formules des bétons testés dans le programme d'essais n° 1

	1-B 0S0G	1-B 30S0G	1-B 0S30G	1-B 0S100G	1-GC 0S0G	1-GC 0S100G
GN 6,3/20 (kg/m^3)	820	829	462		810	
GR 10/20 (kg/m^3)			296	701		682
GN 4/10 (kg/m^3)	267	190	228		264	
GR 4/10 (kg/m^3)				163		158
SN 0/4 (kg/m^3)	780	549	813	806	771	782
SR 0/4 (kg/m^3)		235				
Ciment, C (kg/m^3)	270	276	276	282	299	336
Filler calcaire, F (kg/m^3)	45	31	31	31	58	53
Superplastifiant SP (kg/m^3)	0,747	0,798	0,861	0,798	1,26	1,31
E_{eff} (kg/m^3)	180	185	185	189	175	185
E_{tot} (kg/m^3)	194.6	221.4	212.3	241	188.7	235.1
E_{eff}/L (kg/m^3)	0,57	0,60	0,60	0,60	0,49	0,48
Volume de pâte (l/m^3)	285	287	287	293	302	321
Compacité g*	0,785	0,79	0,781	0,777	0,784	0,772
EMP (mm)	0,80	0,86	0,82	0,89	0,90	1,05

Tableau 8.4

Formules des bétons testés dans le programme d'essais n° 2

	2-B 0S0G	2-B 0S100G-1,2A	2-B 0S100G-0,5A	2-GC 0S0G	2-GC 0S100G-1,2A	2-GC 0S100G-0,5A
GN 6,3/20 (kg/m^3)	820			810		
GR 10/20 (kg/m^3)		701	701		682	682
GN 4/10 (kg/m^3)	266			264		
GR 4/10 (kg/m^3)		163	163		158	158
SN 0/4 (kg/m^3)	780	806	806	771	782	782
SR 0/4 (kg/m^3)						
Ciment, C (kg/m^3)	270	282	282	299	336	336
Filler calcaire, F (kg/m^3)	45	31	31	58	53	53
Superplastifiant SP (kg/m^3)	1,35	1,40	1,40	2,10	2,18	2,18
E_{eff} (kg/m^3)	166	174	149.1	151	157	133
E_{tot} (kg/m^3)	180	232	207	165	213	189
E_{eff}/L (kg/m^3)	0,53	0,56	0,48	0,42	0,40	0,34
Volume de pâte (l/m^3)	289	292	282	292	304	293
Compacité g*	0,785	0,777	0,777	0,784	0,772	0,772

8.3.1.3. Protocoles d'essais

Les protocoles d'essais utilisés dans les programmes 1 et 2 sont décrits en détail dans les travaux cités [Turcry, 2004 ; Mbemba, 2010 ; Bendimerad,

2016 ; Souche, 2015]. Les mesures ont démarré 20 minutes après le premier contact entre l'eau et le ciment. Pour toutes les courbes, l'origine du temps est le début du séchage.

8.3.2. Comportement du béton frais avant la prise

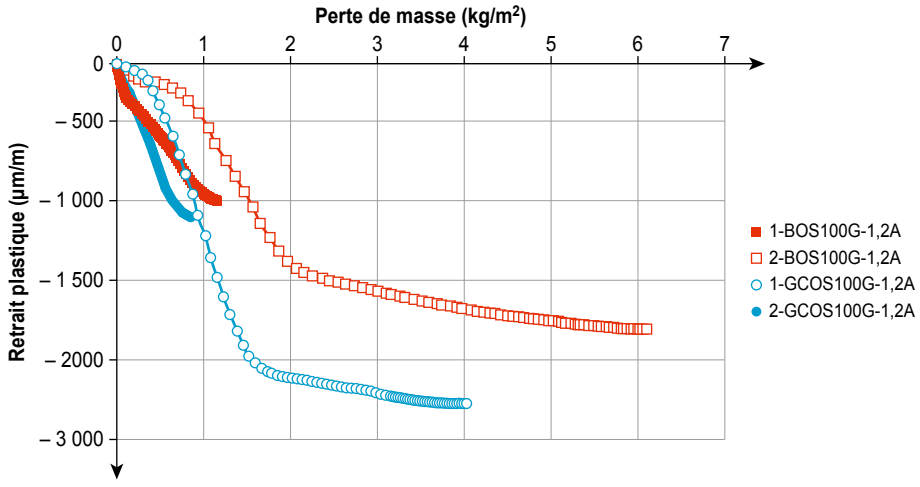
8.3.2.1. Effet des conditions environnementales sur le comportement du béton recyclé

Pour les deux conditions de séchage, l'évolution du retrait plastique en fonction de la perte de masse (Figure 8.4) montre la même tendance au départ. Le développement du retrait plastique est légèrement retardé pour les bétons du programme 2. En fait, ces bétons ont montré un ressuage plus élevé que les bétons du programme 1 (indépendamment de la condition de séchage). Ensuite, la deuxième phase se caractérise par un taux de retrait constant.

