



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 2 Fissuration des parties d'ouvrage en béton recyclé liée à la dessiccation

Auteurs :

A. BENDIMERAD - E. ROZIERE - A. LOUKILI (EC Nantes)
P. GEGOUT - F. BARBERON (BOUYGUES TP)

R/16/RECY/030
LC/13/RECY/36-37 et LC/14/RECY/52
Février 2016

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Fissuration des parties d'ouvrage en béton recyclé liée à la dessiccation

RAPPORT N° : R/16/RECY/030

DATE D'ÉTABLISSEMENT : Février 2016

AUTEUR(S) : A. BENDIMERAD - E. ROZIERE - A. LOUKILI - P. GEGOUT - F. BARBERON

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : EC Nantes – BOUYGUES TP

THEME DE RATTACHEMENT : 2

LETTRE DE COMMANDE : LC/13/RECY/36-37 et LC/14/RECY/52

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

Résumé

L'objectif de ce rapport est d'évaluer et de comprendre l'influence du taux de saturation initial des granulats recyclés et de leur taux de substitution sur le comportement différé et la sensibilité à la fissuration des bétons recyclés exposés à la dessiccation.

L'étude a été réalisée sur des mortiers et deux classes de béton C25 et C35 avec différents taux de substitution des graviers recyclés (GR) 0%, 30% et 100% et un seul taux de substitution des sables recyclés (SR) 30%. L'effet de la saturation en eau initiale a été étudié sur les mortiers et les bétons à 100% GR pour les deux classes.

L'étude a été divisée en deux axes. Le premier traite de l'effet du sable recyclé seul sur le comportement des mortiers. Le second porte essentiellement sur le comportement différé du béton recyclé. L'étude du béton durci a pour objectif la quantification de la sensibilité à la fissuration des ouvrages exposés à la dessiccation en prenant en compte l'ensemble des paramètres du matériau. Pour cela nous analysons indépendamment les paramètres influençant la fissuration (résistance, module et retrait) puis nous utilisons ces données pour extraire des essais de retrait empêché à l'anneau les propriétés viscoélastiques du béton afin de comprendre leur influence sur le risque de fissuration. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence déterminante de la relaxation déterminée par le calcul viscoélastique.

Abstract

The aim of this report is to evaluate and understand the effect of the initial water saturation of recycled aggregates and their substitution rate on the delayed behavior and shrinkage-induced cracking of recycled aggregates concrete exposed to drying.

The study has been carried out on mortars and two series of concrete of strength classes C25 and C35 with different substitution rates of recycled gravel (RG) 0%, 30% and 100% and one substitution rate of recycled sand (RS) 30%. The effect of initial water saturation has been studied only on mortars at 100% RS and concretes at 100% RG for both classes.

The study was divided into two parts. The first one deals with the effect of recycled sand on the behavior of mortars. The second relates to the delayed behavior of recycled aggregates concrete. The study of hardened concrete mainly consists in the quantification of cracking sensitivity of concrete structures exposed to desiccation, taking into account all of the properties of the material. On the one hand the parameters influencing the cracking risk (strength, modulus and shrinkage) were analyzed separately and on the other hand these data were combined to extract the viscoelastic properties of the concrete in order to understand their influence on the cracking sensitivity. The results highlight the key effect of relaxation, which has been evaluated by viscoelastic calculations.

Table des matières

Résumé	- 2 -
Abstract	- 2 -
Table des matières	- 3 -
Introduction	- 4 -
1. Formulation des mortiers et des bétons	- 5 -
1.1. REPARTITION DES ESSAIS ENTRE LES DEUX LABORATOIRES (GEM – BYTP)	- 5 -
1.1.1. MORTIERS	- 5 -
1.1.2. BETONS	- 5 -
1.2. FABRICATION DES MORTIERS	- 6 -
1.3. FABRICATION DES BETONS	- 7 -
2. Procédures et analyse des données expérimentales	- 7 -
2.1. ESSAIS	- 7 -
2.1.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION	- 7 -
2.1.2. DETERMINATION DU MODULE EDYN PAR LES METHODES NON DESTRUCTIVES	- 7 -
2.1.3. RETRAIT DES MORTIERS ET BETONS DURCIS	- 8 -
2.1.4. ESSAI A L'ANNEAU	- 10 -
2.2. ANALYSE DES DONNEES DE RETRAIT	- 11 -
2.3. APPROCHE VISCOELASTIQUE	- 13 -
2.4. CORRELATIONS DES RESULTATS OBTENUS DANS LES DEUX LABORATOIRES	- 14 -
2.4.1. RESISTANCE EN COMPRESSION DES MORTIERS COMMUNS	- 14 -
2.4.2. RETRAIT TOTAL DES MORTIERS COMMUNS SUR DES EPROUVETTES 2x2x16 cm ³	- 15 -
2.4.3. POROSIMETRIE A MERCURE : MORTIER DE REFERENCE	- 15 -
2.4.4. RESISTANCE EN COMPRESSION DES BETONS COMMUNS	- 16 -
2.4.5. SUIVI DU MODULE E _{DYN} DES BETONS COMMUNS	- 16 -
2.4.6. RETRAIT TOTAL DES BETONS COMMUNS SUR DES EPROUVETTES 7x7x28 cm ³	- 17 -
2.4.7. ESSAI DE REPETABILITE DE L'ANNEAU	- 17 -
2.5. INFLUENCE DE L'ETAT DE SATURATION DU SABLE : ETUDE SUR MORTIER	- 19 -
2.5.1. ESSAIS MECANIQUES ET CARACTERISATION DE LA MICROSTRUCTURE	- 19 -
2.5.2. MICROSTRUCTURE	- 21 -
2.6. INFLUENCE DE LA CURE : ETUDE SUR MORTIER	- 28 -
2.7.1. ESSAIS MECANIQUES ET PHYSIQUES	- 29 -
2.7.2. LA SENSIBILITE A A FISSURATION (ESSAI A L'ANNEAU)	- 34 -
Conclusions	- 40 -
Références	- 42 -

Introduction

L'étude présentée dans ce rapport s'inscrit dans le thème 2 « Matériaux et structures » du Projet National (PN) RECYBETON. Elle constitue une réponse au sujet 7 « Fissuration des parties d'ouvrage en béton recyclé liée à la dessiccation », et vise à étayer la position du PN sur l'impact de l'incorporation des granulats recyclés sur ce risque, et en cas d'aggravation, à fournir des pistes de prévention. L'étude essentiellement expérimentale a été complétée par une étude numérique menée au LMT (ENS Cachan) dans le même cadre et qui utilise une partie des données présentées ici. Les différentes campagnes expérimentales ont été réalisées sur deux sites : l'Institut de Recherche en Génie civil et Mécanique (GeM), à l'Ecole Centrale de Nantes, et le Pôle Ingénierie Matériaux (PIM) de Bouygues TP (BYTP). Afin de permettre une interprétation croisée des résultats, une partie de l'étude a été réalisée dans les deux laboratoires.

Les parties d'ouvrage en béton exposées à la dessiccation peuvent présenter des fissurations dues à une situation de retrait empêché. Le retrait de dessiccation est à l'origine de cette sollicitation. Le but du programme proposé était donc de définir une méthodologie d'étude des phénomènes et de proposer des interprétations pour les sensibilités relatives à la fissuration en fonction de la proportion des granulats recyclés et de leurs taux de saturation initiaux. La sensibilité des moyens de mesures existants a d'abord été vérifiée. Les indicateurs globaux (macroscopiques) et la caractérisation de la microstructure seront utilisés pour rendre compte des différences de comportement observées.

Le retrait étant généré par l'hydratation du liant et le séchage du béton, plusieurs facteurs influencent la fissuration. La fissuration dépend de la résistance à la traction du béton (ou plutôt de sa résistance à la fissuration). Les propriétés viscoélastiques du matériau contrôlent le développement des contraintes ; le fluage a une grande influence, puisqu'il diminue considérablement la contrainte élastique. Les granulats recyclés peuvent a priori modifier l'ensemble de ces propriétés. L'objectif de l'étude est de mesurer et comprendre l'influence de la saturation des granulats sur le retrait et la fissuration du béton exposé à la dessiccation. L'approche découplée de la fissuration est fondée sur l'évolution du module élastique, du retrait en conditions endogène et de séchage corrélées à l'évolution de la résistance en traction afin de caractériser un risque potentiel de fissuration par retrait empêché. En parallèle, une modélisation couplée de l'essai de retrait empêché à l'anneau a été développée afin de mettre en évidence l'influence des granulats recyclés sur la relaxation et la sensibilité à la fissuration des bétons.

La première partie du rapport présente le programme expérimental mis en œuvre et les choix de compositions (mortiers et bétons). La deuxième partie décrit les essais réalisés et les méthodes d'analyse des données expérimentales. La troisième et dernière partie rassemble les résultats et leur interprétation, selon le plan de la proposition (17/07/2013).

1. Formulation des mortiers et des bétons

1.1. Répartition des essais entre les deux laboratoires (GeM – BYTP)

1.1.1. Mortiers

Le sable recyclé est la fraction granulaire qui présente le plus fort taux de pâte des bétons d'origine. Les mortiers de sable recyclés constituent donc un support intéressant pour étudier l'influence de la pâte d'origine sur les propriétés des bétons incorporant des granulats recyclés. En outre, le volume représentatif des mortiers est bien plus faible que celui des bétons, ce qui permet un gain de temps (avec le carré du rayon de séchage) pour l'étude du retrait de dessiccation et un programme expérimental plus ambitieux.

Le Tableau 1 résume le programme expérimental de l'étude réalisée sur les 6 mortiers. Les mortiers en **jaune** ont été étudiés par BYTP, ceux en **rouge** par le GeM (le code couleur sera conservé sur l'ensemble du document).

Les deux principaux paramètres de l'étude sont :

- le taux de substitution du sable recyclé par le sable naturel,
- le taux de saturation initial du sable, qui correspond au rapport Teneur en eau initiale/ Coefficient d'absorption à 24h.

Par ailleurs, les précédentes études du PN et du projet ANR ECOREB ont montré que les fines du sable, bien que très minoritaires en proportion (environ 2%), influencent de manière significative le comportement des mortiers et bétons. 5 des 6 compositions étudiées ont été réalisées à partir de sable tamisé à 63 μm ; seule la dernière composition incorpore les fines du sable.

Tableau 1. Programme expérimental des études sur mortiers.

% de saturation	10%	50%	100%
Sable naturel			rouge
50% de sable naturel + 50% de sable recyclé			jaune
Sable recyclé	rouge	rouge	rouge
Sable recyclé avec fines			jaune

1.1.2. Bétons

Les formulations étudiées proviennent du rapport réalisé dans le cadre du thème 0 du PN « Mise au point des formules de béton de référence » rédigé par Thierry Sedran (Ifsttar-Centre de Nantes), Version n°2 du 01/07/2013 (Sedran, 2013).

Le nombre total de formules n'est pas compatible avec le temps imparti pour l'étude. Une sélection a donc été faite « à priori » :

- en sélectionnant les 2 formules extrêmes

- en travaillant avec des granulats naturels systématiquement saturés, quel que soit le mélange, et en faisant varier le taux de saturation des granulats recyclés (graviers et le sable à l'état SSS).
- La répartition des essais entre les deux laboratoires **BYTP** et l'**ECN** est résumée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Programme expérimental sur bétons.

		%Sable Recyclés		
		0	30	100
%Graviers Recyclés	%Sable Recyclés			
	0	C25/30 (SSS) C35/45 (SSS)		
	30	C25/30 (Etat, SSS)	C25/30 (Etat, SSS) C35/45 (Etat, SSS)	
100	C25/30 (Etat, inter, SSS) C35/45 (Etat, inter, SSS)			

Légende :



Formulation non définie par le PN.

Etat : teneur en eau à l'issue du stockage (correspondant à environ 30% de SSS).

Inter : saturation de l'ordre de 70% de SSS.

SSS : saturation égale à 100% : état Saturé Surface Sèche (SSS).

1.2. Fabrication des mortiers

Les compositions des mortiers ont été définies à partir de celle du mortier normalisé :

- proportion volumique de sable identique,
- rapport Eau/Ciment = 0,5 identique.

Afin de simplifier la compréhension des résultats, deux choix sont adoptés :

- Les mortiers avec du sable recyclé vont être réalisés sans les passants à 63 µm. Ces derniers sont retirés de manière mécanique (tamisage pendant 10 min) et non à l'eau.
- La substitution d'un sable par un autre est effectuée en volume, sur la base de la masse volumique saturée surface sèche.

La fabrication des mortiers suit la procédure de malaxage et de compaction des mortiers normalisés.

