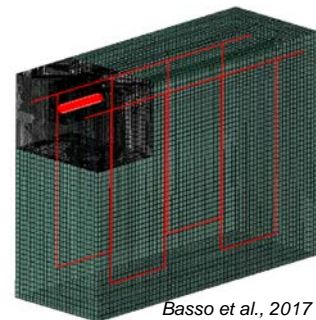
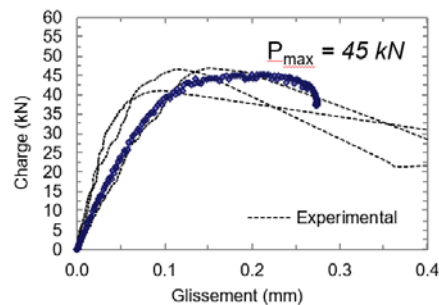


## Actes de la 18<sup>e</sup> édition des Journées Scientifiques

**(RF)<sup>2</sup>B** 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<sup>A,B</sup>, C. Colman<sup>A,B</sup>, E. Robinet<sup>A</sup>, Z. Zhao<sup>A</sup>, F. Michel<sup>A</sup>, L. Courard<sup>A</sup>, S. Remond<sup>B</sup>, D. Bulteel<sup>B</sup>

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<sup>A</sup>, P. Rossi<sup>A</sup>, J-L. Tailhan<sup>A</sup>

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<sup>A</sup>, H. Carré<sup>A</sup>

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<sup>A</sup>, E. Ghorbel<sup>B</sup>, A. Lecomte<sup>A</sup>, O. Safiuallah<sup>B</sup>, Z. Ben Aouda<sup>A</sup>, G. Wardeh<sup>B</sup>

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<sup>A</sup>, R. Gagné<sup>A</sup>

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

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

H. Cagnon<sup>A</sup>, V.N. Nguyen<sup>B</sup>, T. Vidal<sup>A</sup>, J.M. Torrenti<sup>B</sup>, A. Sellier<sup>A</sup>

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<sup>A</sup>, J. Duchesne<sup>A</sup>, A. Rodrigues<sup>B</sup>

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<sup>A</sup>, M. Jolin<sup>A</sup>, B. Massicotte<sup>B</sup>, B. Bissonnette<sup>A</sup>

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 ENDOMMAGEES PAR  
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE  
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon<sup>A</sup>, A. Sellier<sup>A</sup>

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<sup>A</sup>, C. Desmettre<sup>A</sup>, J.-P. Charron<sup>A</sup>

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<sup>A</sup>, J.-P. Charron<sup>B</sup>

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)<sup>2</sup>B 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<sup>e</sup> édition des Journées scientifiques  
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

Université Laval, Québec, Canada  
6 et 7 juillet 2017

## PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS ET DOSAGES

R. Trauchessec<sup>A</sup>, E. Ghorbel<sup>B</sup>, A. Lecomte<sup>A</sup>, O. Safiullah<sup>B</sup>, Z. Ben Aouda<sup>A</sup>, G. Wardeh<sup>B</sup>

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

**RÉSUMÉ** : L'utilisation de pré-mélanges contenant une faible proportion ( $\leq 10\%$ ) de sables de bétons recyclés avec du sable naturel permettrait de valoriser rationnellement ces matériaux, sans perturber *a priori* les propriétés de nouveaux bétons. Cette étude, réalisée dans le cadre du Projet National français Recybéton, a pour objectif : (i) d'étudier les performances de mortiers contenant 10% de sables recyclés issus de diverses plateformes ; (ii) d'évaluer la faisabilité d'un contrôle sur site du pourcentage de sable recyclé incorporé. Comparativement à un témoin, l'étude des propriétés de mortiers aux états frais, durcissant et durci montre que 10% de sables de bétons recyclés ont un impact relativement limité, quelle que soit la provenance du produit. Les dosages effectués sur des mélanges contenant diverses sources de sables recyclés et de sables naturels ont mis en avant la difficulté du contrôle de la proportion du sable recyclé. Un dosage basé sur la mesure des sulfates solubles dans l'eau constitue cependant la méthode la plus précise.

### 1. INTRODUCTION

Contrairement au sable naturel (SN), les granulats de bétons recyclés, et plus particulièrement les sables de bétons recyclés (SBR), contiennent de la pâte de ciment durcie qui augmente la porosité et l'absorption d'eau de ces matériaux (De Juan et Gutierrez, 2009). Leur présence importante dans le squelette granulaire d'un nouveau béton perturbe alors les propriétés rhéologiques à l'état frais et altère les propriétés à l'état durci (résistance, élasticité, retrait, etc.). L'impact du sable recyclé semble toutefois limité si la proportion employée reste faible (Evangelista et De Brito, 2007 et 2014, Zhao *et al.*, 2015). L'utilisation de mélanges raisonnés de sables recyclés et de sables naturels apparaît alors être une voie alternative prometteuse pour valoriser la fraction fine des granulats de bétons recyclés. Il importe cependant de connaître précisément l'effet, selon la plateforme d'origine, d'une faible proportion de SBR (10%) sur les performances des matériaux cimentaires. À cet égard, dans la première partie de cet article, les propriétés à l'état frais, durcissant et durci de mortiers contenant 90% d'un sable naturel et 10% de sables recyclés issus de 6 plateformes différentes sont comparées.