Pour une formule de béton donnée, la partie linéaire de la courbe (deuxième phase) présente une pente identique dans les deux programmes. Ensuite (troisième phase), la vitesse du retrait diminue progressivement et la perte de masse se traduit par un accroissement de la teneur en air dans le système poreux. Pour le programme 1, le début de la troisième phase apparaît pour une perte de masse plus faible que pour le programme 2. En condition normale de séchage, la vitesse du retrait plastique diminue réellement entre le début et la fin de la prise, lorsque le module de cisaillement devient significatif [Bendimerad *et al.*, 2016]. En condition sévère de séchage, le retrait plastique se développe principalement avant deux heures. Durant cette période, la rigidité du béton est encore négligeable. Le développement du retrait plastique n'est alors pas

Figure 8.4

Retrait plastique en fonction de la perte de masse



contraint, et il atteint des valeurs plus élevées. L'augmentation de l'intensité de séchage a une influence plus forte sur le retrait plastique des bétons de génie civil, caractérisée par un plus faible rapport eau/liant.

8.3.2.2. Effet du taux de substitution et de la saturation initiale en eau des GBR

La teneur en eau des GBR a été mesurée à différents moments, en conservant le béton soit en condition de séchage, soit protégé de la dessiccation (condition endogène). L'objectif de ces essais était d'évaluer les transferts hydriques entre les GBR et la pâte de ciment au cours du temps, avec et sans séchage [Salgues *et al.*, 2016]. Le protocole expérimental est inspiré des travaux de Bello sur les granulats légers [Bello, 2014], rappelé Figure 8.5.

Après malaxage, le béton a été conservé en condition endogène ou de dessiccation. Toutes les dix minutes environ, un échantillon de béton frais a été tamisé à 5 mm afin de séparer la pâte de ciment des gravillons de GBR. Les gravillons humides ont été pesés puis séchés dans une étuve pendant deux heures. Une fois secs, ils ont été pesés à nouveau [Salgues *et al.*, 2016].

Figure 8.5

Protocole pour mesurer la teneur en eau des gravillons de GBR au cours du temps [Salgues *et al.*, 2016]

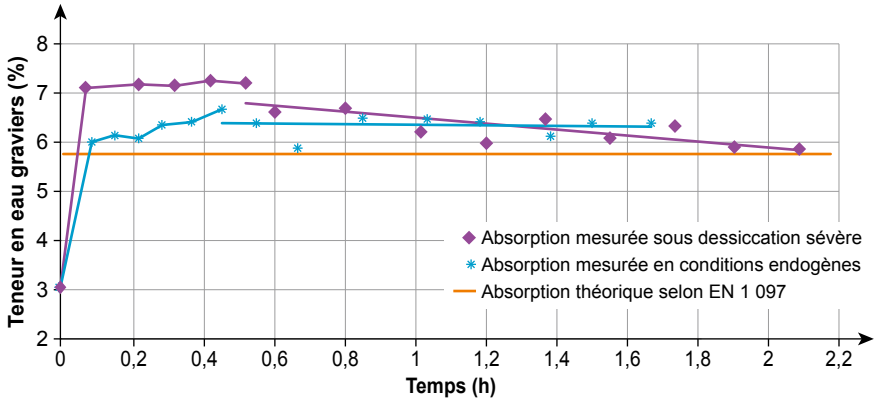
1. Tamisage (ø = 5 mm)	2. Pesée 1	3. Étuve à 105 °C	4. Pesée 2
		Séchage des granulats	

Les résultats de la Figure 8.6 sont donnés à titre d'exemple, pour le béton 2-B0S100G-0,5A. Le comportement des gravillons de GBR dépend de leur état de saturation initial. S'ils sont partiellement saturés, ils absorbent rapidement de l'eau lorsqu'ils sont dans le béton, jusqu'à satisfaire presque entièrement leur absorption maximale, selon la Figure 8.6.

Une légère sur-absorption d'eau peut même se produire jusqu'à 30 minutes après le coulage du béton. Par conséquent, l'absorption d'eau des GBR dans la pâte de ciment est très rapide. Ce résultat corrobore les mesures d'absorption d'eau des GBR réalisées dans l'eau [de Brito *et al.*, 2011 ; Bendimerad *et al.*, 2015]. Néanmoins, dans la condition de vent sévère, après cette première phase d'absorption, les gravillons du béton 2-B0S100G-0,5A relarguent de l'eau, à cause du déficit en eau dans le béton et dans la pâte. Pour le béton B0S100G-0,5A en condition endogène, ce transfert d'eau n'est pas réellement constaté (Figure 8.6).