1.3. Fabrication des bétons

Les propriétés d'un béton donné pouvant être influencées par l'ordre d'ajout de ses différents constituants ainsi que leur temps de malaxage respectif, une procédure de malaxage commune aux deux laboratoires a été adoptée :

1. introduction des granulats du plus gros diamètre au plus petit : 10/20, 4/10, 0/4 et filler, 1 min 30 de malaxage,
2. Arrêt du malaxeur, introduction du ciment, 30 secondes de malaxage,
3. Introduction de l'eau d'ajout pendant 30 secondes (sans arrêter le malaxeur),
4. 1 min de malaxage,
5. Ajout du superplastifiant,
6. 1 min 30 de malaxage.

Soit un total de **5 min** de malaxage.

2. Procédures et analyse des données expérimentales

2.1. Essais

2.1.1. Résistance à la compression

Les essais de résistances en compression ont été réalisés selon la norme NF EN 12390-3, et les éprouvettes ayant été confectionnées selon la norme NF EN 12390-2.

2.1.2. Détermination du module Edyn par les méthodes non destructives

- **MAB**

Concernant la partie sur la transmission des ondes ultrasonores (US), différents appareils ont été utilisés. Le premier s'appelle le MAB (Mesure Acoustique du Béton). Il s'agit d'un dispositif d'émission/réception/analyse de signaux électriques. Les transducteurs permettent la conversion d'une forme d'énergie à une autre. Dans ce cas de l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique lors de l'émission, et inversement lors de la réception. L'effet piézoélectrique est le principe de base de cette conversion. Chaque capteur peut jouer le rôle d'émetteur et de récepteur. Leurs surfaces de contact doivent s'adapter parfaitement avec la zone contrôlée, afin de ne pas avoir d'air à l'interface qui atténue le signal. Le couplant utilisé dans cette étude est du glucose. Voici une photo du dispositif.

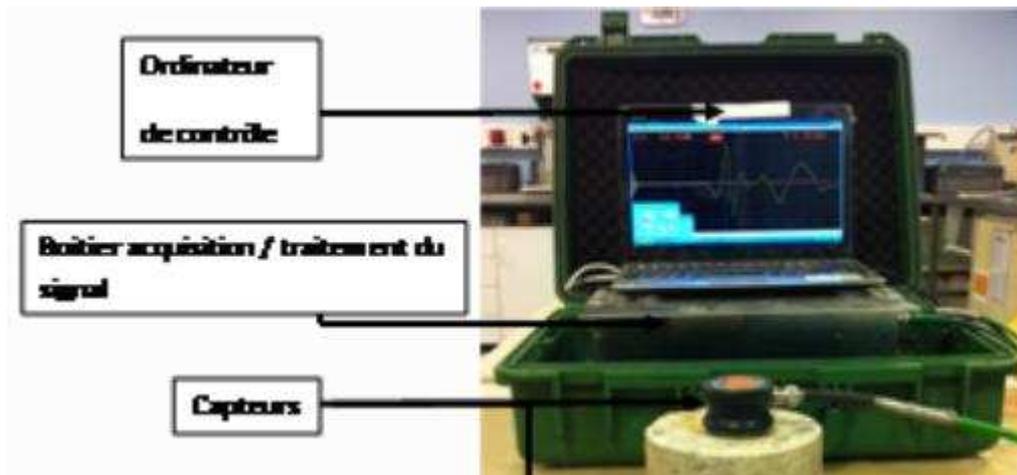


Figure 1 MAB (Mesure Acoustique du Béton) de BYTP

- **Grindosonic**

Le module d'élasticité dynamique a été évalué à l'aide des vitesses ultrasonores. Il est également possible d'exploiter des fréquences de résonance pour le calculer. L'appareil utilisé pour obtenir ces fréquences est le *Grindosonic* développé par la société Belge Lemmens. Cette méthode s'inscrit également dans le domaine du contrôle non destructif. Son principe repose sur celui d'un système masse-ressort. Une faible déformation est générée dans une éprouvette par une faible impulsion mécanique (choc de marteau), dès lors l'éprouvette subit une vibration transitoire. Un capteur piézoélectrique à pointe convertit alors les mouvements de l'éprouvette dans le domaine temporel pour le comparer à un oscillateur de grande précision. L'affichage indique directement la fréquence propre de l'éprouvette (il est nécessaire de renouveler plusieurs fois l'opération pour obtenir une valeur stable) que l'on peut ensuite utiliser pour calculer le module d'élasticité dynamique.

$$E = \frac{64 \times m \times L^3 \times f_F^2 \times T}{(2k + 1)^4 \pi^2 J} \quad 1$$

L est la longueur de l'éprouvette, m sa masse, k l'ordre de l'harmonique (1), T un facteur de correction dépendant de la géométrie de l'éprouvette, f_F la fréquence propre en flexion mesurée et J le moment d'inertie de la section.

2.1.3. Retrait des mortiers et bétons durcis

- **GeM**

La mesure du retrait à long terme s'effectue sur des éprouvettes $2 \times 2 \times 16 \text{ cm}^3$ pour les mortiers et sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour les bétons. A chaque extrémité, l'éprouvette est équipée de plots métalliques coulés dans le matériau. Ces derniers permettent de placer l'éprouvette verticalement sur le banc d'essai et le suivi de sa longueur se fait à l'aide d'un capteur LVDT.

Le démoulage a lieu 24 heures après le contact eau/ciment. Pour chaque composition, les mesures sont effectuées sur des éprouvettes en condition endogène et de séchage. Celles

utilisées pour mesurer le retrait endogène sont recouvertes d'une double couche de ruban adhésif d'aluminium dès le démoulage pour empêcher tout échange d'humidité avec l'extérieur et celles utilisées pour mesurer le retrait total sont recouvertes seulement à leurs extrémités. Une troisième éprouvette est utilisée pour la mesure de la perte de masse, dans les mêmes conditions de séchage que l'éprouvette de retrait total, afin de la corrélérer avec le retrait de dessiccation. L'essai se déroule dans une salle à température et humidité réglées (20°C, 50%HR) et l'acquisition des données se fait automatiquement chaque heure.



Figure 2. Mesure du retrait libre avec acquisition automatique : éprouvette recouverte d'une double couche d'aluminium adhésif (à gauche) pour le suivi du retrait endogène, éprouvette revêtue seulement sur ses faces supérieure et inférieure pour le suivi du retrait total.

- **BYTP**

Dans le but d'obtenir une répétabilité des mesures, toutes les éprouvettes sont démoulées en salle de retrait. Cet emplacement permet d'obtenir des conditions constantes, à savoir $50 \pm 5 \%$ d'humidité relative (HR) et 20 ± 2 °C. Avant de démouler les éprouvettes, un chiffon humide doit être préparé. Celui-ci est disposé sur les éprouvettes avant le début des mesures.

Pour le retrait total, la mesure à l'extensomètre est effectuée dès son démoulage. Une fois la mesure effectuée, elle est recouverte par le chiffon humide. Dès que les trois éprouvettes sont mesurées à l'extensomètre, les surfaces de mesures sont à recouvrir d'aluminium. Une fois les surfaces de mesure recouvertes, les éprouvettes sont pesées puis disposées à leur emplacement.

Pour le retrait endogène, la mesure à l'extensomètre est effectuée dès son démoulage. Une fois la mesure effectuée, elle est recouverte par le chiffon humide. Dès que les trois éprouvettes sont mesurées à l'extensomètre, les éprouvettes sont à recouvrir d'aluminium. Une fois recouvertes, les éprouvettes sont pesées puis disposées à leur emplacement.

Les éprouvettes sont conservées après démoulage dans la salle de retrait prévue à cet effet dont les conditions climatiques sont $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et $(50 \pm 5) \% \text{HR}$. Les éprouvettes doivent être distantes d'au moins 1 cm entre elles et leurs faces doivent toutes être exposées à l'air.

La vitesse de l'air est mesurée avec l'anémomètre à fil chaud à chaque essai à l'endroit où sont exposées les éprouvettes. Pour les autres essais, les éprouvettes sont conservées, après un démoulage à 24 h, à une température de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et une humidité $> 95 \% \text{HR}$ jusqu'aux échéances respectives.

2.1.4. Essai à l'anneau

L'essai à l'anneau consiste à couler du béton autour d'un anneau en acier qui comporte des jauges de déformation placées à l'intérieur pour mesurer les déformations dues au retrait du béton. Une entaille est placée dans le béton pour localiser la fissuration. L'anneau a une hauteur de 7 cm identique à l'éprouvette de retrait (Figure 3). Le suivi des déformations (acquisition automatique) commence dès l'état frais (environ 1 heure après le contact eau – ciment). La face extérieure de l'anneau en béton est décoffrée 24 heures après le contact eau/ciment avec uniquement une protection latérale : il subit donc un séchage des faces supérieure et inférieure.

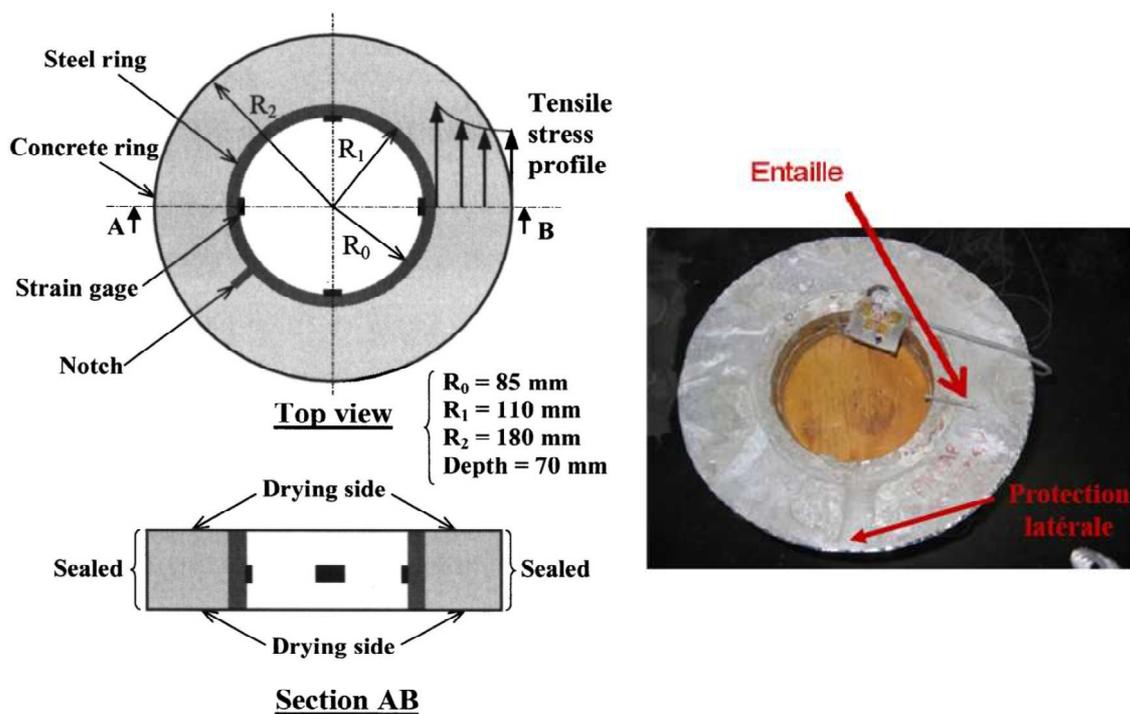


Figure 3. Anneau de retrait empêché (Turcry et al., 2006)

En mesurant la déformation de l'anneau en acier (notée ε_a), il est possible de calculer la contrainte de traction maximale dans le béton. Cette dernière est donnée par l'équation 2, où K est une constante fonction des propriétés élastiques de l'acier (E_a) et de la géométrie (Hossain and Weiss, 2004).

$$\sigma(R_1) = K \times \varepsilon_a(R_0) \quad 2$$

$$K = E_a \left(\frac{R_1^2 + R_0^2}{R_0^2 - R_1^2} \cdot \frac{R_1^2 - R_2^2}{2R_1^2} \right) \quad 3$$

2.2. Analyse des données de retrait

L'exploitation des données du retrait à long terme est réalisée en utilisant le modèle de Torben (Hansen and Mattock, 1966), rappelé dans l'équation 4 et la Figure 4.

$$\varepsilon(t) = \frac{t}{Ns + t} \varepsilon_\infty \quad 4$$

Avec :

- ε_∞ : Retrait à long terme (Eps_inf),
- Ns : Temps nécessaire pour atteindre la moitié du retrait à long terme.

