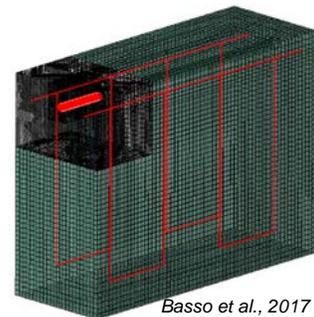
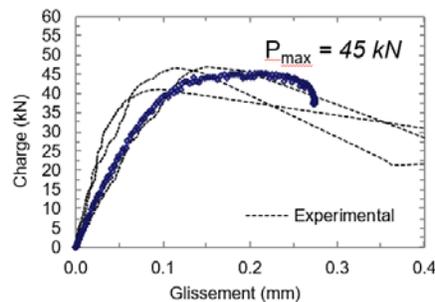


Actes de la 18^e édition des Journées Scientifiques

(RF)²B Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton

« Les nouveaux matériaux et les méthodes innovantes utilisés dans un
contexte de développement durable »



6 et 7 Juillet 2017

Université Laval
CRIB Québec



TABLE DES MATIÈRES

Programme des Journées pp. iv

Liste des affiches pp. viii

Articles

UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES BÉTONS AUTO-COMPACTANTS pp.1-11

Md El K. Bouarroudj^{A,B}, C. Colman^{A,B}, E. Robinet^A, Z. Zhao^A, F. Michel^A, L. Courard^A, S. Remond^B, D. Bulteel^B

A : Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège Belgique

B : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES DIMENSIONS pp. 12-22

C. Nader^A, P. Rossi^A, J-L. Tailhan^A

A : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE BÉTONS D'ENROCHEMENT pp. 23-33

C. Perlot^A, H. Carré^A

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS ET DOSAGES pp. 34-42

R. Trauchessec^A, E. Ghorbel^B, A. Lecomte^A, O. Safiuallah^B, Z. Ben Aouda^A, G. Wardeh^B

A : Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

B : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France



*ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES
ADDITIONS REACTIVES* pp. 43-58

S. Fattahi^A, R. Gagné^A

A : Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université
de Sherbrooke, Québec, Canada

*FLUAGE DU BÉTON ET DU BÉTON PRÉCONTRAINTE SOUS
CONDITIONS THERMO-HYGRO-MÉCANIQUES VARIABLES* pp. 59-69

H. Cagnon^A, V.N. Nguyen^B, T. Vidal^A, J.M. Torrenti^B, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et
Durabilité des Constructions); 135, avenue de Ranguel; F-31 077
Toulouse Cedex 04, France.

B : Institut français des sciences et technologies des transports, de
l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), 14-20 Boulevard Newton -
Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

*RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES
SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT
DES SULFURES DE FER* pp. 70-80

B. Fournier^A, J. Duchesne^A, A. Rodrigues^B

A : Département de géologie et de génie géologique, Université Laval,
Québec, Canada

B : GHD Consultants Ltée, Québec, Canada

*EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE
L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE* pp. 81-89

P. Basso Trujillo^A, M. Jolin^A, B. Massicotte^B, B. Bissonnette^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval,
Québec, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique
de Montréal, Québec, Canada

*AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGÉES PAR
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon^A, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des
Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

*INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA
FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLlicitÉ EN
TRACTION* pp. 99-117

T. Plagué^A, C. Desmettre^A, J.-P. Charron^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



UNIVERSITÉ
LAVAL



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton (CRIB)

PASSERELLE PIETONNE ISABEY-DARNLEY – UTILISATION DE
DALLES PREFABRIQUEES EN BFUP

pp. 118-143

É. Cantin-Bellemare^A, J.-P. Charron^B

A : Ville de Montréal, QC, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



PROGRAMME DU 6 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 Mot de bienvenue et présentation du (RF)²B par Gilles Escadeillas

9h15 **Conférencier invité** : Jacques Marchand, SIMCO Technologies
Titre : L'ingénierie de la durabilité - Concevoir des structures qui
atteindront une durée de vie de 100 ans et plus

10h15 **Étude du comportement résiduel de structures atteintes par la RAG**
Farid Benboudjema (1), Georges Nahas (1, 2), Ejona Kishta (1)
(1) LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), France
(2) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

10h45 : Pause-café – (affiches)

11h15 **Mécanismes d'hydratation des liants à base de ciments alumineux
en système dilué - confrontation mesures expérimentales et
modélisation numérique**
Nicolas Maach (1), Jean-François Georgin (1), Judith Pommay (2)
(1) LGCIE – INSA de Lyon, France
(2) Kerneos, France

11h45 **Passerelle piétonne Isabey-Darnley – Utilisation de dalles
préfabriquées en BFUP**
Étienne Cantin-Bellemare (1), Jean-Philippe Charron (2)
(1) Ville de Montréal
(2) École Polytechnique de Montréal

12h15 Repas

13h45 **Utilisation de bétons recyclés dans la formulation de bétons
autocompactants**
Mohamed El Karim Bouarroudj (1,2), Charlotte Colman (1,2), Eva
Robinet (1), Zengfeng Zhao (1), Frédéric Michel (1) Luc Courard (1),
Sébastien Remond (2), David Bulteel (2)
(1) Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental
Engineering, – Université de Liège, Belgique
(2) IMT Lille Douai, Université de Lille, France

14h15 **Stratégie multi-échelle de modélisation numérique de la fissuration
des structures en béton armé de grandes dimensions**
Christian Nader, Pierre Rossi, Jean-Louis Tailhan
IFSTTAR, France



14h45 **Valorisation de laitiers d'aciérie dans des blocs de bétons d'enrochement**

Céline Perlot, Hélène Carré

Université de Pau et des Pays de l'Adour - laboratoire SIAME, France

15h15 **Mélange de sable naturel avec une faible proportion de sables de bétons recyclés : dosages et propriétés**

Romain Trauchessec (1), Elhem Ghorbel (2), André Lecomte (1), Omary Safiuallah (2), Zakaria Ben-Aouda (1), George Wardeh (2)