Figure 8.6

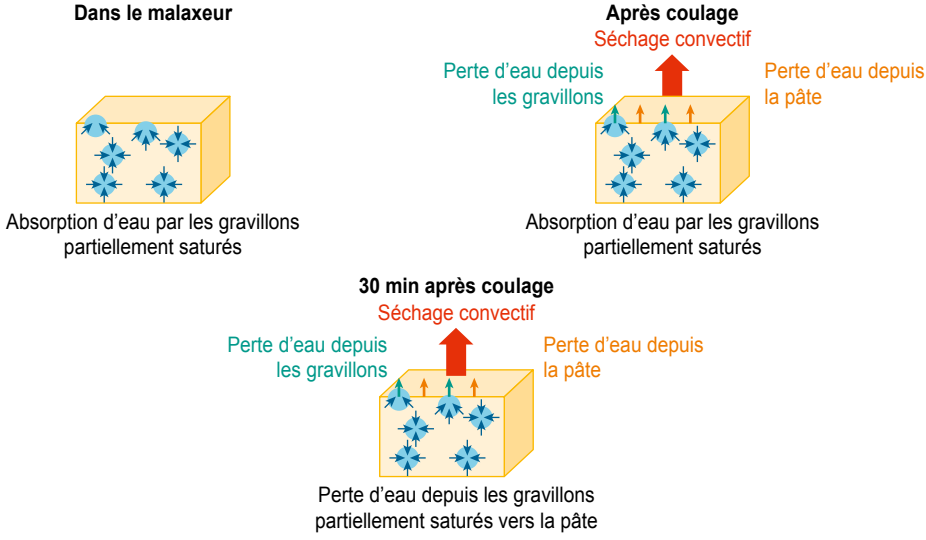
Teneur en eau des gravillons de GBR (g d'eau/g de granulats secs) du béton 2-B0S100G-0,5A conservé en condition de séchage ou en condition endogène [Salgues *et al.*, 2016]



D'après ces premiers résultats, il est intéressant d'illustrer la variation du volume d'eau dans les gravillons de GBR, la pâte de ciment et le béton. Les différentes étapes sont indiquées Figure 8.7. Dans le malaxeur, les GBR non saturés complètent leur absorption d'eau jusqu'à 90 % de la valeur nominale. Puis, après coulage, l'absorption peut se poursuivre pendant une demi-heure encore. Enfin, dès que la dessiccation commence, le béton perd de l'eau de façon homogène. Cette eau est fournie par la pâte de ciment et/ou les GBR.

Figure 8.7

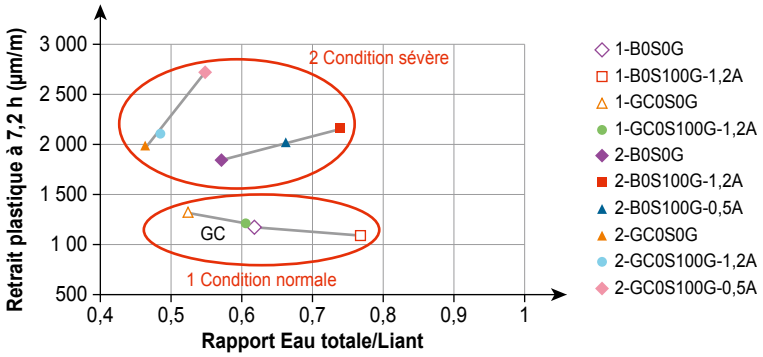
Transferts hydriques dans le béton, la pâte de ciment et les GBR au cours du temps, pour le béton B0S100G-0,5A [Salgues *et al.*, 2016]



La Figure 8.8 présente le retrait plastique à 7,2 heures en fonction du rapport E_{tot}/L. En condition normale, le retrait plastique diminue avec l'augmentation du rapport E_{tot}/L, alors qu'il augmente en condition sévère.

Figure 8.8

Retrait plastique à 7,2 h en fonction du rapport E_{tot}/L (Eau totale/liant)



En général, l'augmentation du rapport E_{tot}/L favorise le ressuage, qui retarde et atténue alors le développement du retrait plastique. La condition sévère n'entraîne pas un rapport « retrait plastique/perte de masse » supérieur, mais elle influence significativement l'amplitude du retrait plastique. Avec un taux d'évaporation élevé, le développement du retrait plastique est plus précoce et il peut se produire avant la prise, ce qui n'est pas le cas en condition normale de séchage (Figure 8.4).