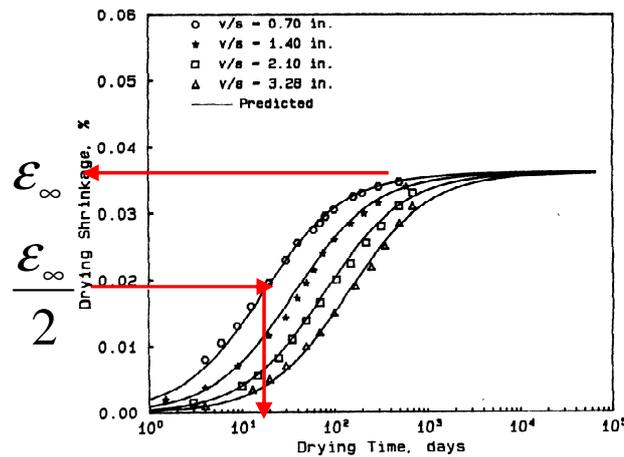


Fig. 10—Shrinkage versus drying time for Mamillan and Thierry-Leufroy data¹⁴

Figure 4. Exploitation des données de retrait de dessiccation (Almudaiheem and Hansen, 1987).

La Figure 5 présente l'évolution du retrait total issue des mesures effectuées sur les éprouvettes de mortier 2x2x16 cm³. Compte tenu du rapport Eau/Ciment des mortiers (0,5) et bétons (0,53 et 0,64), l'amplitude du retrait endogène est faible devant celle du retrait de dessiccation. De plus l'approche habituelle qui consiste à déduire du retrait total le retrait endogène n'est pas complètement satisfaisante ici car le séchage de ces matériaux est très rapide au jeune âge, ce qui influence l'hydratation et le développement de retrait endogène réel dans l'éprouvette de retrait total (Khelidj and Loukili, 1998; Baroghel-Bouny and Godin, 2001).

La sensibilité des paramètres du modèle de Torben a été évaluée pour déterminer la durée de mesure optimale sur les mortiers (Tableau 3). Compte tenu de la dépendance linéaire du temps Ns au rayon de séchage au carré, une durée de mesures de 7 jours sur des

épreuves 2x2x16 cm³ correspond à environ 86 jours sur des éprouvettes 7x7x28 cm³. La prolongation des mesures jusqu'à 40 jours n'a pas influencé de manière significative les paramètres de retrait. L'acquisition automatique des mesures de retrait a donc été effectuée sur 7 jours pour les éprouvettes 2x2x16 cm³ et 90 jours pour les éprouvettes 7x7x28 cm³. Un suivi manuel a ensuite été réalisé dans la mesure du possible. Cependant on constate à long terme une carbonatation naturelle importante des mortiers exposés à la dessiccation (Figure 6) qui peut se traduire par du retrait de carbonatation et influencer les mesures de retrait total.

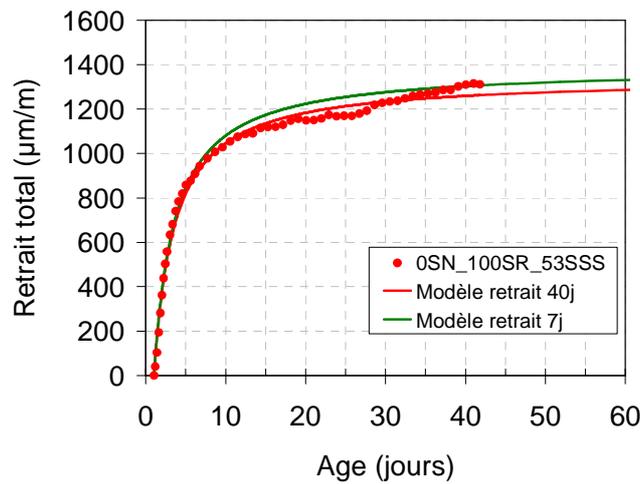


Figure 5. Influence de la durée de mesure sur les paramètres de retrait.

Tableau 3. Paramètres de retrait total du mortier de sable naturel.

	7 j	40 j	Écart (%)
Ns (j)	2,45	2,43	0,7
ϵ_{∞} (µm/m)	1388	1348	3



Éprouvette de retrait endogène : 0% carbonaté

Éprouvette de retrait total : 70% carbonaté

Figure 6. Observation de la carbonatation des mortiers après 7 mois.

2.3. Calcul viscoélastique

L'amplitude de la relaxation peut être déterminée par un calcul viscoélastique en exploitant les données expérimentales et l'essai de retrait empêché (essai à l'anneau). Il existe deux méthodes.

La première est la méthode de Grasley (Grasley and Dambrosia, 2011), qui donne l'expression viscoélastique du module de Young (Equation 5) et de la contrainte dans le domaine de Laplace (Equation 6). Pour l'extraction de ces paramètres viscoélastiques il est nécessaire d'obtenir les données de retrait libre. Elles sont obtenues par une modélisation du séchage et une relation empirique liant le retrait libre (ε_f) à l'humidité relative (HR) dans le béton (Equations 9 et 10). La déformation tangentielle mesurée sur l'anneau en acier (ε_a), utilisée comme donnée d'entrée du calcul, est représentée par un modèle puissance décrit par l'équation 11. La transformée inverse dans le temps des équations 5 et 6 donnent l'évolution du module non vieillissant et de la contrainte réelle dans le béton respectivement.

$$\bar{E}^g(s) = \frac{(a^2 - b^2)E^s D_1(s) \cdot (b^2(v^c - 1) - c^2(v^c + 1))}{4kb^2(s\bar{\varepsilon}^f(s) - (s + \lambda)\bar{\varepsilon}^f(s + \lambda)) + (b^2 - c^2)D_1(s)((a^2(v^s + 1) - b^2(v^s - 1))} \quad 5$$

$$\bar{\sigma}_\theta^c(r, s) = \frac{(b^2 - a^2)\frac{E^s}{s} D_1(s)(c^2 + r^2) - 2k\bar{E}^g(s) \cdot ((b^2 + r^2)\bar{\varepsilon}^f(s) - (b^2 - c^2)(D_2(s) - r^2\bar{\varepsilon}^f(r, s)))}{2(b^2 - c^2) \cdot r^2} \quad 6$$

Avec

$$D_1(s) = s\bar{\varepsilon}_a(s) - \frac{(S + \lambda)}{e^{\lambda \times t}} \cdot \varepsilon_a(s + \lambda) \quad 7$$

$$D_2(s) = \int_b^r r' \varepsilon^f(r', t) dr' \quad 8$$

$$\bar{\varepsilon}^f = -1,1M \left(\frac{(c^2 - b^2)}{s} HR_{initial} - \int_b^r r' \overline{HR}(r, s) dr' \right) \quad 9$$

$$\bar{\varepsilon}^f(r, s) = -1,1M \left(\frac{HR_{initial}}{s} - \int_b^r r' \overline{HR}(r, s) dr' \right) \quad 10$$

$$\varepsilon_a = A \times t^B \quad 11$$

s : variable dans le domaine de Laplace.

k et λ coefficients de calage de la fonction de vieillissement (Grasley and Dambrosia, 2011) :

$$v(t) = k(1 - \exp(-\lambda \times t)) \quad 12$$

Pour la résolution de ce système, un calcul numérique est nécessaire pour déterminer les différents paramètres dans le domaine de Laplace puis une inversion dans le domaine temporel. Il utilise une routine sur Mathematica.

La deuxième façon d'obtenir les paramètres viscoélastiques est la méthode de Grasley modifiée (Samouh, 2015a). Samouh propose d'exploiter les données expérimentales de

retrait libre obtenues sur des éprouvettes dédiées et par la suite de déduire les paramètres de retrait de l'anneau, au lieu de les déterminer par une modélisation des profils d'humidité et une relation empirique. Le retrait libre d'un même béton a été mesuré sur des éprouvettes cylindriques de diamètres différents ($\phi 78$, $\phi 113$ et $\phi 163$ mm). Les résultats ont été exploités selon le modèle de Torben (Equation 4) puis la cinétique du retrait N_s a été représentée en fonction du rayon de séchage au carré (R_0)². Une relation linéaire (Equation 13) a été obtenue, ainsi que le proposent le rapport ACI 2092R-08 (ACI 209, 2008) et l'Eurocode 2-2.

$$N_{s-ep} = \alpha \times R_{0-ep}^2 + \beta \quad 13$$

La valeur moyenne de la constante β obtenue dans les travaux de Samouh (2015) est 8.

Pour la résolution du système, les équations mathématiques sont programmées sous Matlab avec l'utilisation de la méthode de Zakian (Hassanzadeh and Pooladi-darvish, 2007) pour l'inversion du domaine de Laplace vers le domaine temporel.

Nous utilisons par la suite cette approche comme modèle explicatif du développement des contraintes, qui permet de quantifier la relaxation dans le béton en situation de retrait empêché (paramètre important dans le cas des granulats recyclés) à partir des données de l'anneau, du module élastique et du retrait libre, et non comme un modèle prédictif.

2.4. Corrélations des résultats obtenus dans les deux laboratoires

2.4.1. Résistance en compression des mortiers communs

La résistance en compression a été mesurée sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm³ à différents âges (2, 7 et 28 jours). La Figure 7 rassemble les résultats des mortiers communs aux deux laboratoires : 100SN-OSR-100SSS et OSN-100SR-100SSS.

La nomenclature 100SN-OSR-100SSS signifie que le mortier étudié est constitué de 100% de sable naturel et 0% de sable recyclé, le sable est dans l'état saturé surface sèche.

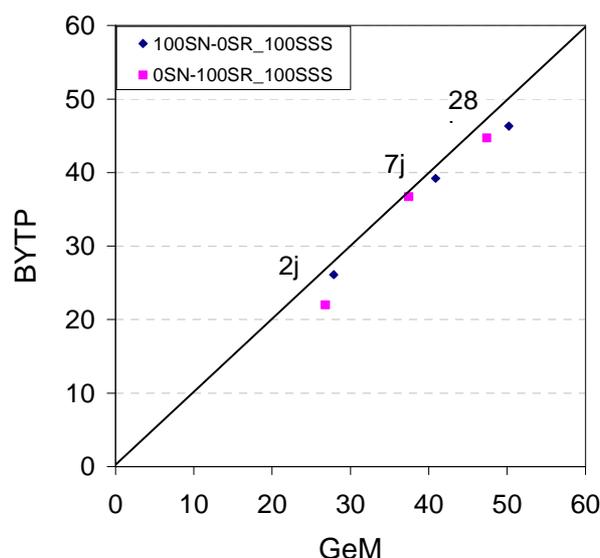


Figure 7. Résistance en compression (MPa).

2.4.2. Retrait total des mortiers communs sur des éprouvettes 2x2x16 cm³

Les Figures 8 et 9 donnent respectivement le retrait à long terme avec un modèle d'extrapolation (à partir de 7 jours de mesure) et la perte de masse. Les résultats des deux laboratoires (GeM et BYTP) sont cohérents et les mesures présentent donc une bonne reproductibilité. L'augmentation de la masse observée après 30 jours confirme l'influence de la carbonatation naturelle (fixation du CO₂ atmosphérique par la matrice cimentaire), qui peut être à l'origine de l'augmentation du retrait total, plus élevé que la prédiction du modèle à partir de cette échéance.

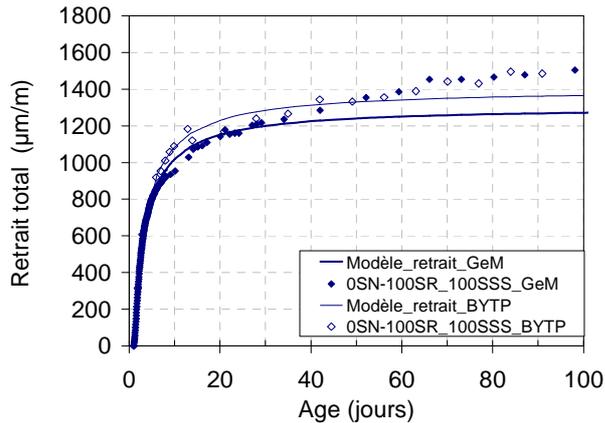


Figure 8. Retrait total à long terme d'un mortier commun aux deux laboratoires

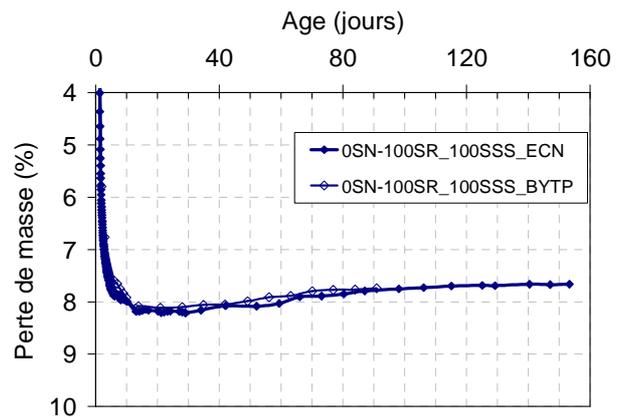


Figure 9. Perte de masse en fonction du temps

2.4.3. Porosimétrie à mercure : mortier de référence

La caractérisation des mortiers par la porosimétrie au mercure permet d'évaluer la reproductibilité de la fabrication et de la conservation des mortiers. L'intrusion de mercure se fait par pression croissante donc par taille de pores (diamètre) décroissante. L'intrusion totale (en mL de mercure par g d'échantillon) correspond à la porosité. L'augmentation rapide du volume injecté à partir d'environ 100 nm correspond au seuil d'intrusion. Le diamètre seuil et la porosité totale semblent plus élevés pour le mortier fabriqué au GeM, mais les écarts sont relativement faibles.