Il faut également disposer d'une méthode de vérification de la proportion réelle de SBR dans un sable recomposé (pré-mélange), y compris à faible teneur, afin de permettre aux divers acteurs d'effectuer leur suivi de production ou leur contrôle de réception. Ce contrôle doit aussi pouvoir se faire rapidement sur site, sans investissements conséquents (cyclone, etc.) ni utilisation de produits dangereux (liqueurs denses, etc.). Enfin, pour être pertinent, le dosage doit atteindre une précision d'au moins 2% dans des pré-

mélanges contenant jusqu'à 10% de sable recyclé. La séparation physique des grains recyclés et des grains naturels, par différence optique ou de densité, semble être *a priori* la solution la plus triviale. Cependant, elle est apparue inapplicable car le sable recyclé : i) contient une proportion non négligeable de grains naturels non recouverts ou partiellement recouverts de pâte de ciment ; ii) présente des colorations diverses, parfois proches de celles du sable naturel ; iii) présente une granulométrie variable en amplitude et en étendue. Dans la seconde partie de cet article, d'autres méthodes de dosage ont alors été envisagées. Elles sont basées sur les essais traditionnels de caractérisation des granulats, en retenant ceux pour lesquels les propriétés entre sables naturels et recyclés sont les plus contrastées (absorption d'eau, sulfates solubles). Pour ces essais, des sables naturels provenant de 4 carrières et des sables recyclés provenant de 3 plateformes ont été utilisés.

## 2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

### 2.1 Propriétés des sables de l'étude

Les tableaux 1 et 2 décrivent respectivement les propriétés des 9 sables recyclés (SBR) et des 5 sables naturels (SN). En raison de la présence de la pâte de ciment durcie, les sables recyclés ont une masse volumique plus faible que les sables naturels (2,1 à 2,5 contre 2,5 à 2,7 g/cm<sup>3</sup>) et une absorption plus élevée (4,5 à 8,6% contre 0,8 à 2,3%). Ce panel de matériaux d'origines et de propriétés différentes (module de finesse, sulfate soluble, taux de fines) constitue un échantillon représentatif devant permettre de statuer, avec une bonne représentativité statistique, à la fois sur les performances de mortiers contenant ces sables et sur la ou les méthodes de dosage des pré-mélanges les mieux adaptées.

Tableau 1. Propriétés des sables recyclés.

	Sables de bétons recyclés (SBR)								
	SBR <sub>1</sub>	SBR <sub>2</sub>	SBR <sub>3</sub>	SBR <sub>4</sub>	SBR <sub>5</sub>	SBR <sub>6</sub>	SBR <sub>7</sub>	SBR <sub>8</sub>	SBR <sub>9</sub>
Coupure	0/4	0/5	0/4	0/6,3	0/6,3	0/6,3	0/4	0/4	0/4
Fines (%)	0,5	1,2	0,6	0,9	0,9	0,6	0,6	1,2	1,4
MF	3,46	3,73	3,41	3,98	3,87	3,38	3,24	3,86	3,55
pr (g/cm <sup>3</sup> )	2,22	2,16	2,56	2,37	2,21	2,16	2,10	2,16	2,25
WA <sub>24</sub> (%)	7,32	9,86	4,67	8,08	8,03	5,53	8,59	8,12	6,27
Tso <sub>4</sub> (%)	/	/	/	/	/	/	0,196	0,220	0,088

Tableau 2. Propriétés des sables naturels.

	Sables naturels (SN)				
	SN1	SN2	SN3	SN4	SN5
Coupure	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4
Fines (%)	0,4	6,7	1,4	0,2	11,3
MF	2,42	3,03	3,92	2,97	3,13
pr (g/cm <sup>3</sup> )	2,67	2,59	2,51	2,55	2,55
WA <sub>24</sub> (%)	0,89	1,04	2,29	0,99	1,03
Tso <sub>4</sub> (%)	/	< 0,003	0,028	< 0,003	0,028

### 2.2 Essais sur mortiers

Ici, le sable naturel SN<sub>1</sub> a servi de sable de référence (témoin). Il a été mélangé aux sables recyclés SBR<sub>1,2,3,4,5</sub> ou 6, à raison de 10% volumique. La méthode MBE (Mortier Béton Équivalent) a servi à formuler le mortier témoin (tableau 3), sur la base de la formulation d'un béton de référence utilisé dans le Programme National Recybéton. Pour les mortiers incorporant les SBR, la quantité d'adjuvant a été ajustée pour obtenir le même étalement que celui du mortier de référence. Les granulats ont été préalablement humidifiés à une teneur en eau supérieure à l'absorption. Ils ont été introduits dans le malaxeur à l'état pré-saturé (à teneur en eau supérieure de 1% à celle de l'état de saturation). Au moment de la fabrication, leur teneur en eau réelle a été prise en compte dans le calcul de l'eau de gâchage.

Tableau 3. Formulation (kg/m<sup>3</sup>) des MBE (mortier béton équivalent).

Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Béton de référence	Mortier béton équivalent						
		SN <sub>1</sub>	SBR <sub>1</sub>	SBR <sub>2</sub>	SBR <sub>3</sub>	SBR <sub>4</sub>	SBR <sub>5</sub>	SBR <sub>6</sub>
Gravillon recyclé	1074	0						
Sable Recyclé		0	112	109	132	112	113	109
Sable Naturel	771	1300	1170					
Filler - Betocarb HP-OG	58	93						
CEM II/A-L 42,5 N	299	482						
Eau efficace	185	298						
Superplastifiant MC PowerFlow 3140	2	3,2						

Pour chaque mélange à l'état frais, les mesures de l'air occlus et de la masse volumique ont été réalisées avec un aéromètre de 1L (moyenne de trois essais). Le temps de prise a été mesuré à l'aiguille de Vicat (norme NF P 15-431), et la chaleur d'hydratation avec un calorimètre semi-adiabatique, conformément à la norme NF EN 196-9. Les résistances à la flexion et à la compression (NF EN 196-1), à 3, 7, 14, 21 et 28 jours ont été déterminées respectivement sur 3 éprouvettes 4x4x16cm et sur 6 demi-éprouvettes 4x4x8cm. La porosité accessible à l'eau et la masse volumique réelle ont été déterminées à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques spécifiques (Ø5 x 10 cm) par la méthode dite « sous vide », selon le mode opératoire décrit dans la norme NF P 18-459.