Pour les bétons de bâtiment placés en condition de séchage sévère, l'évolution du retrait en fonction du rapport E_{tot}/L peut être décrit par une relation linéaire (Figure 8.8). Pour les bétons de génie civil, une autre relation linéaire est trouvée, mais avec une pente plus forte. Ces comportements peuvent s'expliquer par l'influence de la formulation et le rôle des GBR. Le béton de GBR a effectivement une plus forte proportion de pâte (Tableau 8.4), et le retrait augmente linéairement avec le volume de pâte [Hansen et Almudaiheem, 1987]. De plus, le séchage sévère est susceptible de provoquer la dessiccation des GBR [Maruyama et Sato, 2005, Wyrzykowski *et al.*, 2015] alors qu'ils peuvent fournir une cure interne en condition scellée ou en condition normale de séchage. Enfin, l'augmentation de la proportion de GBR entraîne une augmentation du retrait de séchage, en raison de la présence de l'ancienne pâte et d'un plus faible module d'élasticité des GBR.

En résumé, l'influence des GBR sur le retrait plastique dépend des conditions de séchage. En condition sévère, ils provoquent une augmentation du retrait alors qu'en condition normale, ils atténuent le développement du retrait.

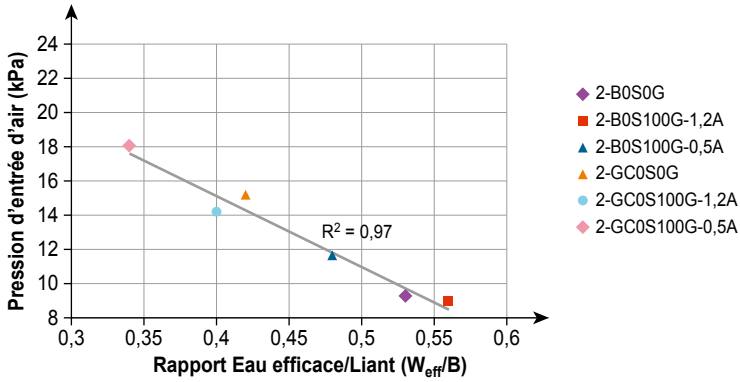
8.3.2.3. Sensibilité à la fissuration en condition de séchage sévère

Dans cette partie, un modèle de sol fin drainé a été utilisé pour déterminer la pression d'entrée d'air. Tout d'abord, il est nécessaire de construire les courbes caractéristiques du béton frais. Ces courbes sont obtenues en traçant la relation entre la teneur en eau (%) et la pression capillaire (hPa) dans un repère semi-logarithmique. Conformément à la méthode développée pour les sols fins, la valeur de la pression d'entrée d'air est approximée par l'intersection des deux droites correspondant au régime constant et au régime transitoire [Souche, 2015 ; Souche *et al.*, 2016].

La Figure 8.9 indique que la valeur d'entrée d'air est fortement tributaire du rapport eau efficace/liant (E_{eff}/L). La teneur en liant comprend le ciment et les fillers calcaires. Les GBR ne semblent pas avoir d'influence sur la valeur de la pression d'entrée d'air, puisque c'est une caractéristique physique de la pâte. Ensuite, avec la poursuite du séchage, le champ de dépression capillaire est perturbé par l'entrée d'air, et la détermination du coefficient de perméabilité à partir de la pente de la dépression capillaire n'est alors pas possible. Après l'entrée d'air, le béton frais se comporte comme un milieu poreux non saturé.

Figure 8.9

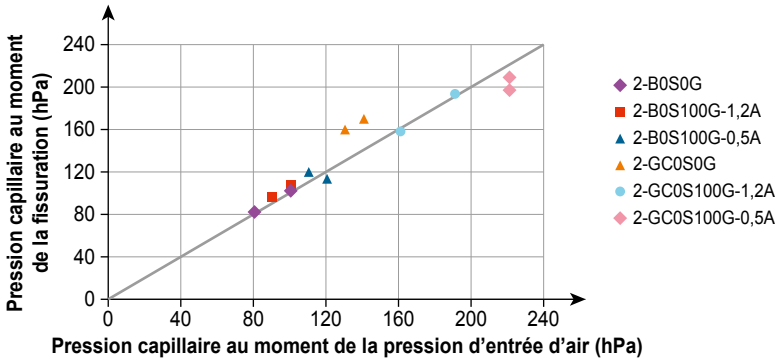
Influence du rapport E_{eff}/L sur la pression d'entrée d'air [Souche *et al.*, 2016]



Pour chaque béton, la pression capillaire au moment de la fissuration a été comparée à la pression d'entrée d'air. La Figure 8.10 présente, pour tous les bétons, la valeur mesurée de la pression capillaire au moment de la fissuration en fonction de la valeur d'entrée d'air calculée. Pour les bétons de granulats naturels (0S0G) et pour les bétons de GBR (0S100G), la figure révèle une forte corrélation linéaire entre la valeur d'entrée d'air et la pression de fissuration.