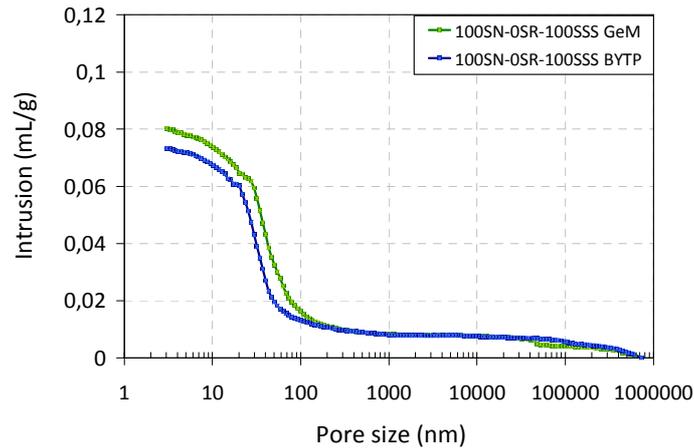


Figure 10. Courbes d'intrusion du mercure des mortiers de sable naturel (GeM et BYTP).

2.4.4. Résistance en compression des bétons communs

La résistance en compression a été mesurée à 1, 2, et 28 jours sur des éprouvettes cylindriques 11x22 cm. La Figure 11 illustre la bonne reproductibilité des procédures expérimentales au niveau des bétons communs aux deux laboratoires.

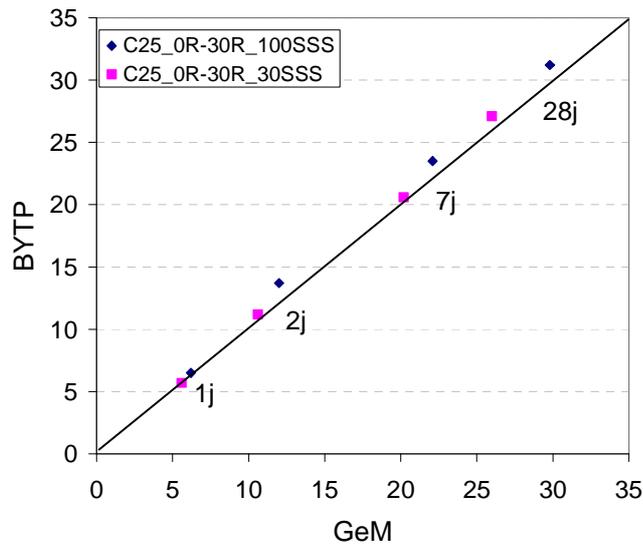


Figure 11. Résistance en compression (MPa).

2.4.5. Suivi du Module E_{dyn} des bétons communs

Le suivi du module a été réalisé aux échéances de 1, 2, 7 et 28 jours sur des éprouvettes 11x22 cm en utilisant une méthode de mesure non destructive par le principe des fréquence propre (*Grindosonic*). La Figure 12 illustre une bonne reproductibilité sur les bétons communs aux deux laboratoires.

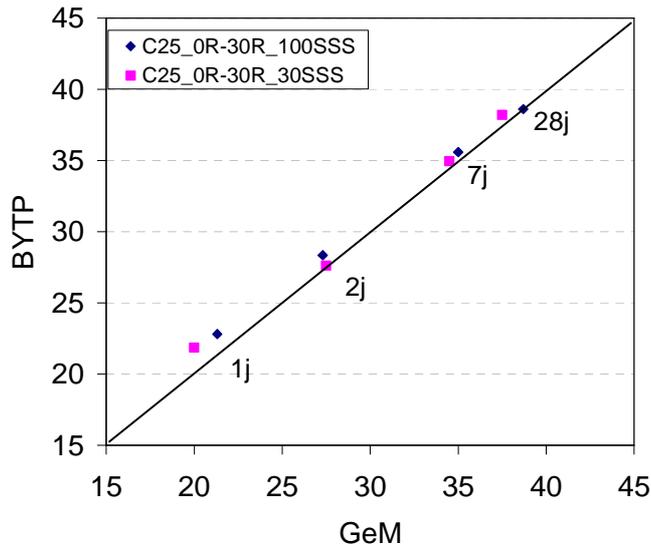


Figure 12. Suivi du module Edyn (GPa)

2.4.6. Retrait total des bétons communs sur des éprouvettes 7x7x28 cm³

Les résultats obtenus dans les deux laboratoires sur un même béton montrent une bonne reproductibilité (figures 13 et 14). Par la suite l'exploitation des données de retrait à long terme des bétons se fait en utilisant le modèle de Torben et nous présenterons les résultats en termes de paramètres de retrait (E_{ps_Inf} et N_s).

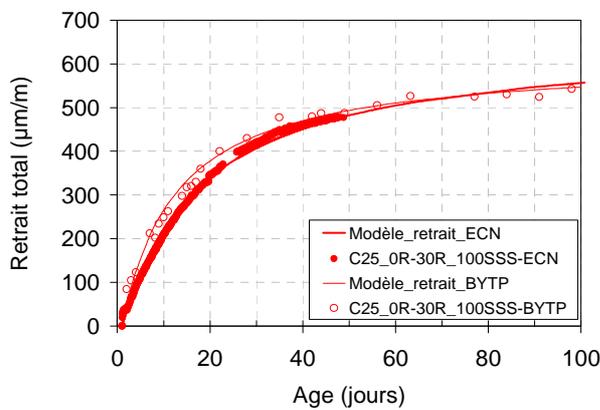


Figure 13. Retrait à long terme d'un béton commun aux deux laboratoires

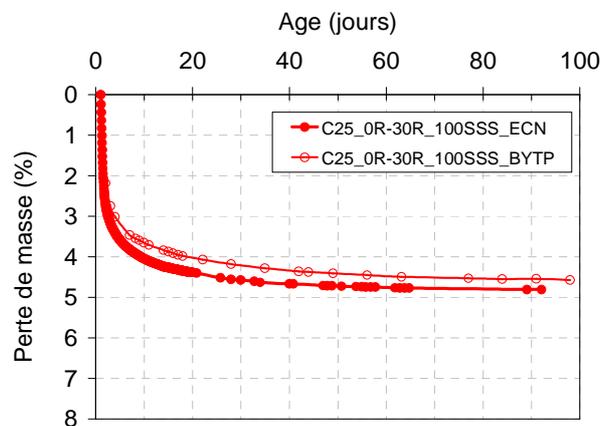


Figure 14. Perte de masse en fonction du temps.

2.4.7. Essai de répétabilité de l'anneau

Dans le cadre d'une bonne compréhension des résultats de retrait empêché (essai à l'anneau), nous avons validé l'essai par un test de répétabilité sur deux bétons différents (Figures 15 et 16).

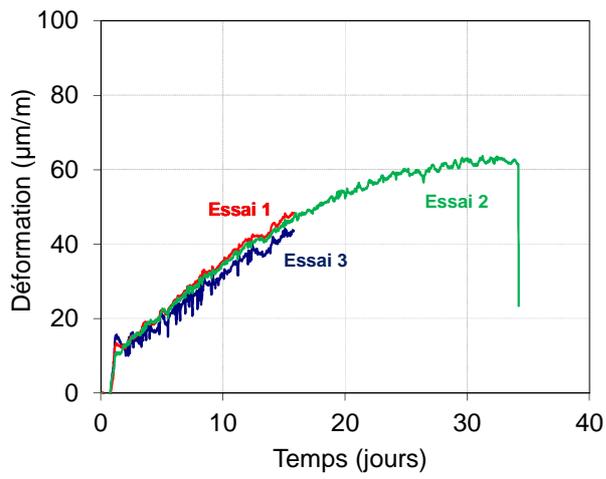


Figure 15. Essai de répétabilité de béton de classe C25 à 30 % GR.

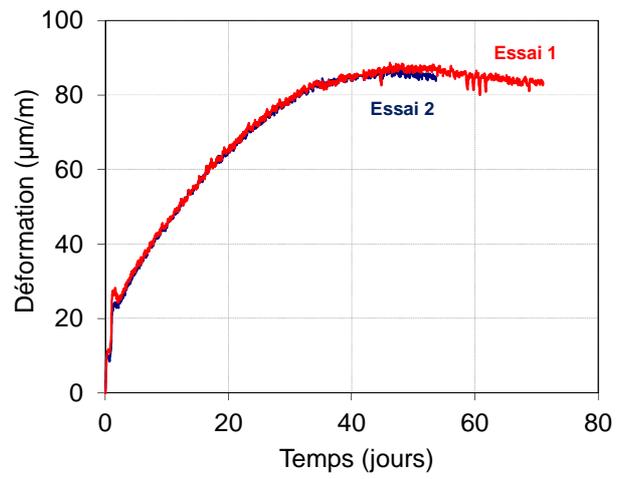


Figure 16. Essai de répétabilité de béton de classe C35 à 100 % GR.

Résultats et discussions

Les résultats sont rassemblés et présentés selon le plan de la proposition du 17/07/2013 :

- I. Influence de l'état de saturation du sable : sur mortier,
- II. Influence de la cure : étude sur mortier,
- III. Limite du taux de substitution et du taux de saturation sur le retrait : essais sur béton.

2.5. Influence de l'état de saturation du sable : étude sur mortier

2.5.1. Essais mécaniques et caractérisation de la microstructure

- **Résistance en compression des mortiers à 28 jours**

Les Figures 17 et 18 représentent l'influence des deux principaux paramètres de l'étude sur la résistance en compression des mortiers à 28 jours. Du fait de dispersion des résultats individuels, tous les écarts ne sont pas significatifs mais deux tendances se dégagent :

- une augmentation de la résistance avec le taux de saturation initial du sable recyclé,
- une diminution de la résistance avec le pourcentage de substitution du sable naturel.

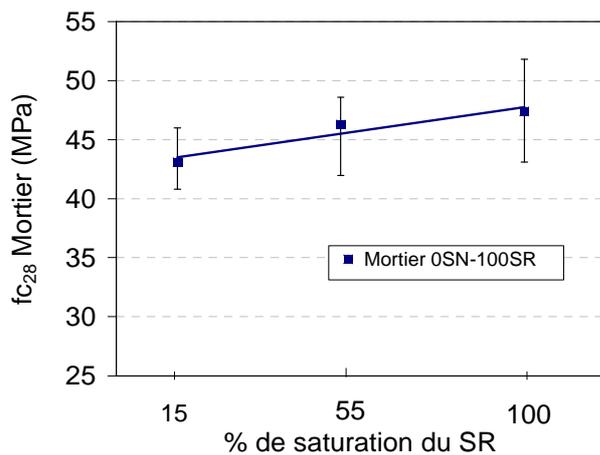


Figure 17. Influence du taux de saturation initial sur la résistance en compression.

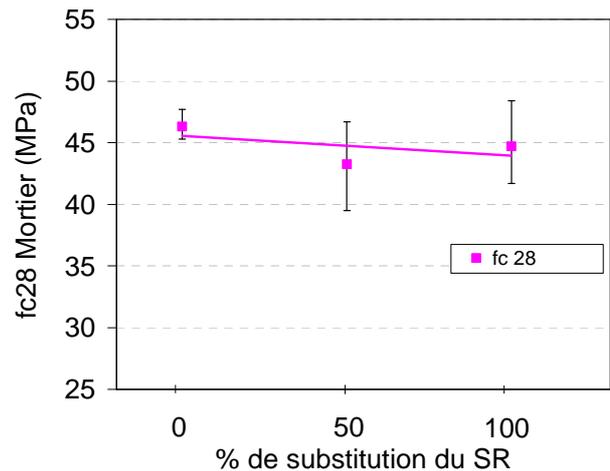


Figure 18. Influence du taux de substitution du SR sur la résistance en compression.

A ce stade, quelques explications peuvent être avancées, même si elles nécessitent des résultats et études complémentaires afin de les justifier. La première tendance peut être liée à l'augmentation de l'eau d'ajout. Même si la cinétique de saturation du sable est rapide, il est possible que la pâte de ciment se structure avec un rapport Eau/Ciment réel d'autant plus élevé que la quantité d'eau d'ajout est importante. La deuxième tendance est moins marquée et peut résulter d'effets contradictoires, tels qu'une meilleure adhérence entre la nouvelle pâte de ciment et le sable recyclé, et la plus faible résistance intrinsèque de grains de sable recyclé par rapport au sable naturel.