(1) Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

(2) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France

15h45 **Visite des laboratoires de l'Université Laval**

19h00 **Restaurant Le Cosmos** (terrasse), 2813 boulevard Laurier, Québec



PROGRAMME DU 7 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 **Conférencier invité** : Luc Bédard, Association béton Québec (ABQ)
Titre : L'avenir de l'industrie du béton et l'intégration du développement durable

10h00 **Influence des additions cimentaires à forte teneur en chaux libre sur l'autocicatrisation naturelle des mortiers**
Salma Fattahi, Richard Gagné
Université de Sherbrooke

10h30 Pause-café (affiches)

11h00 **Fluage du béton et du béton précontraint sous conditions thermo-hygro-mécaniques variables**
Hugo Cagnon (1), V.N. Nguyen (2), T. Vidal (2), J.M. Torrenti (2), A. Sellier (1)
(1) LMDC, France
(2) IFSTTAR, France

11h30 **Récents développements dans la recherche et les spécifications sur les granulats à béton incorporant des sulfures de fer**
Benoit Fournier, Josée Duchesne et Andreia Rodrigues
CRIB, Université Laval

12h00 Repas

13h30 **Analyse du cycle de vie pour les infrastructures en génie civil : passé, présent et futur**
Ben Amor, Jean-Martin Lessard
CRIB, Université de Sherbrooke

14h00 **Calcul de la longueur de développement en présence de défauts**
Pasquale Basso (1), Marc Jolin (1), Bruno Massicotte (2)
(1) CRIB, Université Laval
(2) CRIB, École Polytechnique de Montréal

14h30 **Améliorer l'évaluation des structures endommagées par des réactions de gonflement interne à l'aide de modélisations physico-chimiques.**
Stéphane Multon, Alain Sellier
LMDC, France



15h00 **Influence de l'orientation et du type de fibres sur la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé**

Thibault Plagué, Clélia Desmettre, Jean-Philippe Charron
École Polytechnique de Montréal

15h30 Clôture des Journées scientifiques

15h45 Réunion du Conseil d'orientation (interne)
Salle 3347, pavillon Alphonse-Desjardins



AFFICHES POUR LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU (RF)2B

BÉDARD, Frédéric. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton en conditions de service*. Université Laval

COLMAN, Charlotte. *Residues de plâtre dans les fines de recyclage*. Université de Liège

ESSALIK, Samy-Joseph. *Nouvel essai annulaire adapté aux bétons à retrait compensé*. Université Laval

FAUCON, Samuel. *Réactions de gonflement interne (RAS et DEF) soumis à des chocs thermiques*. Université de Sherbrooke

FRECH-BARONET, Jessy. *Influence de l'humidité relative sur le comportement du fluage et de la relaxation de la pâte de ciment à l'échelle de la microstructure*. Université Laval

GAGNON, Antoine. *Conception et évaluation de la performance du béton projeté renforcé de fibres : concepts et défis*. Université Laval

HILT, Mélodie. *Production de béton en usine et développement durable : utilisation de technologie de contrôle continu*. Université Laval

MENU, Bruce-Ghandi. *Comportement différé des bétons au jeune âge*. Université Laval

MBINA, Mihindou. *Évaluation non-destructive de la qualité de l'adhérence entre deux bétons par la méthode de la réponse impulsionnelle (RI)*. Université de Sherbrooke

VU, Viet Anh. *Mur radiant : panneaux composite hybride bois et matériel inorganique*. Université Laval

MASOUD, Hosseinpoor. *Simulation numérique de l'écoulement du béton autoplaçant (BAP)*. Université de Sherbrooke

AHMED, Mostafa. *Nouvelle méthode pour quantifier la structuration des suspensions cimentaires*. Université de Sherbrooke

DIMA, Youness. *Caractérisation améliorée de l'écoulement des liants, ajouts cimentaires et liants alternatifs*. Université de Sherbrooke

18^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Université Laval, Québec, Canada
6 et 7 juillet 2017

UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES BÉTONS AUTO-COMPACTANTS

Md El K. Bouarroudj^{A,B}, C. Colman^{A,B}, E. Robinet^A, Z. Zhao^A, F. Michel^A, L. Courard^A, S. Remond^B, D. Bulteel^B

A Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège Belgique

B IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement, département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

Résumé : Notre travail porte sur l'étude du comportement des bétons auto-compactants ou auto-plaçants réalisés à base de sable recyclé et de sable recyclé broyé. La première étape consiste en une caractérisation physico-chimique et minéralogique (masse volumique, absorption d'eau, teneur en sulfates, composition chimique...) d'un sable de béton recyclé. Dans un deuxième temps, une étude des propriétés rhéologiques et mécaniques est réalisée sur des mortiers afin de réduire la quantité de matériaux naturels utilisés. La composition du mortier de base est dérivée d'une formulation type de béton auto-compactant préalablement vérifié sur la base de différents critères classiques (étalement au cône, t_{500} , teneur en air,...). Notre étude s'intéresse d'une part aux impacts de la substitution du filler calcaire par du sable recyclé broyé (série 1) et d'autre part aux impacts de la substitution du sable naturel par du sable recyclé (série 2).

1. INTRODUCTION

Les bétons de démolition sont considérés comme des déchets inertes (déchets n'entraînant pas de pollution et ne nuisant pas à la santé humaine). Leur nature varie selon leur origine (bâtiment, ouvrages d'art constitués de béton armé ou non ou structures routières). Les déchets de démolition sont très hétérogènes et comportent des éléments préjudiciables à une valorisation en tant que granulats pour les bétons. Les fractions fines tel que les sables ou encore plus fines que les sables sont plus difficiles à valoriser que les fractions grossières. L'utilisation de la méthode de tri in situ des déchets permettrait de séparer les flux à la source et donc de les purifier.