Figure 8.10

Pression capillaire au moment de la fissuration en fonction des pressions d'entrée d'air [Souche, 2015]



La fissuration apparaît donc au moment où se produit l'entrée d'air. Pour les bétons de granulats naturels, cela confirme les résultats d'études antérieures [Slowik *et al.*, 2008 ; Slowik et Ju, 2011] : l'entrée d'air est un moment critique pour la fissuration du béton frais. Pour les bétons de GBR, on observe le même comportement que pour les bétons de granulats naturels. L'accroissement des contraintes locales provoque la fissuration. Selon leur degré initial de saturation, soit les GBR complètent leur absorption en réduisant l'eau efficace de la pâte (GBR non saturés), soit ils alimentent une éventuelle cure interne de la pâte soumise à la dessiccation (GBR sursaturés). Donc, selon [Salgues *et al.*, 2016], l'eau contenue dans les GBR a un impact direct sur la fissuration du béton au jeune âge.

8.3.3. Comportement du béton durci

8.3.3.1 Effet du taux de substitution

La Figure 8.11 montre l'influence du pourcentage de substitution des granulats naturels par les sables et gravillons de GBR sur l'amplitude du retrait plastique à 24 heures [Turcry et Loukili, 2006].

Ici, toutes les courbes ont été initialisées à l'âge de la « déformation initiale » définie dans [Bendimerad *et al.*, 2016] et donné par le moment où la température du béton frais atteint pour la première fois la température du moule (environ 1 heure). Les bétons B0S30G et B0S100G atteignent un retrait plastique comparable, soit environ 1 100 µm/m. Quand ils sont comparés au béton de granulats naturels, la différence est significative, mais toutefois inférieure à 10 %. Cela peut s'expliquer par la notion d'épaisseur maximale de pâte (EMP) [de Larrard et Sedran, 1994, de Larrard et Belloc, 1997]. Considérant que le squelette granulaire est rempli par la pâte de ciment, l'EMP représente la pâte qui se trouve en configuration de retrait libre. Les valeurs de l'EMP des trois

bétons sont très proches (Figure 8.12). Le retrait plastique le plus important concerne le béton avec le sable de GBR. Cela s'explique par la surface spécifique élevée du sable de GBR, qui limite le ressuage, comparativement au béton témoin ; le risque de retrait plastique associé provient alors d'une cure insuffisante.

Cette étude vise à fournir des données pour expliquer la sensibilité à la fissuration de retrait au jeune âge de différents bétons de granulats naturels et de GBR. La résistance à la traction du béton a été mesurée 24 heures après le coulage, par traction directe. Le pourcentage de substitution de gravillons ou de sable recyclés a significativement affecté les propriétés mécaniques, tels que le module d'élasticité et la résistance à la traction (Figure 8.13).

Figure 8.11

Effet du taux de substitution sur le retrait plastique

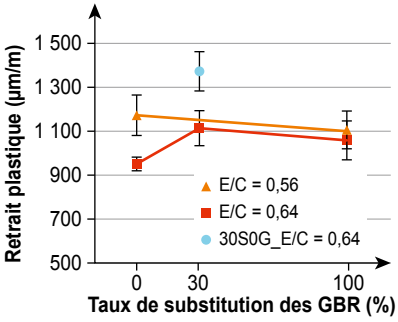


Figure 8.12

Effet du taux de substitution sur l'Épaisseur Maximale de Pâte (EMP)

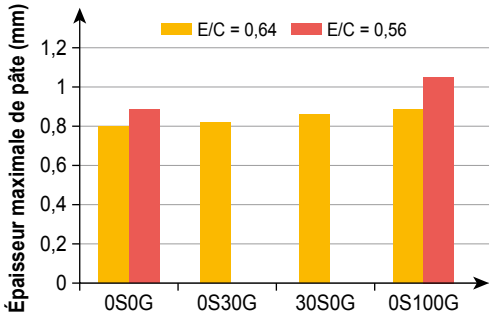
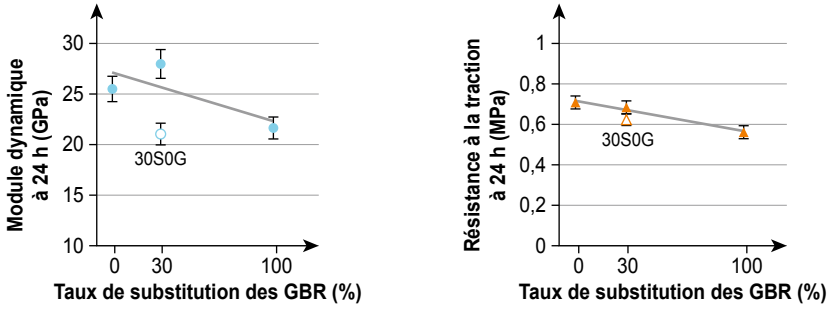


Figure 8.13

Influence du taux de substitution en GBR sur les propriétés au jeune âge



8.3.3.2. Effet de la saturation initiale en eau

Les mesures de retrait plastique sur le béton B0S100G avec différents taux de saturation en eau des gravillons de GBR ont montré des disparités mineures.