Finalement, la résistance en compression des mortiers semble majoritairement influencée par la nature de la pâte.

- **Indicateurs de retrait total**

Les Figures 19 et 20 représentent l'influence du taux de saturation initial du sable recyclé sur l'amplitude et le temps caractéristique du retrait (respectivement). Dans le cas des cures de 1 et 2 jours, cette influence est nulle. Le point (100% ; 7 j) aurait nécessité une confirmation ou une analyse de répétabilité.

Par ailleurs on observe pour deux des trois taux de saturation initiaux une augmentation de l'amplitude et un ralentissement de la cinétique du retrait avec l'augmentation du temps de cure. Cela a déjà été observé (Samouh, 2015b) et correspond à la diminution du rayon des pores liée à la poursuite de l'hydratation pendant la cure. En effet, d'après la relation de Laplace entre le rayon des pores et la dépression capillaire, celle-ci est d'autant plus importante que le rayon des pores est faible.

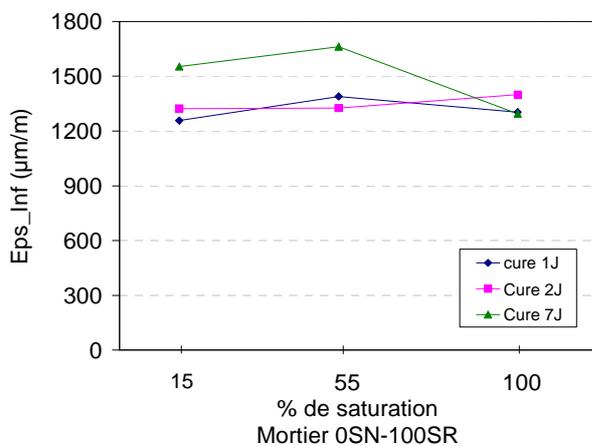


Figure 19. Effet de la saturation du sable recyclé sur le retrait à long terme (Eps_Inf)

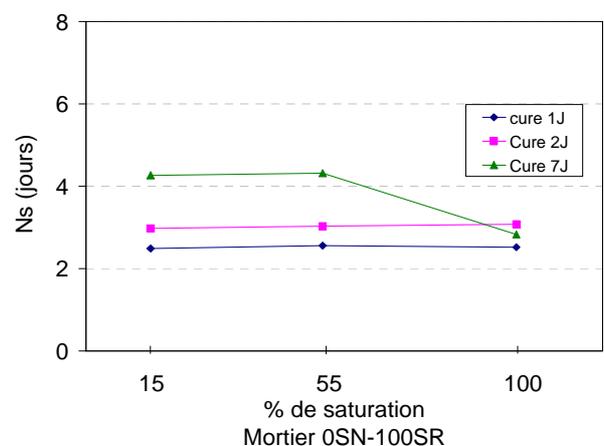


Figure 20. Effet de la saturation du sable recyclé sur le temps caractéristique du retrait (Ns)

Les Figures 21 et 22 représentent l'influence de la proportion de sable recyclé sur l'amplitude et le temps caractéristique du retrait (respectivement).

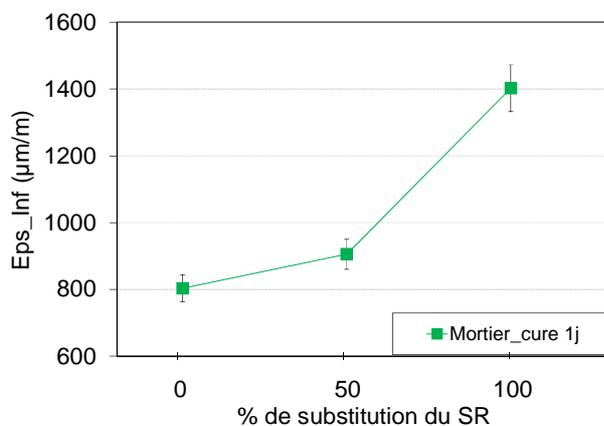


Figure 21. Effet du taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé sur le retrait à long terme (Eps_Inf)

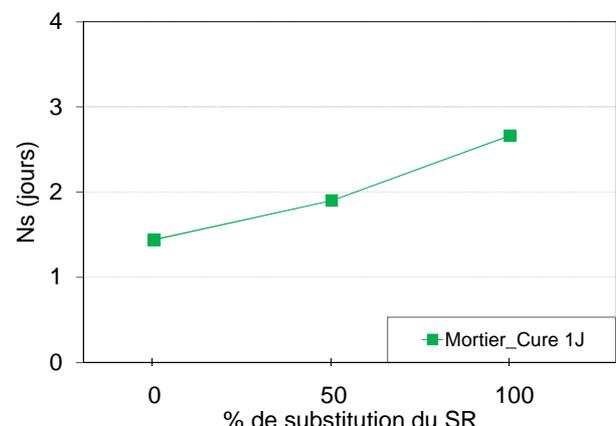


Figure 22. Effet du taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé sur le temps caractéristique du retrait (Ns)

L'amplitude augmente de façon significative avec la proportion de sable recyclé, en particulier lorsqu'elle dépasse 50%. Cela pourrait être expliqué par la contribution de la pâte de ciment du béton d'origine au retrait du mortier. L'augmentation du temps de retrait est cohérente avec cette explication. En effet le séchage plus lent du mortier de sable recyclé serait lié à la porosité plus fine de la pâte initiale.

Les Figures 23 et 24 représentent l'influence des fines du sable recyclé sur l'amplitude et le temps caractéristique du retrait (respectivement). Cette influence ne semble pas significative.

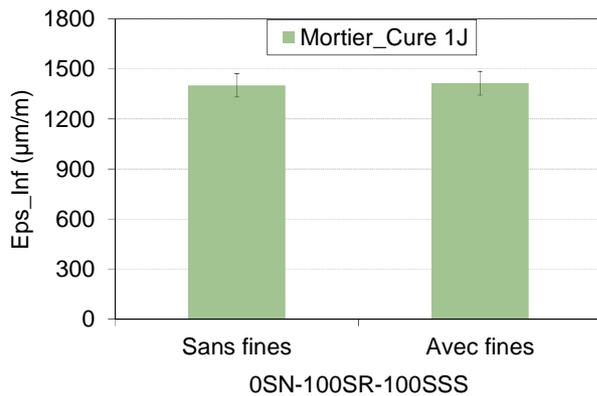


Figure 23. Effet de fines recyclées sur le retrait à long terme (Eps_Inf)

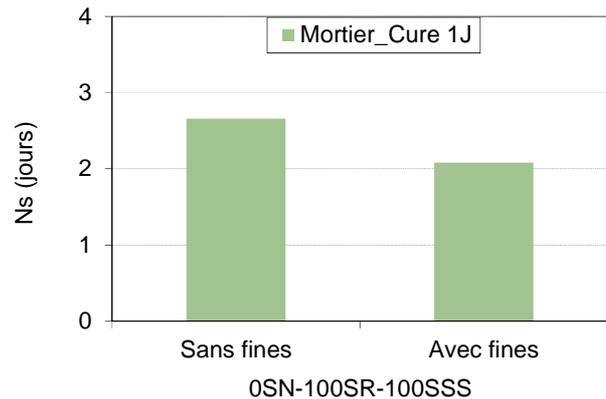


Figure 24. Effet de fines recyclées sur le temps caractéristique du retrait (Ns)

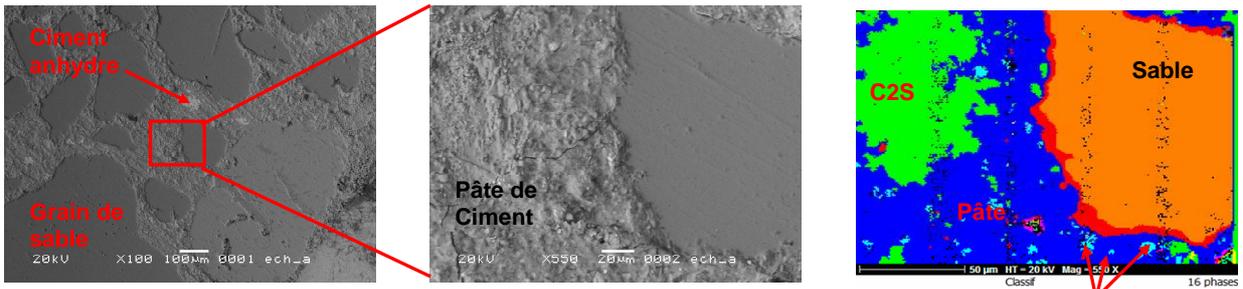
2.5.2. Microstructure

- **Microscopie électronique à balayage et *Energy Dispersion Spectroscopy* (MEB-EDS)**

Les analyses MEB-EDS ont été appliquées à des échantillons fabriqués dans les deux laboratoires après une conservation prolongée dans l'eau (90 jours) afin de mettre en évidence l'influence du sable recyclé sur la microstructure des mortiers, en particulier au niveau de l'interface entre le sable recyclé et la nouvelle pâte de ciment (Figures 25 et 26). Les images EDS résultent de la superposition des cartographies des éléments atomiques principaux, et leur répartition en phases de composition homogène.

Les images MEB permettent de distinguer la pâte du béton d'origine et la nouvelle pâte car la première semble plus compacte et homogène. Par ailleurs on distingue dans la nouvelle pâte une phase plus riche en aluminates, ce qui est cohérent avec la composition chimique du ciment utilisé, qui a teneur relativement forte en cet élément.

Ech Référence : 100SN-OSR_100SSS



Ech Recyclé : 0SN-100SR_15SSS

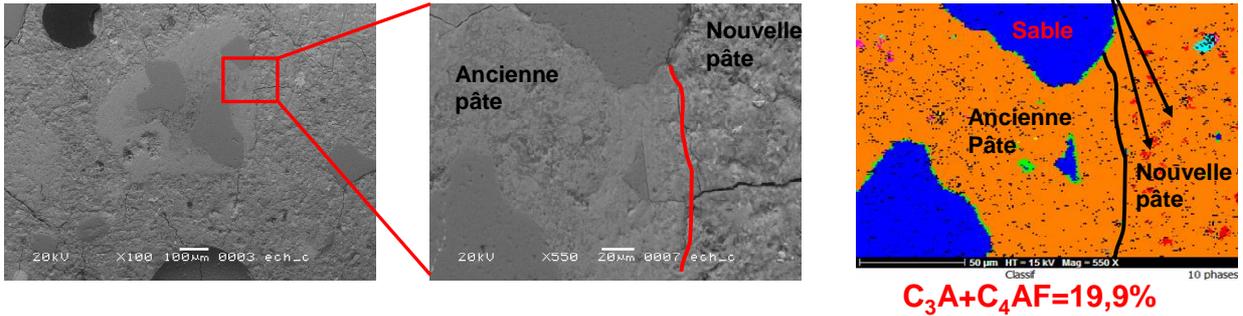
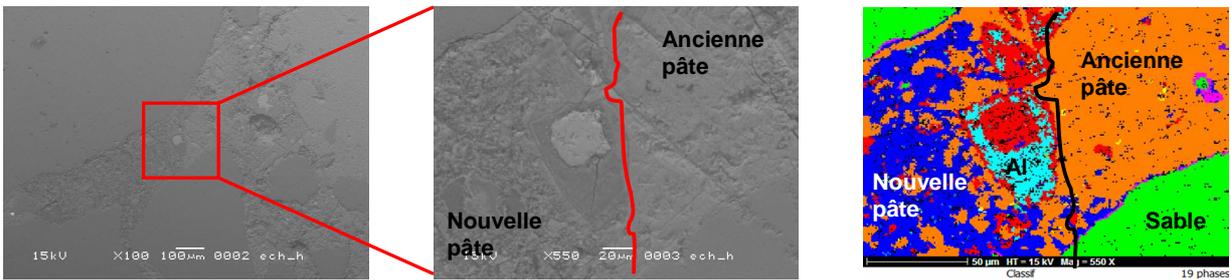


Figure 25. Analyses MEB-EDS sur des échantillons fabriqués au laboratoire Gem.