Les sables recyclés contiennent de la pâte de ciment durci. Ils présentent une masse volumique de 10 à 15% plus faible que les sables naturels et leur porosité est plus grande, ce qui induit une absorption d'eau plus élevée et par conséquent une demande en eau plus importante que dans le cas du sable naturel (Évangelista, 2015). La taille des particules a une influence notable sur la teneur en pâte de ciment durci. Plus la taille des particules diminue, plus la teneur en pâte de ciment durci augmente. Une étude menée par Zhao et al. a montré que l'eau liée et la masse volumique des fines du béton recyclé sont fortement corrélées (Zhao, 2015).

De nombreuses recherches ont été menées dans le but de trouver des voies de valorisation aux sables recyclés, que ce soit sous la forme de granulats (Zhao, 2015)(Omary, 2015), en tant que liants

hydrauliques routiers (Oksri-Nelfia, 2015) ou comme constituants pour la fabrication du ciment (Diliberto, 2017)

Les résultats préliminaires présentés dans cet article traitent de l'utilisation des sables recyclés dans la fabrication d'un béton auto-compactant. Deux axes de valorisation sont proposés, le premier en tant que fines (sable recyclé broyé) et le deuxième en tant que sable.

2. MATÉRIAUX

2.1 Ciment et autres matériaux

Le ciment utilisé dans cette étude est un CEM I 52.5N conforme à la norme NBN EN 197-1 de la société CBR, la masse volumique de ce ciment est de 3.1g/cm^3 , et sa surface spécifique Blaine est de $3800\text{cm}^2/\text{g}$. Les fillers calcaires sont issus de la société Carmeuse, la masse volumique absolue est de 2.73g/cm^3 mesurée au pycnomètre à hélium, leur surface spécifique est de 3174g/cm^3 . L'adjuvant utilisé est un ViscoCrete-2700 de la société SIKA conforme à la norme EN 934 avec un extrait sec de 30%. Deux types de gravillons 2/7 et 7/14 de la société LOVEMAT ont également été utilisés pour la fabrication du béton auto-plaçant. Le sable naturel utilisé dans la fabrication du béton auto-plaçant ainsi que des mortiers est un sable 0/2 silico calcaire de la société LOVEMAT. Les masses volumiques et l'absorption d'eau des granulats et du sable naturel sont déterminées suivant la norme EN 1097-6, les résultats sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Masse volumiques et coefficients d'absorption d'eau des granulats et du sable naturel

	Sable naturel	Granulat 2/7	Granulat 7/14
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,606	2,772	2,723
Masse volumique réelle séchée (g/cm^3)	2,514	2,689	2,641
Masse volumique réelle saturée surface sèche (g/cm^3)	2,549	2,727	2,671
Absorption d'eau %	1,41	1,4	1,14

2.2 Sable recyclé

Un sable recyclé mixte qu'on notera SR, issu d'une plateforme de recyclage de la compagnie TRADECOWALL en Belgique, a été utilisé. Dans ce sable recyclé, nous avons observé des traces de gypse, des briques, de petits bouts de bois, du plastique, des fines terreuses et des fines issues du concassage du béton (Fig. 1). Ce type de matériau a été choisi dans le but de se rapprocher au maximum de la réalité des matériaux recyclés

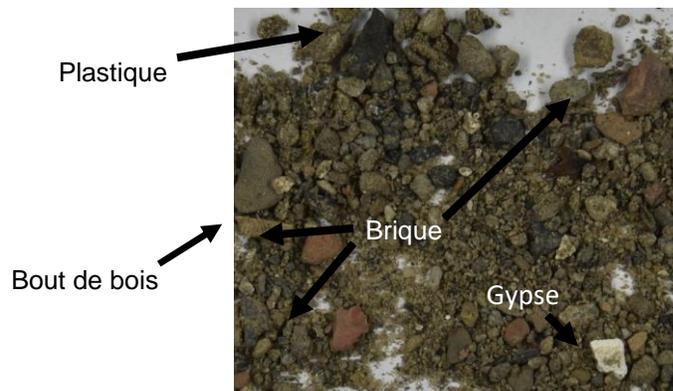


Figure 1 : Différentes impuretés trouvées dans le sable recyclé

Le sable recyclé a été broyé (SRB) dans un broyeur à boulets pendant 30 minutes. Le but de ce procédé est de générer des quantités importantes de fines pour étudier leur effet sur les bétons auto-compactants en remplacement du filler calcaire (FC).

3. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX ET COMPOSITIONS DES MÉLANGES

3.1 Caractérisation du sable recyclé et du sable recyclé broyé

Une étude des caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques sur le sable recyclé (SR) ainsi que sur le sable recyclé broyé (SBR) a été menée. La masse volumique sur le sable recyclé a été mesurée suivant la norme EN 1097-6 ainsi qu'avec la méthode du pycnomètre à hélium (masse volumique absolue). Les essais d'absorption d'eau et de porosité accessible à l'eau ont également été réalisés suivant la même norme, dans ces essais 4 mesures ont été réalisées à chaque fois. La courbe granulométrique a été aussi mesurée.

Les mesures de la masse volumique sur le sable recyclé broyé ont été réalisées par la méthode du pycnomètre à hélium ; la surface spécifique a été évaluée par une mesure BET et suivant la norme EN 196-3 (surface Blaine) et la courbe granulométrique a été déterminée par granulométrie laser. L'analyse chimique par fluorescence X, et une analyse par diffraction des rayons X ont été réalisées.

Des mesures de β_p ont été effectuées sur les sables recyclés broyés et sur les fillers calcaires. Cette méthode vise à déterminer la demande en eau β_p du mélange. Celle-ci est mesurée de manière indirecte. L'essai consiste à mesurer l'étalement d'une pâte à différentes teneurs en eau de manière à extrapoler cette valeur par régression linéaire jusqu'à l'abscisse nulle (Domone, 1997). La figure 2 représente un graphique typique de détermination du β_p .