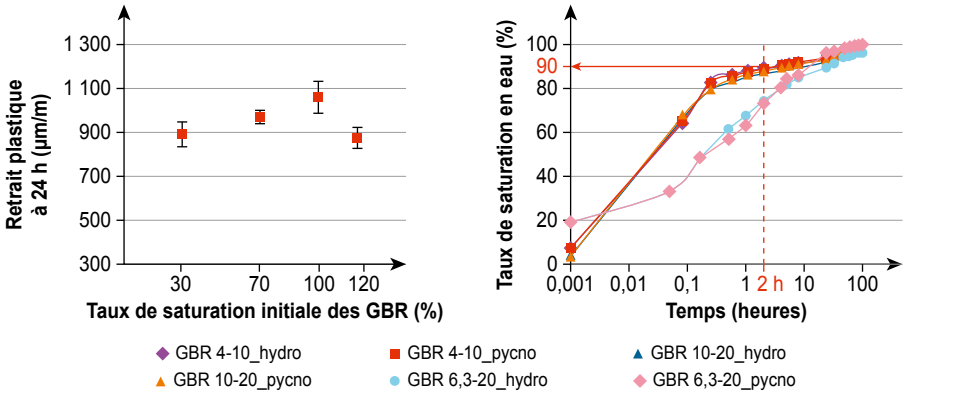
L'amplitude après 24 h est comprise entre 870 et 1 055 µm/m (Figure 8.14a). Les temps de début et de fin de prise sont d'environ 6 heures et 11 heures, respectivement. À 24 heures, le retrait n'a pas significativement augmenté.

Figure 8.14

Corrélation entre retrait plastique et taux d'absorption d'eau des granulats

a) Effet de la saturation en eau des GBR sur le retrait plastique

b) Influence du type de granulats sur le taux d'absorption d'eau [Bendimerad *et al.*, 2015]

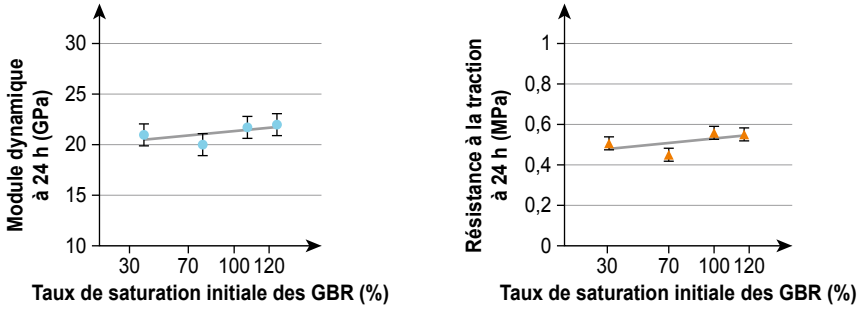


Les bétons 1B0S100G-0,3A et 1B0S100G-1,2A montrent les valeurs les plus faibles. Le béton avec les gravillons de GBR saturés initialement à 0,3A contient plus d'eau ajoutée (A_{add} = 218,4 kg/m^3, E_{gr} = 22,6 kg/m^3), ce qui provoque un ressuage plus élevé [Almusallam *et al.*, 1998]. Cette eau de ressuage supplémentaire a atténué le retrait plastique de ce béton. Le béton avec le gravillon de GBR sursaturé à 1,2A a aussi un retrait relativement faible. Ce mélange est caractérisé par la même eau totale que le béton de 0,3A (E_{add} = 179,8 kg/m^3, E_{gr} = 61,2 kg/m^3). Le gravillon sursaturé libère en fait de l'eau dans la pâte de ciment et fournit une cure interne au béton [Zhutovsky *et al.*, 2002]. Cette cure interne a été également observée dans le cas d'autres bétons recyclés [Salgues *et al.*, 2016].

Les mesures d'absorption d'eau sur les différents granulats ont montré, pour les GBR, un taux de saturation en eau relativement élevé au cours de la première heure [Bendimerad *et al.*, 2014]. Après deux heures, la saturation en eau atteint 90 % (Figure 8.14b). Donc, lorsque commence la déformation plastique, la majeure partie de la saturation a déjà été opérée, ce qui explique l'effet limité de la saturation initiale en eau.

Les propriétés mécaniques (module d'élasticité et résistance à la traction) à 24 heures montrent que l'effet de la saturation initiale en eau des gravillons de GBR est négligeable (Figure 8.15).