Ech Recyclé : 50SN-50SR_100SSS



Ech Recyclé : 0SN-100SR_100SSS + fines

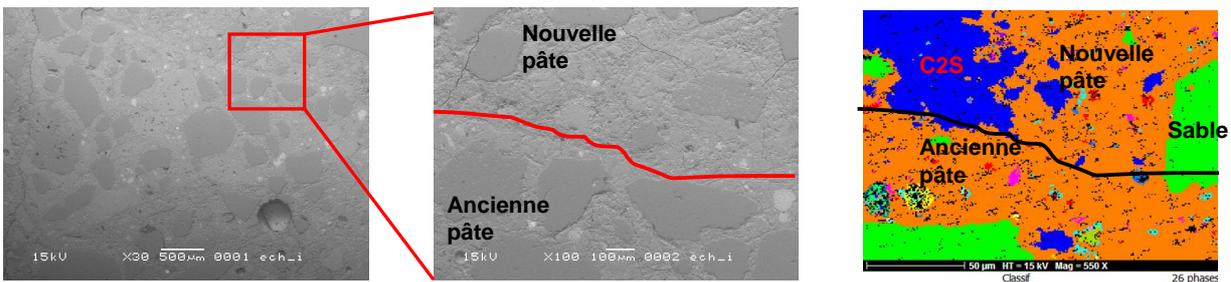


Figure 26. Analyses MEB-EDS sur des échantillons fabriqués au laboratoire BYTP.

L'interface entre l'ancienne et la nouvelle pâte semble de très bonne qualité, dans le sens où l'on n'observe pas de fissuration significative ou de contraste important de composition chimique. Ces points mériteraient des analyses plus approfondies, en particulier pour mettre en évidence le phénomène d'auréole de transition, mais ces résultats sont a priori cohérents avec l'effet peu marqué de la proportion de sable recyclé sur la résistance à 28 jours.

- Tomographie X

Analyse tomographique : Ech GeM – 100SN-OSR_SSS

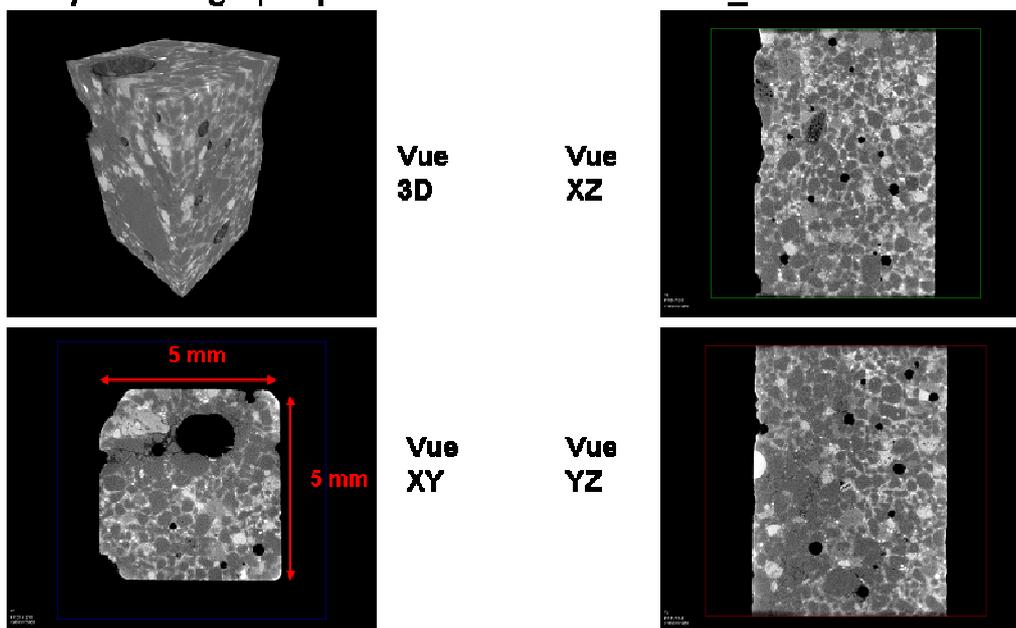


Figure 27. Microtomographie : analyse du mortier de sable naturel.

Analyse tomographique : Ech GeM – 0SN-100SR_SSS

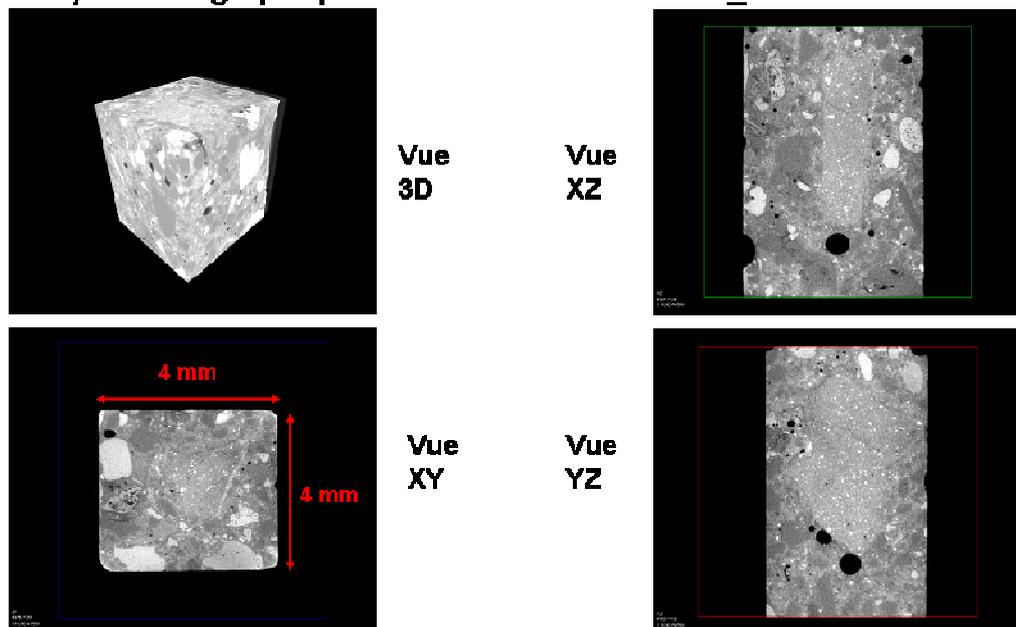


Figure 28. Microtomographie : analyse du mortier de sable recyclé.

L'analyse au tomographe à rayons X a été réalisée sur deux échantillons de mortier (Figures 27 et 28) de dimensions 5x5x25 mm. Les contrastes résultent des différences de densité entre les phases. La résolution, de l'ordre de 5 μm , ne permet pas a priori de mettre en évidence l'éventuelle microfissuration ou la qualité des interfaces entre pâte et granulats. Cependant une interprétation quantitative des informations pourrait permettre une évaluation de la macroporosité.

- **Porosité accessible à l'eau**

La porosité accessible à l'eau est un indicateur général utilisable dans plusieurs approches performantielles de durabilité. Cette partie de l'étude vise à mettre en évidence l'influence des granulats recyclés sur la mesure et les performances des bétons de granulats recyclés.

Les résultats sont cohérents dans la mesure où le classement des mortiers n'est pas influencé par le laboratoire ayant fabriqué les échantillons ou réalisé l'essai. Des écarts systématiques peuvent cependant être mis en évidence :

- **Mesure : + 2,2 points pour BYTP**
- **Fabrication : - 1,7 points**

Les écarts liés à la mesure peuvent être expliqués par la meilleure dépression produite par le dispositif de BYTP.

Tableau 4. Porosité accessible à l'eau des mortiers recyclés et naturel. Comparaison des résultats de BYTP et du GeM.

	Porosité (%) ¹	Porosité (%) ²	Porosité (%) ³
100SN-0SR-100SSS	19,6	17,6	18,5
0SN-100SR-15SSS	27,8	25,2	28,1
0SN-100SR-53SSS	-	-	27,9
0SN-100SR-100SSS	28,3	26,3	27,7
50SN-50SR-100SSS	23,4	21,9	-
0SN-100SR-100SSS + fines	29,6	26,6	-

¹: Fabriqué et mesuré par BYTP.

²: Fabriqué par BYTP et mesuré par GeM.

³: Fabriqué et mesuré par GeM.

En ce qui concerne les paramètres de formulation, le paramètre prépondérant semble être la proportion de sable recyclé. Afin de l'expliquer nous évaluons la contribution de la porosité des sables à la porosité des mortiers à l'aide du système d'équations suivant.

$$P_{sable} = \frac{V_v}{V_t} \quad 14$$

$$WA_{24} = \frac{M_{eau}}{M_{Sec}} = \frac{\rho_{eau} \times V_{eau}}{M_{sec}} \quad 15$$

Nous supposons que toutes les vides vont être remplis d'eau d'où $V_{eau} = V_v$, nous remplaçons le volume d'eau dans l'équation 15 :

$$V_v = \frac{WA_{24} \times M_{sec}}{\rho_{eau}} \quad 16$$

$$P_{sable} = \frac{\rho_{sable}}{\rho_{eau}} \cdot WA_{24}$$

Le tableau résume la contribution de la porosité des sables à la porosité des mortiers (SN et SR), et par déduction celle de la pâte qui est quasiment constante comme le montrent les Figures 27 et 28. Le taux de saturation initial ne semble pas avoir d'influence significative sur la porosité globale (Tableau 5, Figures 27 et 28).

Tableau 5. Porosité accessible à l'eau : contribution des sables et de la pâte de ciment.

	Porosité du mortier (%)
Sable Naturel	1,8
Sable recyclé	11,3
Pâte	16,5

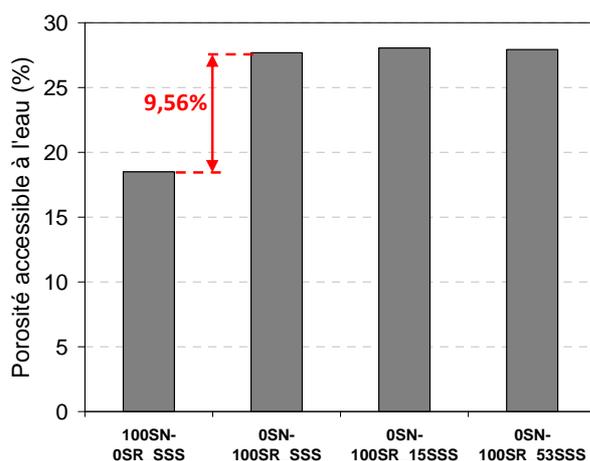


Figure 29. Porosité accessible à l'eau du mortier naturel et recyclé.

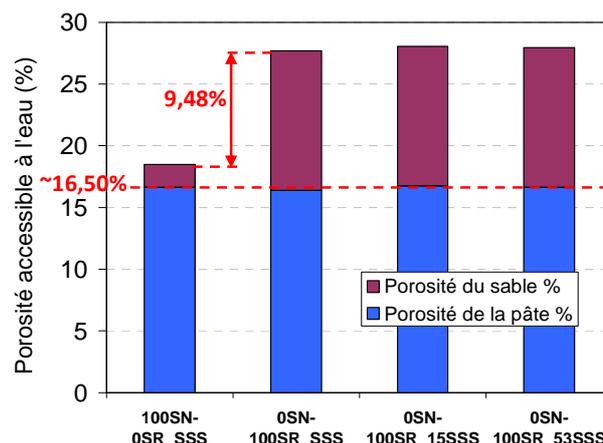


Figure 30. Porosité accessible à l'eau du mortier naturel et recyclé : décomposition.

- **Porosité totale et distribution porale (mercure)**

Les valeurs de porosité déduites de la porosimétrie à mercure sont plus faibles que les valeurs de porosité accessible à l'eau. Cette tendance est connue et résulte de la sous-estimation de la macroporosité par cette technique. Par ailleurs ces essais confirment les tendances précédentes, y compris l'augmentation de la porosité résultant de l'incorporation des fines. Ceci peut provenir de la porosité interne des fines de sable recyclé : d'autres études du PN ont mis en évidence leur forte demande en eau et leur contribution à l'absorption des sables.

Tableau 6. Porosité des mortiers, déduite de la porosimétrie à mercure.

	Porosité (%) ¹	Porosité (%) ²
100SN-0SR-100SSS	15,4	16,6
0SN-100SR-15SSS	19,1	18,7
0SN-100SR-53SSS	-	17,8
0SN-100SR-100SSS	17,8	18,8
50SN-50SR_100SSS	16,2	-
0SN-100SR-100SSS + fines	18,1	-

¹: Fabriqué par BYTP et mesuré par GeM.

²: Fabriqué et mesuré par GeM.

L'intérêt majeur de la porosimétrie à mercure est la détermination de la distribution porale : pour une porosité donnée, les modes poraux peuvent différer et leur répartition influencer les propriétés mécaniques et de transfert. On distingue sur les courbes de distribution porale (Figures 31 et 32) des mortiers deux zones : des pores de diamètres compris entre 3 et 20 nm qui correspondent à la porosité des hydrates, et un mode principal (pic) entre 20 et 100 nm qui correspond à la porosité capillaire. Ces zones communes aux 5 mortiers confirment que la microstructure des mortiers est principalement influencée par celle de la pâte. On peut cependant détecter sur ces courbes l'influence des paramètres de l'étude.