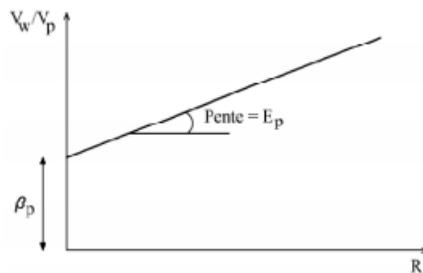


Figure 2 : Graphique typique du β_p (Domone, 1997)

β_p représente le rapport de rétention d'eau, qui tient compte de l'eau absorbée ainsi que l'eau nécessaire pour combler les vides de manière à fournir aux particules une lubrification tout juste inférieure à celle qui leur faudrait pour se mouvoir sur la surface de la poudre. E_p est le coefficient de déformation. Il s'agit d'une mesure de la sensibilité des caractéristiques de la pâte à l'augmentation de la quantité d'eau (Domone, 1997).

3.2 Compositions des mélanges

Dans ce travail, nous avons décidé de partir d'une composition de béton auto compactant (BAP) avec des matériaux naturels. Ce béton a été fabriqué en laboratoire et une série de tests rhéologiques et de résistances mécaniques à 7 et 28 jours ont été réalisés. La composition ainsi que les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton sont présentés dans les tableaux 2 et 3.

Nous avons décidé, dans un premier temps, de travailler sur le mortier et plus précisément sur le mortier directement extrait du béton de référence. 12 mélanges de mortiers ont été réalisés, avec le même rapport E_{eff}/C , en prenant en considération l'eau apportée par l'adjuvant ainsi que l'eau absorbée par le sable recyclé et naturel. Pour le sable recyclé broyé nous avons considéré que le coefficient d'absorption d'eau était nul (cette hypothèse sera vérifiée a posteriori).

Tableau 2 : Composition en kg pour 1m³ de BAP

Constituants	CEM I	FC	Sable (0/2)	Granulat (2/7)	Granulat (7/14)	Eau	Adjuvant	E/C
Quantité (kg)	311	207	918	295	554	165	6,5	0,53

Tableau 3 : Comportement rhéologique et mécanique du BAP

Étalement (mm)	Temps étalement (s)	U-box(mm)	Temps U-box (s)	V-funnel (s)	% air	Rc 7 Jours (MPa)	Rc 28 jours (MPa)
700	4	334	10	14	2,5%	42,5	49,3

Dans la première série, nous avons substitué le filler calcaire (FC) par le sable recyclé broyé (SBR) et, dans la deuxième série, nous avons substitué le sable naturel par le sable recyclé (SR). Nous avons également remplacé le sable naturel par le sable recyclé recomposé pour avoir la même granulométrie (SR(0/2)). Les taux de substitutions étaient, pour les deux séries, de 20%, 40%, 60%, 80% et 100%. Les compositions détaillées pour la fabrication de trois litres de mortier sont présentées dans le tableau 4.

Le protocole de malaxage obéit aux étapes suivantes (Schwartzentruber et al. 2000) :

- Introduire le sable avec une quantité d'eau égale à l'absorption du sable augmentée de 1%,
- Malaxer pendant 120 secondes à petite vitesse,
- Laisser reposer pendant 5 minutes,
- Introduire le ciment et les fillers calcaires et/ou le sable recyclé broyé,
- Malaxer 30 secondes à petite vitesse,
- Introduire l'eau et l'adjuvant,
- Malaxer 30 secondes à petite vitesse,
- Malaxer 30 secondes à grande vitesse,
- Racler le fond et le pourtour du bol pendant 90 secondes,
- Malaxer 60 secondes à grande vitesse.

Tableau 4 : Compositions des mortiers (Kg)

		Ciment	SRB	FR	SN	SR	Adjuvant	E _{eff}
	Mortier de référence	1,344	0,000	0,895	3,968	0	0,028	0,697
Séries 1	20% SRB	1,344	0,175	0,716	3,968	0	0,028	0,697
	40% SRB	1,344	0,350	0,537	3,968	0	0,028	0,697
	60% SRB	1,344	0,526	0,350	3,968	0	0,028	0,697
	80% SRB	1,344	0,701	0,175	3,968	0	0,028	0,697
	100% SRB	1,344	0,876	0,000	3,968	0	0,028	0,697
Séries 2	20% SR	1,344	0	0,895	3,174	0,794	0,028	0,697
	40% SR	1,344	0	0,895	2,381	1,587	0,028	0,697
	60% SR	1,344	0	0,895	1,587	2,381	0,028	0,697
	80% SR	1,344	0	0,895	0,794	3,174	0,028	0,697
	100% SR	1,344	0	0,895	0	3,968	0,028	0,697
	100% SR (0/2)	1,344	0	0,895	0	3,953	0,028	0,697

3.3 Compacité sur poudre

La compacité des poudres a été déterminée à partir d'un essai de demande en eau. Ceci permet de prendre en compte l'influence de l'eau sur le comportement des poudres mais aussi d'un adjuvant (De Larrard, 1999) (Sedran, 1999). La méthode utilisée dans ce travail est basée sur la norme EN 196-3 : dans ce cas, la demande en eau correspond à la quantité d'eau nécessaire pour que la sonde de Vicat s'enfonce jusqu'à 6 mm du fond du moule contenant la pâte. Cet essai présente l'avantage de faire

référence à une mesure quantitative et non affectée par la subjectivité de l'opérateur (Lecomte et al., 2006).

$$C_{\text{exp}} = \frac{1000}{1000 + M_v \cdot \frac{M_e}{M_p}} \quad (1)$$

Où M_v est la masse volumique de la poudre, M_e et la masse de l'eau et M_p est la masse de la poudre.

Les essais ont été réalisés en prenant les mêmes proportions volumiques de pâte (ciment avec filler calcaire et ciment avec sable recyclé broyé) que celles utilisées dans le mortier de référence et dans le mortier avec 100 % de sable recyclé broyé. Le volume total utilisé correspond à un volume de 500 g de ciment. L'essai a été réalisé sans et avec un superplastifiant. Les compositions sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Composition des pâtes utilisées (en grammes).