### 2.3 Dosage du sable recyclé

Le dosage du sable recyclé dans un pré-mélange a été effectué en caractérisant une propriété particulière (notée  $P_{\text{mélange}}$ ) sur des mélanges contenant 2,5%, 5%, 7,5% et 10% du SBR<sub>7</sub>, et le complément de sables naturels SN<sub>2</sub>, SN<sub>3</sub>, SN<sub>4</sub> ou SN<sub>5</sub>, soit 16 mélanges au total. Des essais ont également été réalisés avec ces 4 sables naturels et les sables recyclés SBR<sub>8</sub> et SBR<sub>9</sub> dosés à 7,5% (8 mélanges). La valeur mesurée sur ces mélanges dépend directement de la propriété considérée sur chacun des sables ( $P_{\text{SN}}$  et  $P_{\text{SBR}}$ ) et des proportions respectives dans le mélange (%SN et %SBR). La proportion de sable recyclé est alors calculée en supposant l'additivité de la propriété considérée caractérisant le sable naturel et le sable recyclé (équation 1) :

$$P_{\text{mélange}} = P_{\text{SBR}} \times \% \text{SBR} + P_{\text{SN}} \times \% \text{SN} \quad (\text{Équation 1})$$

Or, comme le mélange n'est formé que du sable naturel et du sable recyclé, on peut déduire directement la proportion de sable recyclé dans la mesure où la valeur de la propriété considérée est mesurée sur le sable naturel, sur le sable recyclé et sur leur mélange (équation 2).

$$\% \text{SBR} = \frac{P_{\text{mélange}} - P_{\text{SN}}}{P_{\text{SBR}} - P_{\text{SN}}} \quad (\text{Équation 2})$$

Le dosage étant basé sur trois valeurs expérimentales (équation 2), il convient de sélectionner la propriété à étudier pour obtenir le dosage le plus précis possible. Lors du dosage, l'incertitude absolue sur le pourcentage de sable recyclé ( $\Delta \% \text{SBR}$ ) dépend de la valeur de la propriété mesurée ( $P_{\text{mélange}}$ ,  $P_{\text{SN}}$  et  $P_{\text{SBR}}$ ) et de l'incertitude associée à sa mesure ( $\Delta P_{\text{mélange}}$ ,  $\Delta P_{\text{SN}}$  et  $\Delta P_{\text{SBR}}$ ). L'incertitude sur le dosage peut être calculée à partir de l'équation 2, en sommant les dérivées partielles (équation 3).

$$\Delta \% \text{SBR} = \left| \frac{1}{P_{\text{SBR}} - P_{\text{SN}}} \right| \times \Delta P_{\text{mélange}} + \left| \frac{P_{\text{mélange}} - P_{\text{SBR}}}{(P_{\text{SBR}} - P_{\text{SN}})^2} \right| \times \Delta P_{\text{SN}} + \left| \frac{P_{\text{SN}} - P_{\text{mélange}}}{(P_{\text{SBR}} - P_{\text{SN}})^2} \right| \times \Delta P_{\text{SBR}} \quad (\text{Équation 3})$$

L'équation 3 montre clairement que la précision du dosage dépend directement de l'incertitude de chaque essai ( $\Delta P_{\text{mélange}}$ ,  $\Delta P_{\text{SN}}$ ,  $\Delta P_{\text{SBR}}$ ) mais également de l'amplitude de la différence entre les propriétés du sable recyclé et naturel ( $P_{\text{SBR}} - P_{\text{SN}}$ ). Par conséquent, on en déduit qu'il faut considérer des propriétés particulièrement contrastées (entre les deux sables), mesurées avec la plus faible incertitude.

L'application (non présentée ici) de ces principes aux propriétés des sables étudiés (tableaux 1 et 2) a conduit à retenir la mesure de l'absorption d'eau (NF EN 1097-6) et de la teneur en sulfate soluble dans l'eau (NF EN 1744-1+A1) comme méthodes de dosage potentiellement pertinentes. Les sulfates solubles sont inhérents aux granulats de béton recyclés (associés à l'ancienne matrice cimentaire, voire aussi issus des plâtres de déconstruction), alors qu'ils sont, sauf exception, quasi-absents de granulats naturels. Cette propriété présente alors un fort contraste entre les deux sources de matériaux, ce qui constitue un critère de choix pour effectuer un dosage précis (équation 3). À noter cependant que, pour les sables naturels et les mélanges, compte tenu de leur faible teneur en sulfates solubles, il est nécessaire de réduire la quantité d'eau de l'essai (0,5L et non 1L) et d'augmenter la prise d'essai (300g et non 25g) pour atteindre une concentration en sulfate détectable par le spectrophotomètre (20-200mg/L). La mesure d'absorption d'eau (WA<sub>24</sub>) a été effectuée sur une fraction granulaire réduite (0,63/D) et non sur le spectre complet du sable (0/D). Le dosage du sable recyclé obtenu ne concerne alors que la fraction granulaire testée (%SBR<sub>0,63/D</sub>). Ce pourcentage doit être alors corrigé (équation 4) en tenant compte de la proportion de grain supérieure à 63µm dans les sables naturels (%SN<sub>0,63/D | 0/D</sub>) et recyclés (%SBR<sub>0,63/D | 0/D</sub>).