Figure 8.15
Influence de la saturation initiale en eau des gravillons de GBR sur les propriétés au jeune âge du béton 1-B0S100G [Bendimerad *et al.*, 2016]



8.4. Besoins de recherche

Peu d'études traitent de l'influence des granulats de béton recyclé (GBR) sur le comportement au jeune âge du béton. Une étude approfondie impliquant deux laboratoires a été réalisée pour comprendre l'influence de la saturation initiale en eau et de la proportion de GBR sur les mouvements d'eau dans le béton frais et sur les propriétés du béton au cours de son durcissement. L'étude présentée dans ce chapitre traite principalement des gravillons de GBR. Ce matériau est caractérisé par une propreté relativement bonne, une faible teneur en ancienne pâte et une forte absorption d'eau. Les résultats obtenus avec le sable de GBR sont différents, ce qui souligne la nécessité de bien considérer les propriétés du GBR. De nouvelles recherches expérimentales devraient s'intéresser à l'influence de la propreté et de la proportion de sables de GBR. Même si leur proportion est faible, les fines (produites par le concassage du béton d'origine) ont une influence significative sur le retrait plastique, en raison de leur forte absorption d'eau.

En termes d'essais et d'analyses, l'étude sur la sensibilité à la fissuration n'a pas pris en compte le fluage de traction, ni la relaxation au jeune âge. Ces propriétés ne sont pas facilement mesurables par essais directs. Cependant, des essais de retrait empêché permettraient de fournir une estimation indirecte de ces paramètres. Par exemple, le système TSTM (*Température-Stress Testing Machine*) fournit l'évolution de la déformation libre et empêchée, desquelles le fluage et la relaxation peuvent être déduits (thèse Bendimerad, 2016).

Les GBR influencent à différents niveaux le comportement du béton au jeune âge, et les effets sont souvent couplés. Les études expérimentales ne permettent alors pas toujours de séparer les effets induits par les propriétés intrinsèques des GBR de ceux associés à leur comportement dans la pâte de ciment. Une modélisation multi-échelle constituerait alors une approche intéressante pour comprendre ces phénomènes complexes.

8.5. Conclusions

Deux programmes expérimentaux ont été réalisés en concertation afin de fournir des données sur l'influence de la proportion de granulats de béton recyclé (GBR) et de leur saturation initiale en eau sur le retrait plastique, le risque de fissuration et les propriétés du béton au jeune âge. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette étude approfondie :

- en raison de leur porosité relativement élevée, les GBR absorbent de l'eau qui peut être libérée dans la pâte de ciment. En condition endogène ou sous séchage modéré, cette eau fournit une cure interne qui atténue le retrait plastique. Cependant, en condition de séchage sévère, le taux d'évaporation élevé peut amorcer le séchage des GBR, et donc augmenter l'ampleur du retrait,
- le concept de pression d'entrée d'air peut être utilisé pour étudier l'influence des GBR sur le risque de fissuration du béton frais. Le moment où la fissuration apparaît a été évalué par le biais d'essais spécifiques (ASTM C1579) et les résultats expérimentaux des bétons étudiés ont montré une corrélation effective avec la pression d'entrée d'air, déterminée à partir de la courbe de teneur en eau en fonction de la pression capillaire,
- le gravillon de GBR utilisé dans cette étude avait une cinétique d'absorption rapide, de sorte que la quantité d'eau restant dans la pâte de ciment était proche de la teneur théorique en eau efficace. Une faible influence du taux de saturation initial a été observée lorsque l'eau totale est maintenue constante. À quantité variable d'eau totale, la pression d'entrée d'air diminue linéairement avec le rapport eau efficace/liant (E_{eff}/L), quel que soit le type de granulat,
- la proportion de GBR a une influence notable sur les propriétés du béton, à savoir le retrait plastique, le module d'élasticité et la résistance à la traction. Cependant, il est difficile de statuer sur la sensibilité à la fissuration d'après ces résultats, car l'influence des GBR sur la relaxation n'a pas été évaluée dans cette étude.

À partir de ces résultats expérimentaux, il peut être recommandé d'appliquer une cure adaptée aux bétons de GBR. Les travaux montrent qu'il existe effectivement un couplage fort entre la saturation initiale en eau, les propriétés du béton frais et l'exposition au séchage, vis-à-vis du retrait plastique et du risque de fissuration associé. Les proportions de GBR et leur saturation initiale n'induisent pas, en eux-mêmes, une plus grande sensibilité à la fissuration, mais ils sont susceptibles de favoriser l'apparition des fissures dans des conditions de séchage sévère (GBR secs au départ et taux d'évaporation élevé).

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance, pour leur soutien avéré, à l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), dans le cadre du projet ECOREB, et au Projet National RECYBETON.