	Ciment	FC	SRB	SP	E avec adjuv	E sans adjuv
Mélange 1	283,83	188,94	0	0 ou 5,96	75,1	150
Mélange 2	287,14	0	185	0 ou 6,03	80	132,61

Le cycle de malaxage utilisé est le même que recommandé dans la norme EN 196-3, à part pour le mélange réalisé avec superplastifiant pour lequel 180 secondes de malaxage supplémentaires ont été rajoutées, dans le but de laisser l'adjuvant réagir (Lecomte, 2006).

3.4 Essais à l'état frais

Une série d'essais à l'état frais a été réalisée dans le but d'étudier la maniabilité des mortiers. Des essais d'étalement ont été mesurés avec un mini-cône(100X70X50mm), l'essai consiste à remplir le cône en trois couches de volumes semblables et piquées 15 fois chacune, le cône est soulevé le plus verticalement possible, on mesure à chaque fois 4 diamètres et on fait la moyenne. Une étude d'étalement dans le temps a aussi été réalisée sur le mortier de référence et le mortier réalisé avec 100% de SR. Les teneurs en air ont été mesurées avec un aéromètre sur toutes les séries de mortiers.

3.5 Essais mécaniques

Les résistances mécaniques à 7 et 28 jours ont été mesurées sur une série de 3 éprouvettes (4cm*4cm*16cm). Les éprouvettes sont démoulées après 24h et conservées sous eau jusqu'à échéance des essais mécaniques afin de favoriser l'hydratation des systèmes cimentaires.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Caractérisation du sable recyclé et sable recyclé broyé

Dans le but de comparer les caractéristiques des matériaux recyclés avec ceux des matériaux naturels, les résultats du sable recyclé sont présentés avec le sable naturel, et sable recyclé broyé avec le filler calcaire.

Les résultats de la granulométrie, des différentes masses volumiques mesurées, ainsi que l'absorption d'eau et la porosité accessible à l'eau du sable recyclé et sable naturel sont présentés dans la figure 3 et le tableau 6.

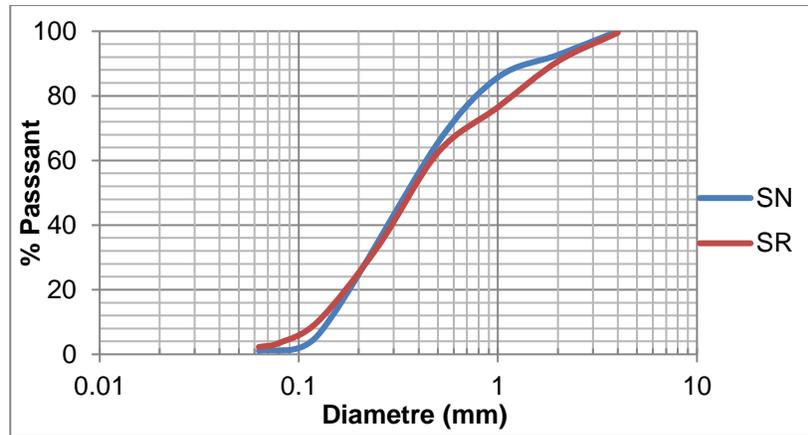


Figure 3 : Courbes granulométriques des sables

Tableau 6 : Masses volumiques, absorption d'eau et porosité des sables recyclés et naturels

	Sable recyclé (SR)		Sable naturel (SN)	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,456	0,033	2,606	0,019
Masse volumique réelle séchée (g/cm³)	2,238	0,028	2,514	0,018
Masse volumique réelle saturée surface sèche (g/cm³)	2,327	0,029	2,549	0,018
Masse volumique absolue à l'hélium (g/cm³)	2,64	0,004	2,66	0,003
Porosité accessible à l'eau (%)	9,7	0,13	4	0,03
Absorption d'eau %	3,95	0,19	1,41	0,33

Si on compare les résultats de la masse volumique mesurée à l'eau avec celle à l'hélium pour le sable recyclé, on observe une très grande différence. Cette différence est sans doute due au fait que la porosité à l'eau est mesurée après une immersion de 24h dans l'eau. Cette dernière ne permet sans doute pas une saturation complète de toute la porosité des grains.

Les résultats de la granulométrie, de masse volumique, de finesse Blaine et de la composition chimique pour le sable recyclé broyé et le filler calcaire sont présentés respectivement dans la figure 4, tableau 7 et tableau 8.

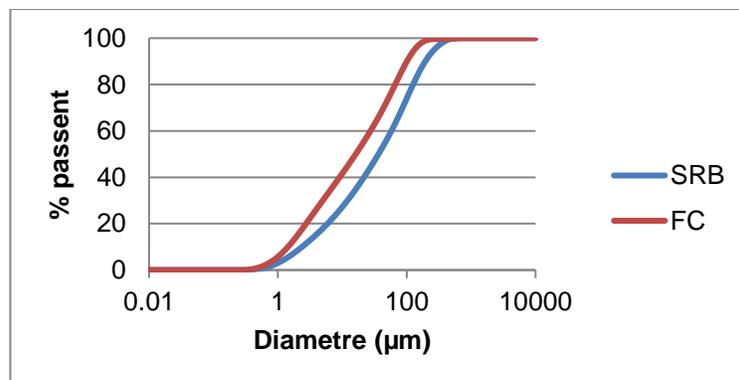


Figure 4 : Granulométrie des poudres

Tableau 7 : Masse volumique, surface spécifique Blaine et BET

	SRB	FC
Mv (g/cm ³)	2,69	2,71
SSB (cm ² /g)	3360	3180
SS BET (m ² /g)	2,771	0,772

Tableau 8 : Composition chimique du filler calcaire et sable recyclé broyé

	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
FC	11.9	49.1	0.3	0.3	0.5	37.6	0.1
SRB	2.3	51.2	1.2	3.2	27.6	10.2	2.2

Les courbes granulométriques, les masses volumiques et la surface spécifiques Blaine du SRB et FC ne montrent pas de différence significative, contrairement à la surface spécifique BET. Celle-ci est beaucoup plus importante dans le SRB en raison de sa porosité.