$$\% SBR_{mélange} = \frac{\% SBR_{0,63/D} \times \% SN_{0,63/D | 0/D}}{\% SBR_{0,63/D} (\% SN_{0,63/D | 0/D} - \% SBR_{0,63/D | 0/D}) + \% SBR_{0,63/D | 0/D}} \quad (\text{Équation 4})$$

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1 Propriétés des mortiers

Afin de comparer le maintien de la maniabilité dans le temps des mortiers, le dosage en superplastifiant a été ajusté pour obtenir, à la sortie du malaxeur, pour tous les mélanges, un étalement initial du mini-cône de 35 cm (affaissement total). On constate, figure 1, que la perte d'étalement est un peu plus conséquente au cours du temps pour les mortiers contenant 10% de SBR.

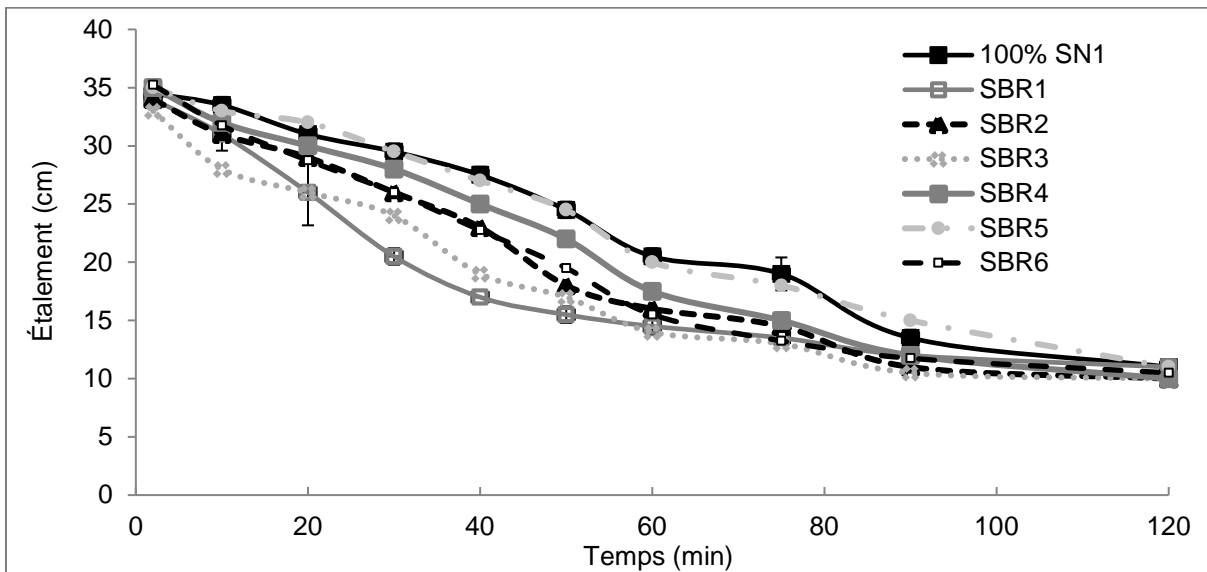


Figure 1. Évolution de l'étalement des mortiers.

Les autres propriétés des mortiers frais et durcissant sont présentées dans le tableau 4. La masse volumique des mortiers contenant les SBR est inférieure de 12 à 55kg/m<sup>3</sup> à celle du mortier témoin (100% de sable naturel). Cette variation est liée à la plus faible masse volumique des SBR et à l'augmentation de l'air occlus (Gomart, *et al.*, 2013). L'incorporation de 10% des différents sables recyclés n'a pas d'influence réelle sur le temps de début de prise, ni sur la chaleur d'hydratation et la température maximale.

Tableau 4. Propriétés des différents mortiers à l'état frais et durcissant.

	100%	90% SN <sub>1</sub> + 10% SBR						Moyenne	Écart-type
	SN <sub>1</sub>	SBR <sub>1</sub>	SBR <sub>2</sub>	SBR <sub>3</sub>	SBR <sub>4</sub>	SBR <sub>5</sub>	SBR <sub>6</sub>		
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2210	2190	2155	2190	2165	2160	2198	2176	18
Air occlus (L/m <sup>3</sup> )	15,3	16,2	22,5	23,9	26,9	18,7	19,8	22	4
Début de prise (min)	252	250	257	265	265	270	260	261	7
Fin de prise (min)	310	280	300	310	310	310	310	303	12
Durée de prise	58	30	43	45	45	40	50	42	7
T max (°C)	49	50	48	52	52	49	48	50	2
Q (J/g)	304	302	297	314	315	302	316	308	8

Après durcissement, les mortiers contenant 10% de SBR présentent en général une résistance à la flexion plus faible que le témoin (figure 2) ; à 28 jours, la perte de résistance se situe entre 3% et 8%. La résistance à la compression diminue également (figure 3) ; à 28 jours, la baisse est comprise entre 4 et 16%. Inversement, la porosité accessible à l'eau augmente (de 0,5 % en moyenne) lorsque 10% de sable naturel est substitué par un SBR (tableau 5). Cette variation s'accompagne logiquement d'une baisse de la masse volumique réelle des mortiers (9 kg/m<sup>3</sup> en moyenne).