Sur la Figure 31, on peut remarquer que l'amplitude du mode principal est d'autant plus importante que le taux de saturation initial du sable recyclé est faible. Cela traduit l'influence du rapport Eau d'ajout/Ciment et la quantité d'Eau efficace réelle plus importante lorsque le sable est partiellement saturé.

Sur la Figure 32, on peut constater que le volume poreux des hydrates est d'autant plus important que la proportion de sable recyclé est élevée. On peut supposer que la porosité des hydrates de la pâte du béton d'origine contribue à la porosité du mortier.

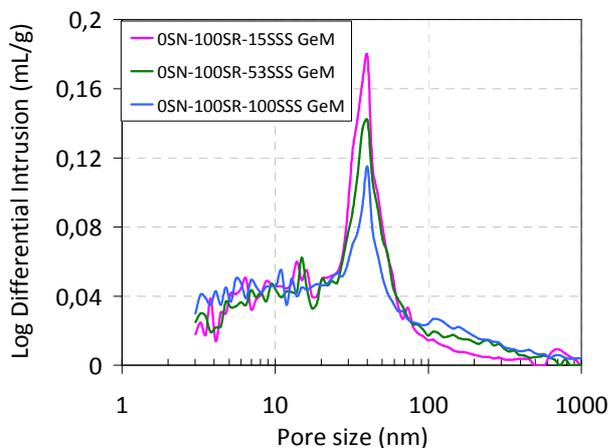


Figure 31. Distribution porale des mortiers : influence du taux de saturation initial du sable recyclé.

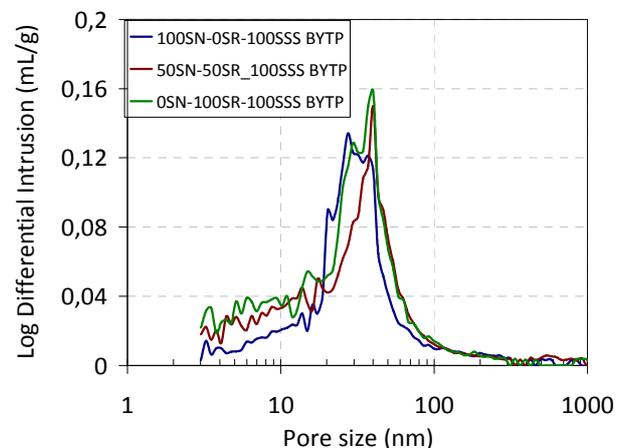


Figure 32. Distribution porale des mortiers : influence de la proportion de sable recyclé.

On peut synthétiser ces évolutions sur les graphes 33 et 34. Le diamètre moyen des pores dépend en effet des poids relatifs des deux modes mis en évidence sur les courbes précédentes. On peut ainsi constater que les mortiers recyclés (avec 100 % de sable recyclé) ont des diamètres moyens de pores plus faibles que les mortiers de sable naturel. Ceci pourrait expliquer l'amplitude de retrait plus élevée des mortiers recyclés, d'autant plus qu'une humidité relative de 50 % correspond, d'après la relation de Kelvin-Laplace, à des ménisques de quelques nm, c'est-à-dire la zone où l'on observe des différences significatives au niveau de la distribution porale (Figure 31). Par ailleurs, le même raisonnement permet d'expliquer l'influence quasi nulle du taux de saturation initial du sable sur le retrait.

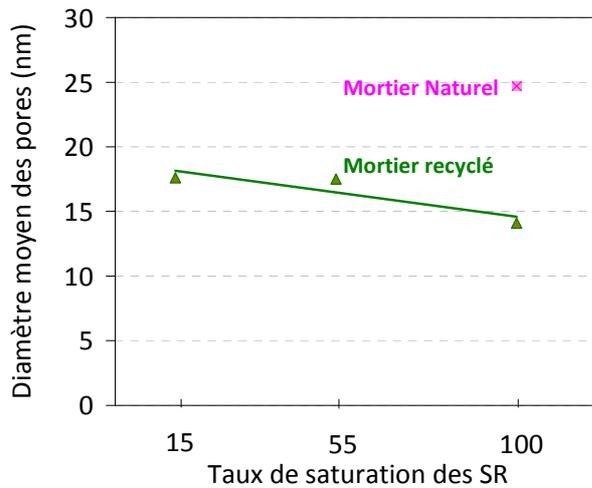


Figure 33. Influence du taux de saturation initial du sable recyclé sur le diamètre moyen des pores.

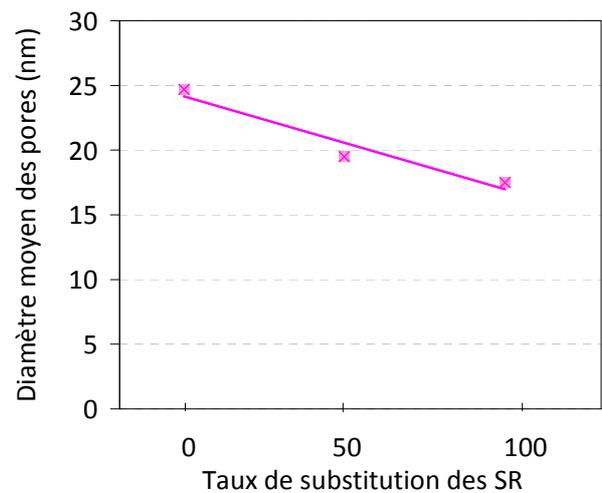


Figure 34. Influence de la proportion de sable recyclé sur le diamètre moyen des pores.

2.6. Influence de la cure : étude sur mortier

Les Figures 35 et 36 représentent l'influence de la durée de cure sur l'amplitude et le temps caractéristique du retrait (respectivement). Dans le cas des cures de 1 et 2 jours, cette influence est nulle. Le point (100% ; 7 j) aurait nécessité une confirmation ou une analyse de répétabilité, mais une tendance générale peut être mise en évidence sur ces graphes. L'amplitude et le temps de retrait augmentent avec la durée de cure, et cette influence est plus marquée pour les mortiers de sable recyclé que pour les mortiers de sable naturel.

Ce dernier point peut être relié au rôle de cure interne des granulats poreux, largement étudié dans le cas des granulats légers. Dans le cas où la cure (externe) est prolongée, la cure interne peut se manifester par une amélioration locale de l'hydratation.

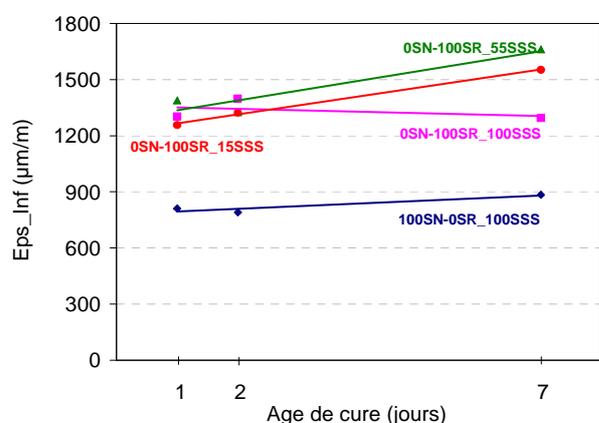


Figure 35. Effet de la cure sur le retrait à long terme (Eps_Inf)

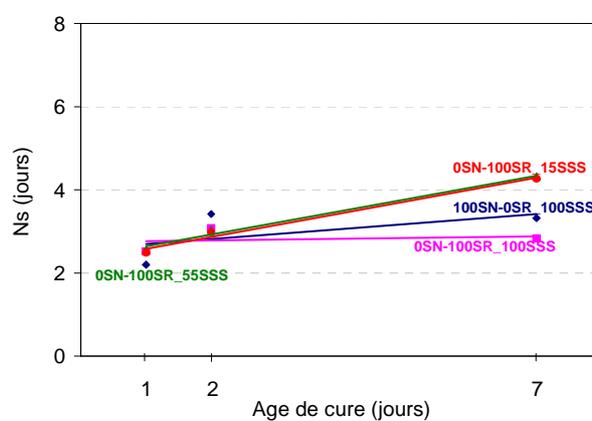


Figure 36. Effet de la cure sur la cinétique du retrait (Ns)

2.7. Limite du taux de substitution et du taux de saturation sur le retrait : essais sur béton.

2.7.1. Essais mécaniques et physiques

- **Résistance en compression à 28 jours**

Les Figures 37 et 38 représentent l'influence des deux principaux paramètres de l'étude sur la résistance en compression des bétons à 28 jours. Deux tendances se dégagent :

- une augmentation de la résistance avec le taux de saturation initial du gravier recyclé,
- une diminution de la résistance avec le pourcentage de substitution du gravier naturel.

L'influence de ces paramètres est cohérente avec les variations observées sur les mortiers (cf 3.1). Il est à noter qu'un taux de saturation initial faible semble très préjudiciable à la résistance mécanique des bétons de granulats recyclés.

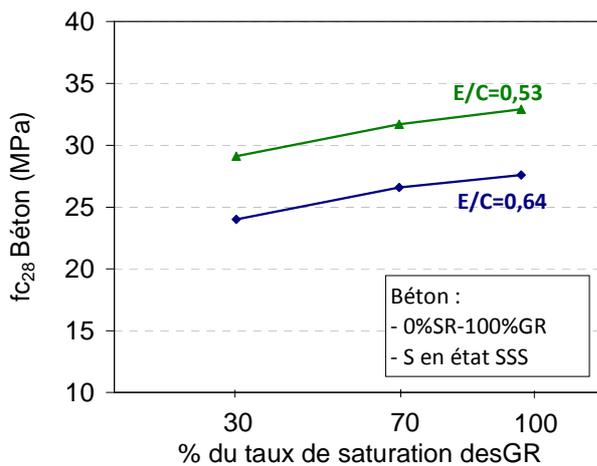


Figure 37. Influence du taux de saturation initial des graviers recyclés sur la résistance en compression des bétons.

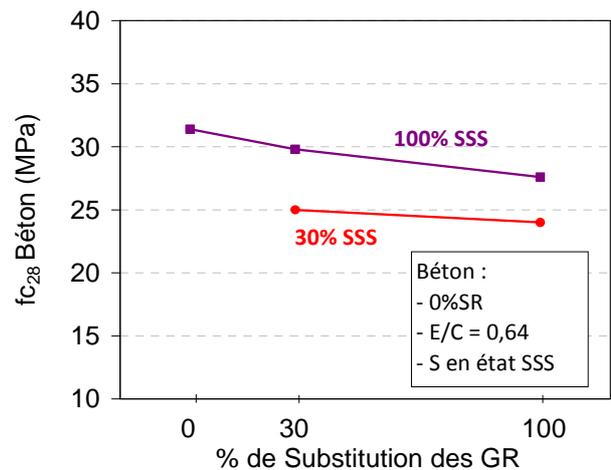


Figure 38. Influence de la proportion de graviers recyclés sur la résistance en compression des bétons.

La Figure 39 représente l'influence de la proportion de sable recyclé sur la résistance en compression des bétons à 28 jours.

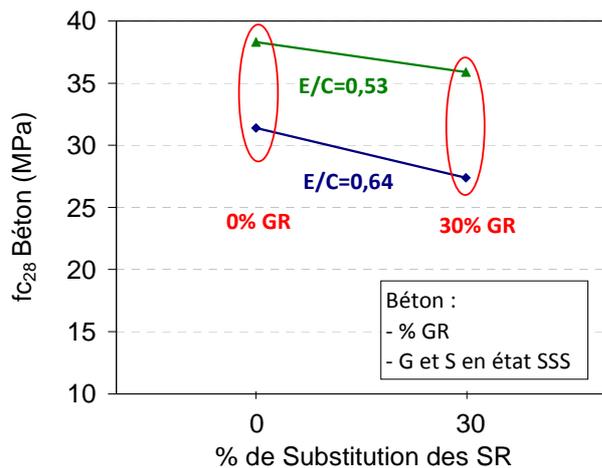


Figure 39. Influence de la proportion de sable recyclé sur la résistance en compression des bétons.

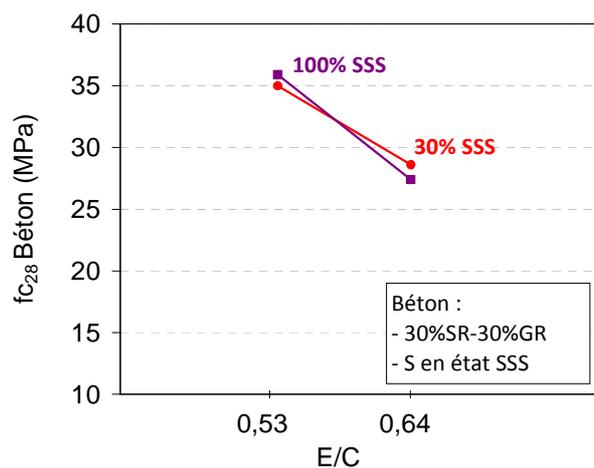


Figure 40. Influence du rapport Eau efficace/Ciment sur la résistance en compression des bétons avec sable et graviers recyclés.