Les analyses par DRX mettent en évidence la présence majoritaire de Quartz et C-S-H pour le SRB, et de la Calcite pour le FC. La composition chimique présente des taux élevés en silice et faibles en carbone pour le SRB, ceci suppose que le sable recyclé est issu d'un béton réalisé avec des granulats siliceux.

Différentes mesures ont été réalisées dans le but d'obtenir le plus de points possibles afin de trouver les valeurs de β_p du FC ainsi que le SRB. Les résultats sont présentés dans la figure 5. La valeur du β_p pour le sable recyclé broyé est de 0.812, et pour le filler calcaire, elle est de 0.742. La différence entre les deux poudres montre clairement que le sable recyclé broyé a une demande en eau plus importante que le filler calcaire.

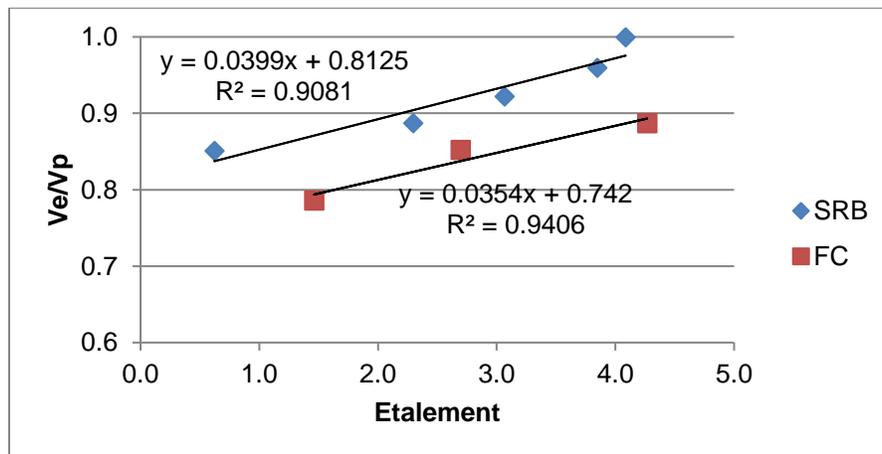


Figure 5 : mesures de β_p pour le FC et le SRB

4.2 Compacité des poudres

L'impact de l'adjuvant sur la compacité des mélanges ciment/filler ou ciment/SRB est présenté dans la figure 6. On observe tout d'abord que le mélange qui présente la meilleure compacité avec adjuvant (LP+C) n'est pas le même que sans adjuvant (SRB+C). Le mélange SRB+C nécessite donc plus d'eau pour obtenir une pâte de consistance normale quand on rajoute un adjuvant, en comparaison au FC+C, ce qui peut signifier que le sable recyclé broyé absorbe plus d'eau en présence d'adjuvant ou que l'interaction physico-chimique n'est pas la même qu'en présence de fillers calcaire.

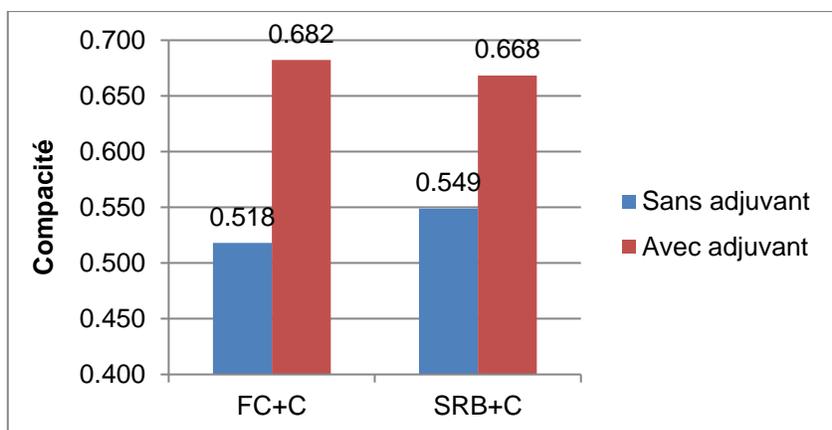


Figure 6 : Compacité des mélanges de poudres

4.3 Résultats à l'état frais

La figure 7 présente les résultats d'étalement des différents mortiers réalisés. Pour la première série, on remarque une diminution progressive de l'étalement avec l'augmentation de la substitution du filler calcaire par du sable recyclé broyé. Comme nous avons travaillé à eau de gâchage constante, et en se référant aux résultats obtenus de bêta P, surface spécifique BET ainsi qu'aux résultats de compacité, on peut penser que, contrairement à l'hypothèse prise pour la formulation des mortiers avec SRB, les fines absorbent une certaine quantité d'eau, ce qui peut expliquer cette chute de maniabilité.

Par contre, dans la deuxième série, nous remarquons une amélioration de la maniabilité avec la substitution du SN par le SR. Pour ces essais, nous avons pris en considération l'absorption de l'eau du SN et SR dans la quantité d'eau de gâchage ajoutée. On remarque aussi une différence entre les mélanges réalisés avec SR recomposés et le mélange réalisé avec 100% de SR : cette différence peut s'expliquer par le fait que le SR a une meilleure compacité que le SR recomposé. Aussi la recombinaison pourrait changer légèrement le coefficient d'absorption d'eau.