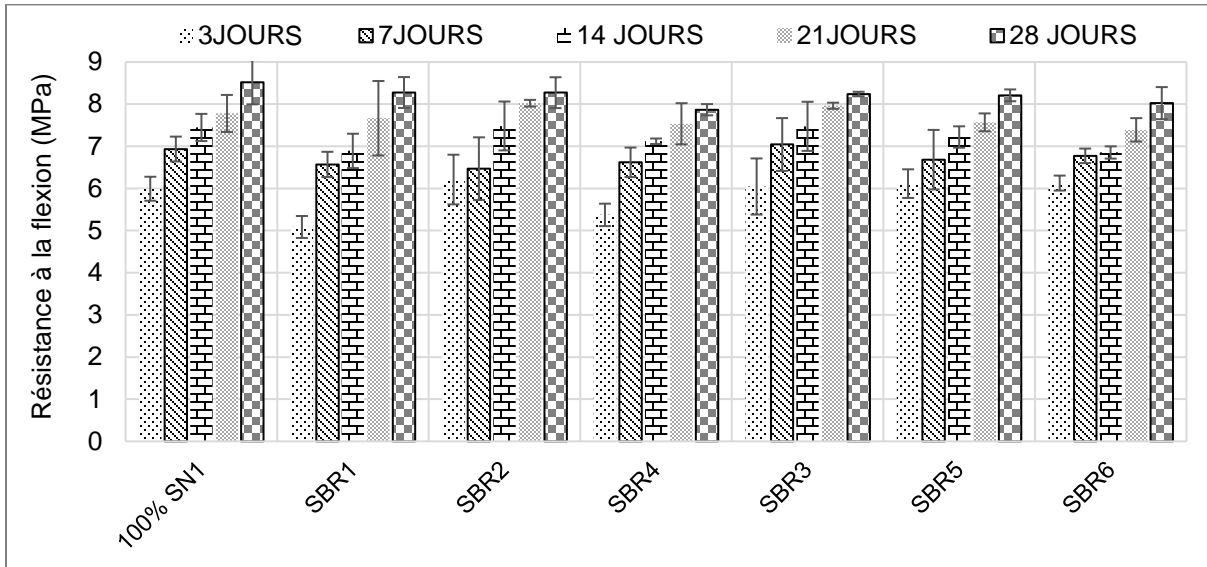


Figure 2. Comparaison de la résistance à la flexion des différents mortiers.

Tableau 5. Porosité accessible à l'eau (%) et masse volumique (g/cm<sup>3</sup>) des mortiers à 28 jours.

	100%	90% SN + 10 %SBR						Moyenne	Écart-type
	SN <sub>1</sub>	SBR <sub>1</sub>	SBR <sub>2</sub>	SBR <sub>3</sub>	SBR <sub>4</sub>	SBR <sub>5</sub>	SBR <sub>6</sub>		
Porosité à l'eau (%)	19,3	19,7	19,5	19,3	20,3	19,7	19,9	19,7	0,4
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2039	2024	2028	2031	2030	2053	2035	2034	10

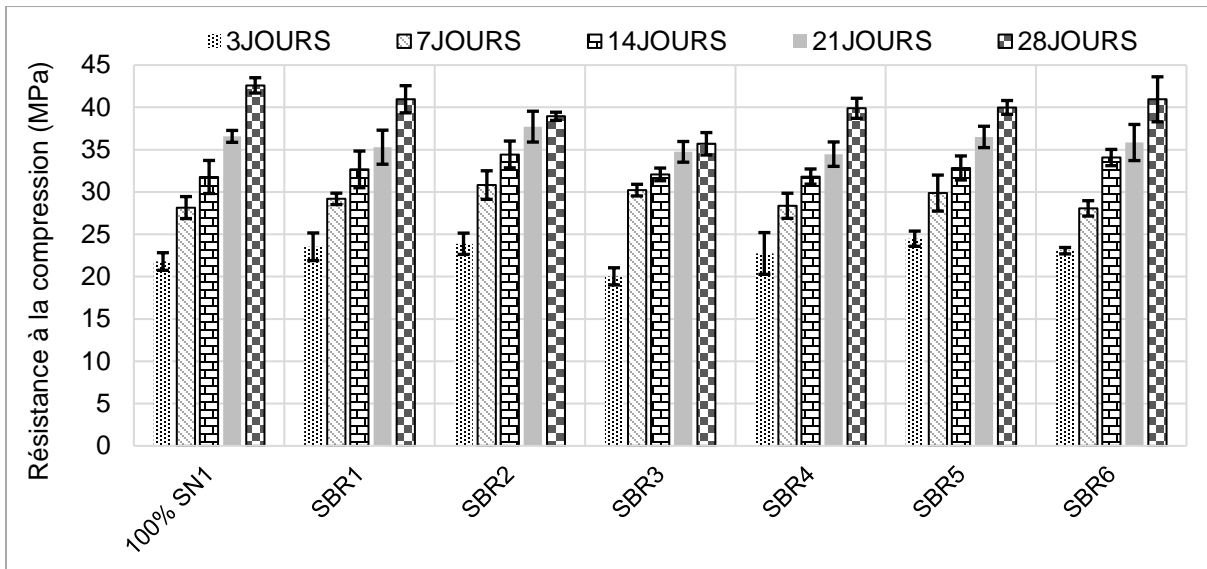


Figure 3. Comparaison de la résistance à la compression des différents mortiers.