Fiche bibliographique

Collection Ouvrage scientifique	**Sous-collection**	
ISSN 2558-3018	**ISBN** Papier 978-2-85782-746-7 PDF 978-2-85782-747-4	**Réf.** OSI4
Titre Le béton recyclé		
Sous-titre		
Coordinateur François de Larrard et Horacio Colina		
Date de publication Novembre 2018		**Langue** Français

Résumé

Le présent ouvrage traite du recyclage du béton concassé dans la fabrication de nouveaux bétons. Il résume l'essentiel des acquis du projet national de recherche RECYBETON, qui a mobilisé un grand nombre d'acteurs de la communauté technique française concernée entre 2012 et 2018. On commence par présenter la fabrication et les propriétés des granulats de béton recyclé. Puis on s'intéresse à l'utilisation de la partie fine de ce matériau dans la fabrication de liants. Cependant, dans le cas le plus courant, le béton concassé sera utilisé comme granulat de nouveaux bétons. Le béton recyclé ainsi obtenu voit certaines de ses propriétés modifiées, à des niveaux variables selon la propriété choisie et le taux de recyclage adopté. L'ouvrage détaille ensuite la formulation du béton recyclé, et son utilisation dans les structures, illustrée par la réalisation de cinq chantiers expérimentaux. On conclut sur une estimation de la ressource en granulats recyclés, sur les aspects normatifs, sur les pratiques nationales et sur les conditions pour un recyclage respectueux des impératifs du développement durable.

Mots-clés

Analyse du cycle de vie, béton recyclé, chantiers, ciment, développement durable, durabilité, feu, formulation, granulats, normes, procédés, propriétés, recyclage, règlements, ressource

Nbre de pages 792	**Prix** Papier 55 € HT PDF gratuit

Publication data form

Collection Scientific articles	**Sub-collection**	
ISSN 2558-3018	**ISBN** Print 978-2-85782-746-7 PDF 978-2-85782-747-4	**Réf.** OSI4
Title Recycled concrete		
Subtitle		
Coordinator François de Larrard and Horacio Colina		
Publication date November 2018		**Language** French

Summary
This book deals with the recycling of crushed concrete into new concrete. It summarizes most of RECYBETON's ouputs. This R&D national project involved a good part of the French technical community from 2012 to 2018. In a first chapter, production and characterization of recycled concrete aggregates are presented. The fine part of these materials can be used in the production of binders. However, more often, crushed concrete will be utilized as an aggregate for new (recycled) concrete. Some properties of this recycled concrete are affected, to an extent which depends on the chosen property and the recycling rate. Then, recycled concrete mix-design and structural modelling are addressed and demonstrated through a series of five experimental construction sites. The end of the book includes studies on recycled aggregate resource, standardization, national practices and sustainability of the recycling process.

Key Words
Aggregates, cement, codes, construction sites, durability, fire, life-cycle analysis, mix-design, process, properties, recycled concrete, recycling, resource, standards, sustainability

Nbr of page 792	**Price** Print 55 € HT PDF free of charge

Le présent ouvrage traite du recyclage du béton concassé dans la fabrication de nouveaux bétons. Il résume l'essentiel des acquis du projet national de recherche RECYBETON, qui a mobilisé un grand nombre d'acteurs de la communauté technique française concernée entre 2012 et 2018. On commence par présenter la fabrication et les propriétés des granulats de béton recyclé. Puis on s'intéresse à l'utilisation de la partie fine de ce matériau dans la fabrication de liants. Cependant, dans le cas le plus courant, le béton concassé sera utilisé comme granulat de nouveaux bétons. Le béton recyclé ainsi obtenu voit certaines de ses propriétés modifiées, à des niveaux variables selon la propriété choisie et le taux de recyclage adopté. L'ouvrage détaille ensuite la formulation du béton recyclé, et son utilisation dans les structures, illustrée par la réalisation de cinq chantiers expérimentaux. On conclut sur une estimation de la ressource en granulats recyclés, sur les aspects normatifs, sur les pratiques nationales et sur les conditions pour un recyclage respectueux des impératifs du développement durable.

This book deals with the recycling of crushed concrete into new concrete. It summarizes most of RECYBETON's ouputs. This R&D national project involved a good part of the French technical community from 2012 to 2018. In a first chapter, production and characterization of recycled concrete aggregates are presented. The fine part of these materials can be used in the production of binders. However, more often, crushed concrete will be utilized as an aggregate for new (recycled) concrete. Some properties of this recycled concrete are affected, to an extent which depends on the chosen property and the recycling rate. Then, recycled concrete mix-design and structural modelling are addressed and demonstrated through a series of five experimental construction sites. The end of the book includes studies on recycled aggregate resource, standardization, national practices and sustainability of the recycling process.

François DE LARRARD
Directeur Scientifique, Groupe LafargeHolcim
Directeur scientifique du projet national RECYBETON

Horacio COLINA
Directeur du Pôle Recherche, ATILH
Directeur du projet national RECYBETON.

Traduit de l'anglais par André LECOMTE

Photo de couverture : microstructure du béton recyclé (Assia DJERBI, IFSTTAR)

IFSTTAR

LES COLLECTIONS DE L'IFSTTAR

ISBN : 978-2-85782-747-4
ISSN : 2558-3018
Réf : OSI4
Novembre 2018