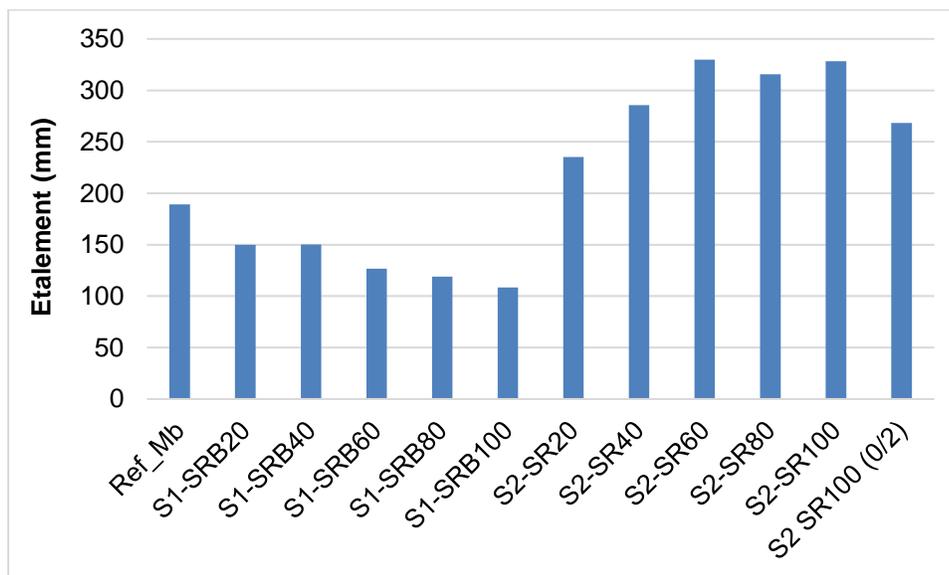


Figure 7 : Etalements des différents mortiers

Afin de comprendre l'amélioration de la maniabilité obtenue, nous avons réalisé des mesures d'étalement dans le temps. Les résultats présentés sur la figure 8 montrent que l'étalement reste constant pour le sable recyclé après une heure. Selon Benmounah (Benmounah, 2009) la présence de sulfate avec l'adjuvant peut améliorer la maniabilité des mortiers. Cet effet dépend surtout de la nature des sulfates présents puisque les sulfates alcalins ont un effet négatif sur la fluidité, tandis que les sulfates présents dans le gypse favorisent la maniabilité. Cependant, des quantités trop importantes de sulfates risquent de former de l'ettringite secondaire, ce qui peut conduire à des désordres importants dans les bétons. La norme EN 206+A1 autorise un taux maximum de 0.2% de sulfates solubles dans l'eau pour les granulats recyclés.

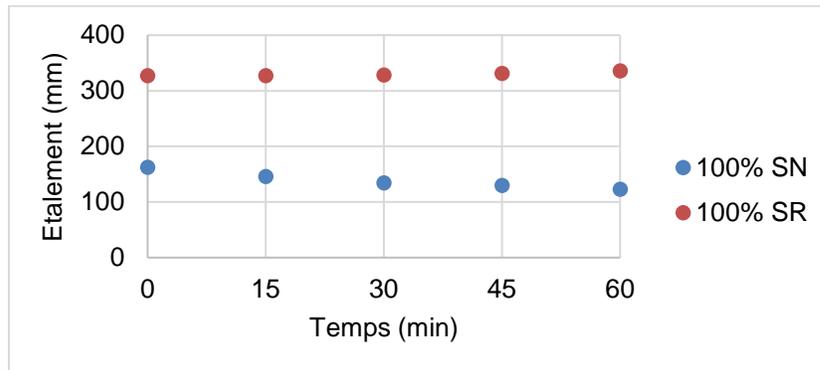


Figure 8 : Evolution de l'étalement dans le temps

Sur la figure 9, on remarque pour la première série que la teneur en air augmente avec l'augmentation de la teneur en SRB, ce qui atteste que le SRB absorbe une quantité d'eau. Dans la deuxième série, on remarque que la teneur en air est de $4\pm 1\%$ et reste stable. Pour le sable recyclé et recomposé (SR 0/2), la teneur en air est similaire à celle du mortier de référence.

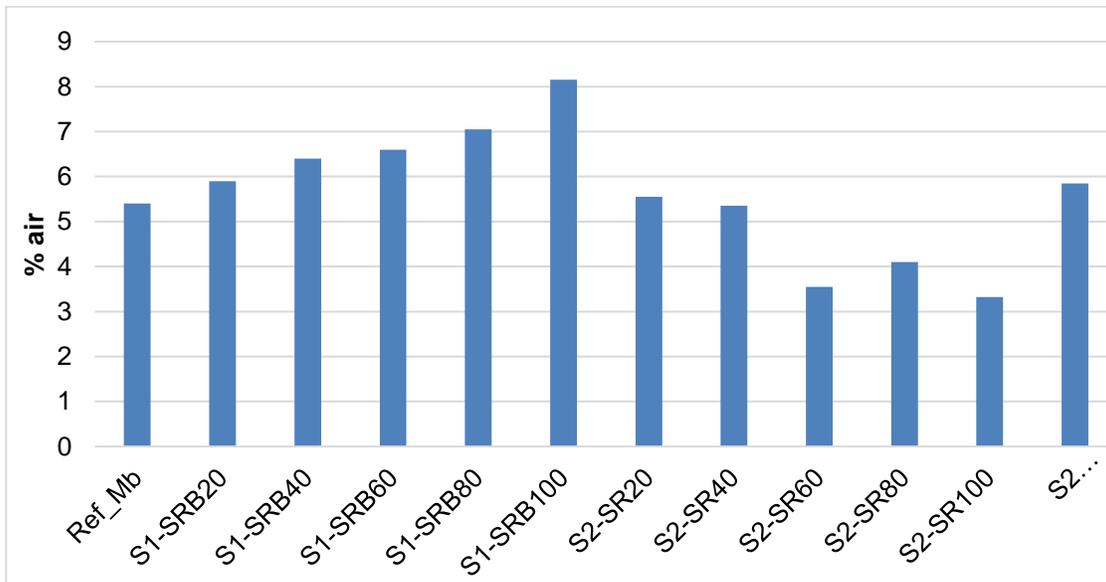


Figure 9 : Teneur en air des différents mortiers

4.4 Résultats mécaniques

Sur la figure 10, on observe pour la première série une chute de résistance à 7 jours qui passe de 47 MPa pour la référence à 39 MPa pour 100% de SRB, ce qui est sans doute dû au fait que le filler calcaire

accélère les résistances mécaniques au jeune âge (Courard, 2014). Mais, à 28 jours, nous constatons des résistances mécaniques très similaires à celle de la référence.