### 3.2 Dosage

La figure 4 présente le pourcentage de sable recyclé calculé (équation 2) à partir de l'absorption d'eau  $WA_{24}$  (%) des sables SN<sub>1,2,3</sub> et 4 et SBR<sub>7</sub> (tableaux 1 et 2) et de la mesure effectuée sur les mélanges des quatre sables naturels avec 2,5%, 5%, 7,5% et 10% de sable recyclé SBR<sub>7</sub>. La figure 5 présente les résultats des dosages pour les mélanges contenant 7,5% de sable recyclé (SBR<sub>7,8</sub> et 9) avec les quatre sables naturels. En moyenne, la différence entre le pourcentage réel de SBR dans le mélange et le pourcentage déterminé par mesure de l'absorption d'eau est de 3%. Mais cet écart peut atteindre 6%.

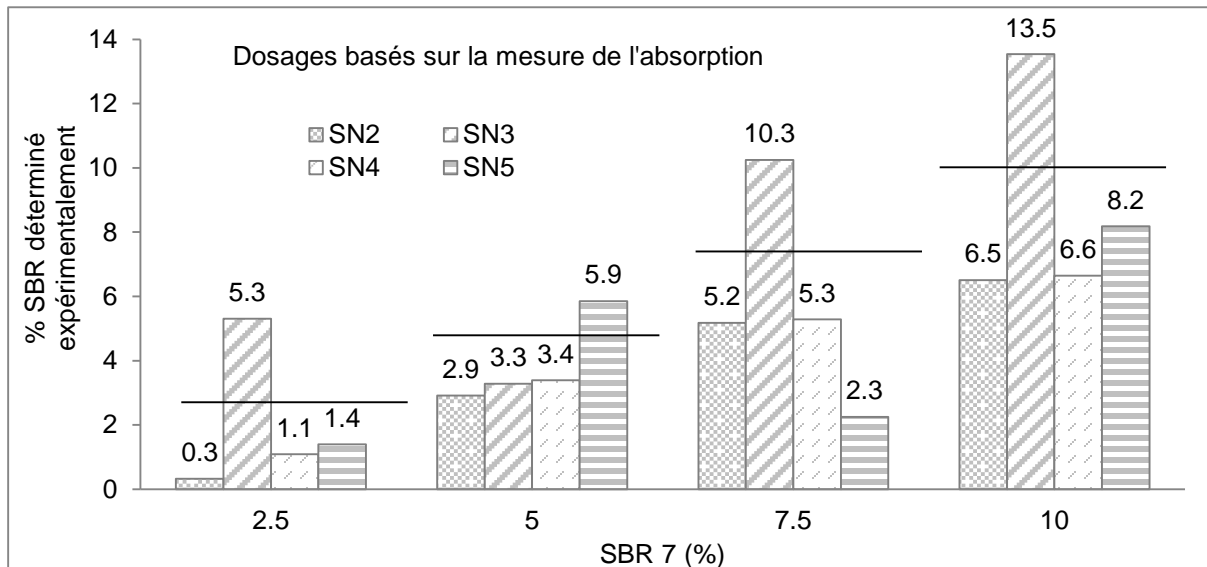


Figure 4. Dosage par la mesure de l'absorption pour quatre sables naturels (SN<sub>2,3,4</sub> ou 5) et différentes proportions de sable recyclé (SBR<sub>7</sub>).



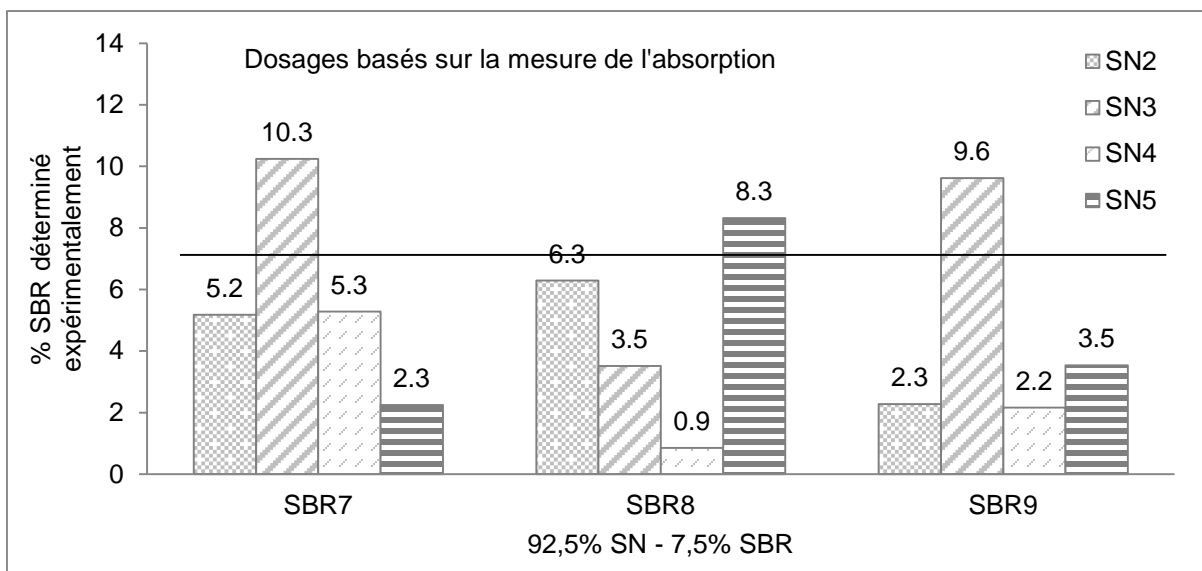


Figure 5. Dosage par la mesure de l'absorption des mélanges à 7,5% pour quatre sables naturels (SN<sub>2, 3, 4</sub> et 5) et les différents sables recyclés (SBR<sub>7, 8</sub> et 9).