Pour la deuxième série, la substitution du SN par le SR ne modifie pas significativement les résistances en compression, aussi bien à 7 jours qu'à 28 jours.

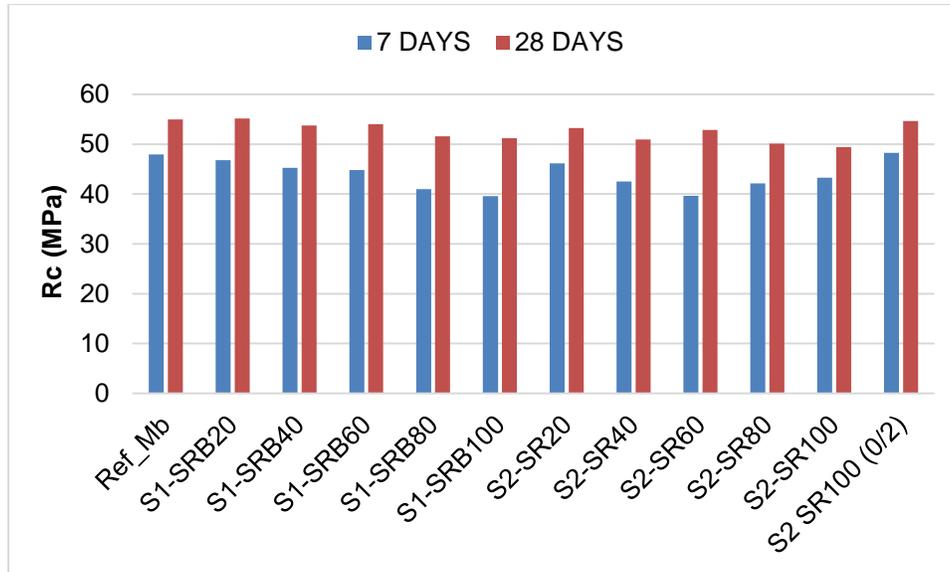


Figure 10 : Résistances en compression des mortiers à 7 et 28 jours

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude réalisée sur les mortiers a permis d'acquérir des informations sur le comportement du sable recyclé ainsi que sur le sable recyclé broyé en remplacement du filler calcaire. Les résultats font ressortir une diminution importante de l'étalement avec une augmentation du taux de substitution du filler calcaire par le sable recyclé broyé. Contrairement à l'hypothèse de départ, l'absorption d'eau de SRB n'est pas nulle. Toutefois, cette substitution n'a pas d'impact notable sur la résistance à la compression à 28 jours. En ce qui concerne l'utilisation du sable recyclé en remplacement du sable naturel, les résultats font ressortir à leur tour une croissance de l'étalement avec une augmentation du taux de sable recyclé. De ce fait, il est possible d'utiliser un sable recyclé dans la fabrication d'un mortier très fluide, donc du béton auto-compactant. Les résistances en compression obtenues à 7 et 28 jours ont montré qu'il est possible d'obtenir des résistances très proches de celles obtenues avec un matériau naturel.

Des essais de durabilité sont nécessaires afin de valider l'utilisation d'un tel matériau. Des formulations du béton auto-compactant avec un sable recyclé sont envisagées. De même, des essais complémentaires sur l'effet des sulfates sur le comportement rhéologique seraient nécessaires.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le programme Interreg France-Walloon-Vlaanderen qui finance ces travaux dans le cadre du projet VALDEM (Solution intégrées de valorisation des flux "matériaux" issus de la démolition des bâtiments : Approche transfrontalière vers une économie circulaire). Le projet a débuté le 1^{er} juillet 2016 et prendra fin le 30 juin 2020.

7. RÉFÉRENCES

Benmounah A., Kheribet R., Samar M., Saidi M. (2009). Comportement rhéologique des destinées aux bétons autoplaçants. *Revue Nature et Technologie*, 1, 74–88.

- Courard, L., Michel, F., Perkowicz, S., & Garbacz, A. (2014). Effects of limestone fillers on surface free energy and electrical conductivity of the interstitial solution of cement mixes. *Cement and Concrete Composites*, 45, 111–116.
- Diliberto, C., Lecomte, A., Mechling, J.-M., Izoret, L., & Smith, A. (2017). Valorisation of recycled concrete sands in cement raw meal for cement production. *Materials and Structures*, 50(2), 127.
- Domone, P.L., Chai, H.-W. (1997). Testing of binders for high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(8), 1141–1147.
- De Larrard, F. (2000). Structures granulaires et formulation des bétons. *Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, OA 34, 414 p.
- EN 206+ A1 (2016), Béton. Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206-1. AFNOR.
- Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A. C., Pereira, M. F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and Building Materials*, 86, 178–188.
- Lecomte, A., Diliberto, C., de Larrard, F. (2006). Indice de serrage des pâtes de consistance normale, Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)²B, Toulouse, 102–113.
- Oksri-Nelfia, L. (2015). Incorporation de fines issues de granulats recyclés dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques. Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle, 253p.
- Omary S., Wardeh G., Ghorbel E. (2015). Influence de l'incorporation des granulats recyclés de démolition sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons fluides. 33èmes rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 10p.
- Sedran, T. (1999). Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 220p.
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179–186.
- Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Courard, L. (2015). Une nouvelle méthode de caractérisation des granulats recyclés industriels: application aux mortiers. 2e édition de la conférence Internationale Francophone : Nouveaux Matériaux et Durabilité, Douai.

MERCI À NOS PRÉCIEUX COMMANDITAIRES



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil
et de génie des eaux



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton

Québec 



LA référence



Association
Canadienne
du Ciment



QUEBEC &
E. ONTARIO



www.bm-underground.com



Ciment Québec



EUCLID CANADA



INTERNATIONAL
CONCRETE REPAIR
INSTITUTE

SECTION
du Québec



LAFARGE