Pour un même mélange (7,5% SBR<sub>7</sub> - 92,5% SN<sub>2</sub>), le dosage a été réalisé cinq fois. Le tableau 6 présente le résultat de ces essais et montre qu'un faible écart (0,5%) sur la mesure de l'absorption d'eau (2,4 - 2,9%) modifie fortement le pourcentage calculé de sable recyclé (2,6% - 10,3%). On notera cependant que la réalisation de cinq essais permet d'obtenir une moyenne (6,5% de SBR) proche de la valeur réelle (7,5% de SBR). La réalisation de plusieurs mesures sur un mélange permettrait d'effectuer un dosage plus précis, mais nécessite un temps d'essais plus long. Il est souhaitable aussi que l'absorption d'eau du sable recyclé et du sable naturel soit mesurée avec la plus grande précision possible (plusieurs essais).

Tableau 6. Répétabilité du dosage basé sur l'absorption.

	Absorption 97,5% SN <sub>1</sub> – 7,5 % SBR <sub>7</sub>					Moyenne
WA <sub>24</sub> (%) mesuré	2,94	2,76	2,47	2,81	2,55	2,7
% SBR calculé	10,3	7,4	2,6	8,3	4,0	6,5

Les dosages effectués à partir de la teneur de sulfate soluble dans l'eau dans les sables naturels, recyclés et le mélange sont particulièrement précis pour toutes les proportions (2,5%, 5%, 7,5% et 10%, figure 6). Pour les mélanges contenant 7,5% de chacun des trois SBR, l'erreur est également inférieure à 2% (figure 7). Sur les 24 essais, la différence entre la valeur réelle et celle obtenue lors du dosage est en moyenne de 1,0% (avec un écart-type de 0,4% et une erreur maximale de 1,9%). Cette méthode de dosage est non seulement rapide (moins d'une heure par essai), mais elle est aussi la plus précise. Ce résultat provient notamment du fort contraste entre la quantité de sulfate soluble dans le granulat naturel et dans le granulat recyclé. La réalisation de 7 essais sur le même mélange confirme la fiabilité de cette technique (tableau 7).

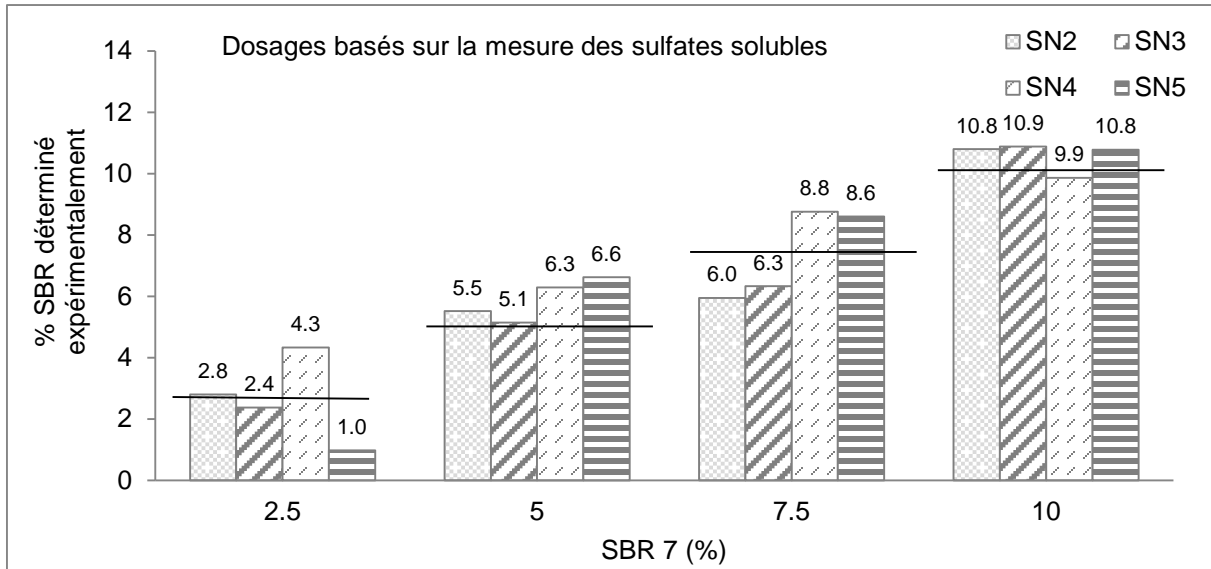


Figure 6. Dosage par la méthode des sulfates solubles dans l'eau pour quatre sables naturels (SN<sub>2, 3, 4</sub> ou <sub>5</sub>) et différentes proportions (2,5 à 10%) de sable recyclé (SBR<sub>7</sub>).

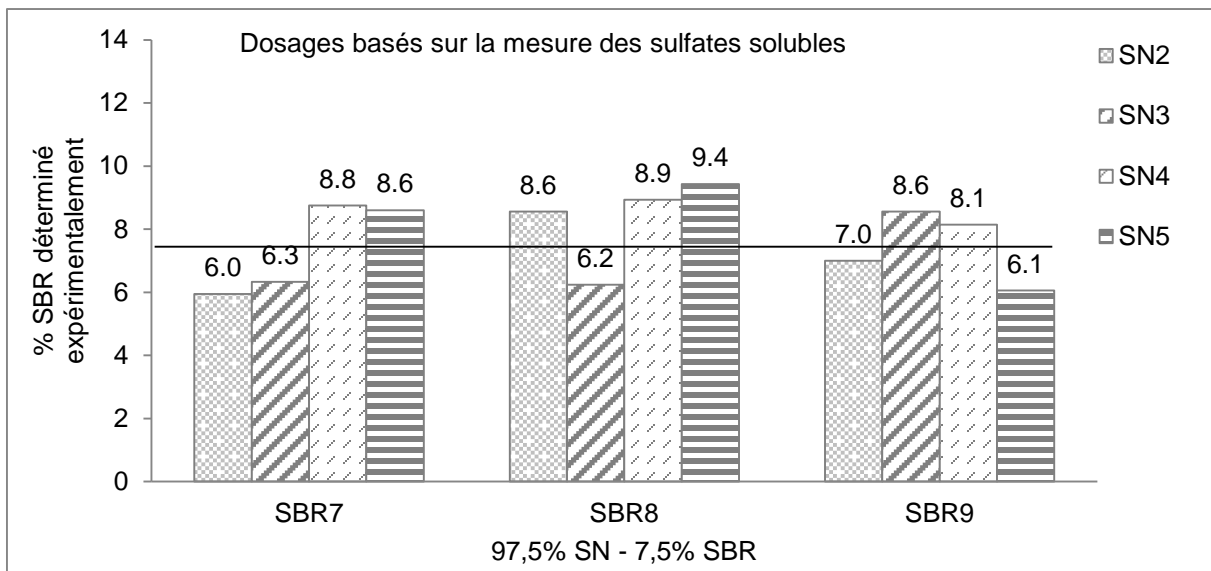


Figure 7. Dosage par la mesure des sulfates solubles dans l'eau des mélanges à 7,5% pour quatre sables naturels (SN<sub>2, 3, 4</sub> et <sub>5</sub>) et les différents sables recyclés (SBR<sub>7, 8</sub> et <sub>9</sub>).

Tableau 7. Répétabilité de la mesure des sulfates soluble dans l'eau.

Essais	1	2	3	4	5	6	7	Moyenne
T <sub>so4</sub> mesurée (mg/l)	94	85	76	95	91	93	70	86
T <sub>so4</sub> (%)	0,016	0,014	0,013	0,016	0,015	0,016	0,012	0,014
% SBR calculé	8,0	7,2	6,5	8,1	7,7	7,9	6,0	7,3

Cette méthode est donc la plus pertinente à ce stade. Elle nécessite cependant l'achat d'un spectrophotomètre, dont le prix reste toutefois modéré ( $\approx$  1200 euros). Elle nécessite aussi de connaître ou de mesurer la teneur en sulfate soluble de chacun des sables constituant le mélange. Notons néanmoins que ce paramètre est très probablement contrôlé régulièrement sur des sables recyclés, en raison des risques de réactions sulfatiques internes.

#### 4. CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent que la présence de 10% de sable recyclé issu de diverses plateformes augmente la quantité d'air occlus à l'état frais (de 2 à 11 L/m<sup>3</sup>) et induit une diminution de l'étalement à 1 heure (jusqu'à 6cm). Les propriétés mécaniques sont modérément affectées à 28 jours, la réduction étant comprise entre 3 et 8% pour la flexion et entre 4 et 16% pour la compression tandis que la porosité augmente légèrement (de 0 à 5%). Le sable recyclé n'affecte pas significativement l'hydratation du ciment dans le mortier. En effet, le temps de début de prise et la chaleur d'hydratation ne sont que très légèrement modifiés. Cette étude montre donc que la présence de 10% de sable recyclé, quelle qu'en soit l'origine, affecte peu les performances. Elle doit cependant être complétée par une étude de la durabilité des bétons contenant ce type de pré-mélange.

Cette étude montre également, sur des mélanges réalisés avec trois sables recyclés et quatre sables naturels, que l'absorption d'eau et la proportion de sulfate soluble dans l'eau sont les propriétés les plus impactées par la présence du sable recyclé. Le dosage du sable recyclé dans le mélange, en lien avec ces variations, n'est cependant pas aisé. En effet, même si les variations induites sont importantes (valeurs doublées), le dosage repose obligatoirement sur les propriétés mesurées sur le mélange, mais également sur celles mesurées sur le sable recyclé et le sable naturel. Le dosage par mesure des sulfates solubles dans l'eau apparaît être la méthode la plus efficace (erreur lors du dosage inférieure à 2%). Les essais ayant été tous réalisés dans le même laboratoire, des essais inter laboratoires seraient aussi nécessaires pour confirmer l'intérêt de cette méthode. Au-delà du pourcentage exact de sable recyclé, la limitation des propriétés physico-chimiques du mélange (absorption, sulfate soluble, impuretés), au regard des spécifications requises par l'usage, permettrait également de s'assurer de la qualité du mélange.

#### 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Projet National RECYBETON qui a financé cette étude.

#### 6. RÉFÉRENCES

- AFNOR NF P15-431 (1994). Liants hydrauliques - Technique des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal.
- AFNOR, NF EN 1744-1+A1 (2010). Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : Analyse chimique.
- AFNOR, NF EN 196-9 (2010). Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique.
- AFNOR, NF P 18-459 (2010). Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique.
- AFNOR, NF EN 1097-6 (2014). 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.
- AFNOR, NF EN 196-1 (2016). Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances.
- De Juan, M.S., Gutierrez P.A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872-877.
- Evangelista, L. et De Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and concrete composites*, 29, 397-401.
- Evangelista, L. et De Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2), 129-172.
- Gomart, H., Ghorbel, E. et Wardeh, G. (2013). Étude de l'ouvrabilité et des propriétés mécaniques de mortiers à base de sable recyclé. *31<sup>e</sup> rencontres AUGC*, Cachan, 29-31 mai.
- 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.

# 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



**LAFARGE**



INTERNATIONAL  
CONCRETE REPAIR  
INSTITUTE

SECTION  
Québec