- **Module élastique E_{dyn}**

Le suivi du module a été réalisé selon deux techniques MAB et *Grindosonic* (échantillons testés au laboratoire BYTP), la Figure 41 illustre la très bonne cohérence des deux méthodes. La technique de mesure fondée sur le principe des fréquences propre a été utilisée dans les deux laboratoires et le résultat a été concluant (voir paragraphe 2.3.5)

Par la suite nous présenterons le suivi du module par la méthode des fréquences propres (*Grindosonic*) afin de pouvoir le corrélérer avec les différents paramètres de formulation.

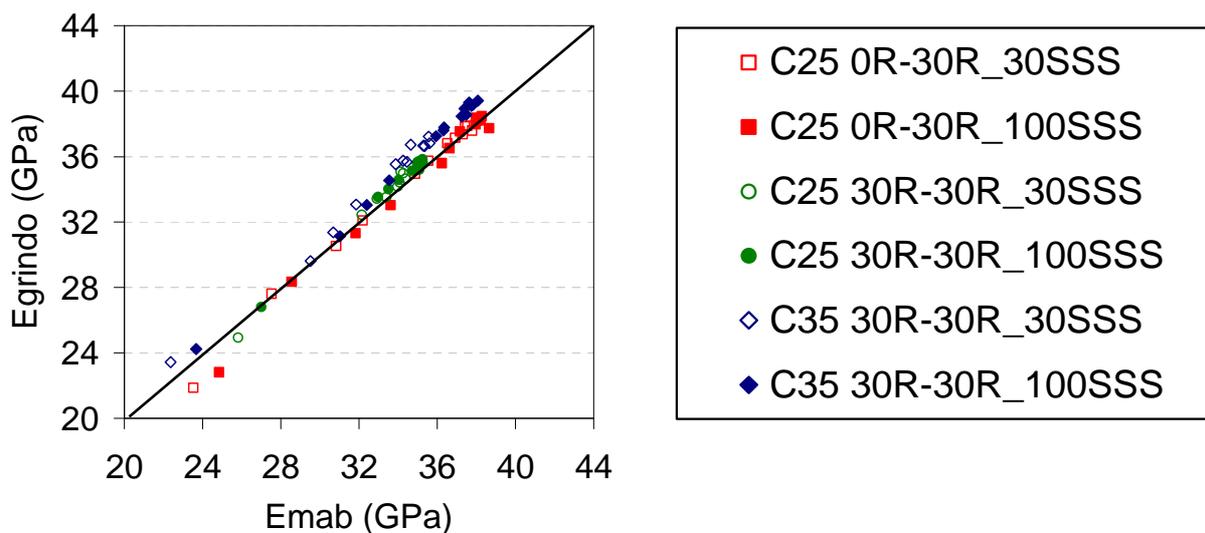


Figure 41. Comparaison des modules élastiques obtenus par la méthode MAB (ondes ultrasonores) et le *Grindosonic* (fréquences propres).

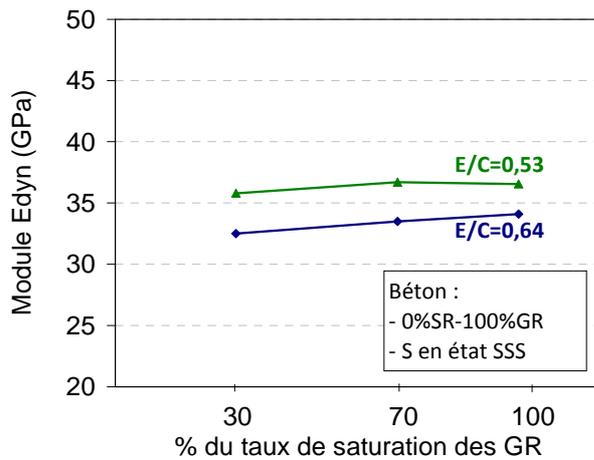


Figure 42. Influence du taux de saturation initial des GR sur le module E_{dyn} .

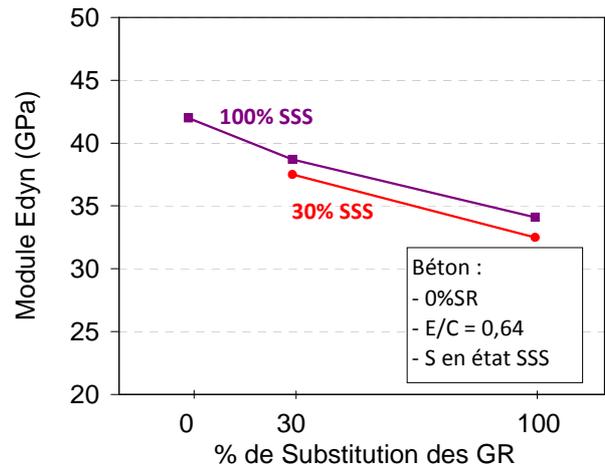


Figure 43. Influence de la proportion de GR sur le module E_{dyn} .

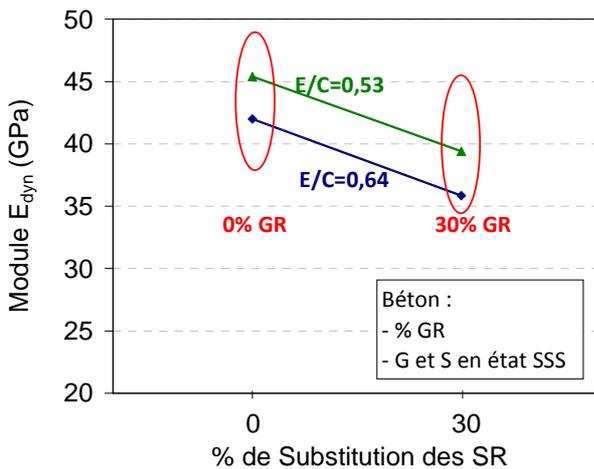


Figure 44. Influence de la proportion de SR sur le module E_{dyn} .

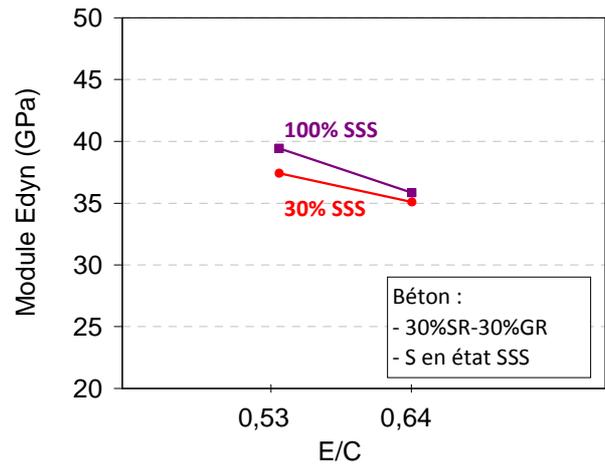


Figure 45. Influence du rapport E/C et du taux de saturation initial sur le module E_{dyn} .

• Indicateurs de retrait

Les Figures 46 et 47 représentent l'influence de la proportion de gravier recyclé sur l'amplitude et le temps caractéristique du retrait (respectivement). L'influence sur l'amplitude n'est pas significative entre 30 et 100 %, alors qu'elle l'était dans le cas du sable recyclé. Ceci peut provenir de la teneur en mortier d'origine plus faible des graviers. Par ailleurs on distingue une tendance assez nette d'augmentation du temps caractéristique du retrait avec la proportion de gravier recyclé. Cette évolution avait déjà été mise en évidence sur les mortiers et peut être mise en relation avec la porosité plus fine de la pâte de ciment du béton d'origine.

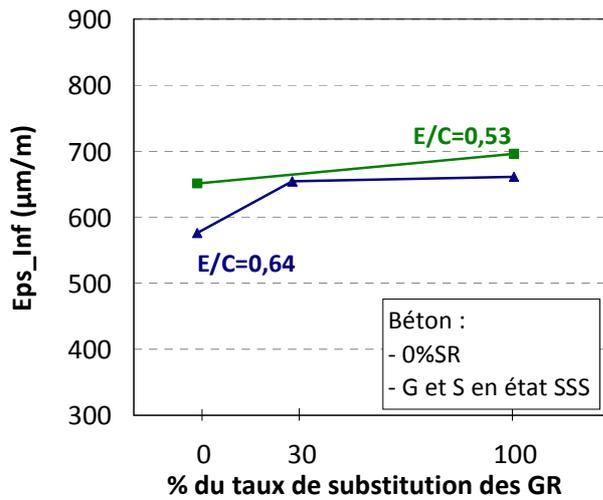


Figure 46. Effet de la proportion de GR sur le retrait à long terme (Eps_Inf).

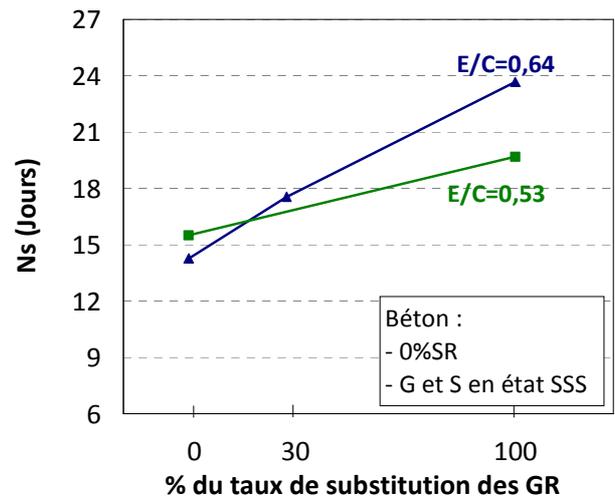


Figure 47. Effet de la proportion de GR sur le temps caractéristique du retrait (Ns).

Les Figures 48 et 49 représentent l'influence du taux de saturation initial du gravier recyclé sur l'amplitude et le temps caractéristique du retrait (respectivement). De même que sur les mortiers, cette influence n'est pas significative.

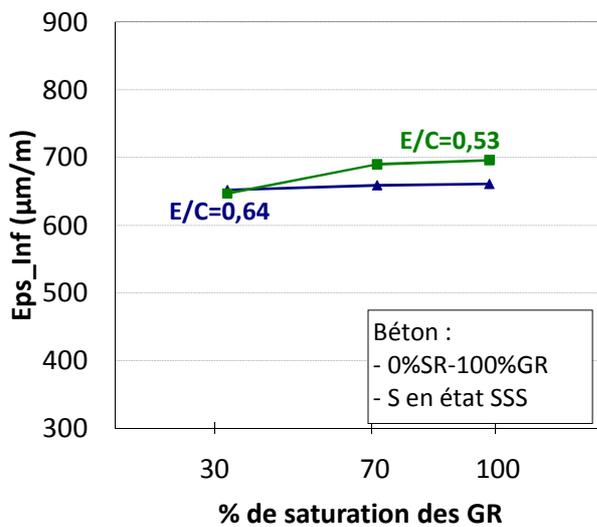


Figure 48. Effet de la saturation initiale et du E/C sur le retrait à long terme (Eps_Inf).

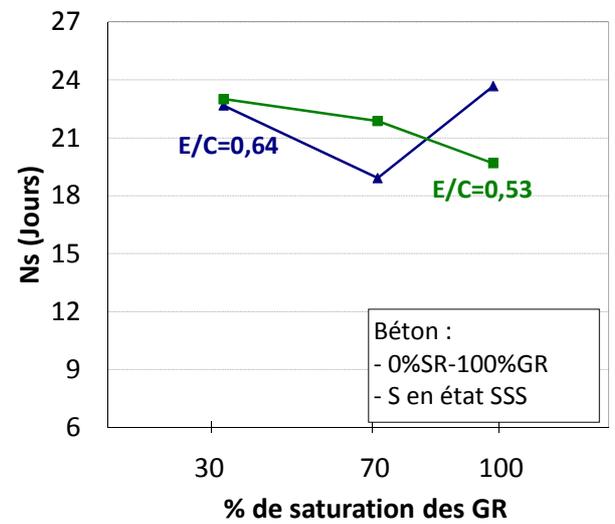


Figure 49. Effet de la saturation initiale et du E/C sur le temps caractéristique du retrait (Ns).

Les Figures 50, 52 et 51, 53 représentent l'influence des proportions de sable et gravier recyclés sur l'amplitude et le temps caractéristique du retrait (respectivement). Les augmentations combinées de la proportion de sable et de gravier recyclés se traduisent par une augmentation maximale de 15 % de l'amplitude du retrait.

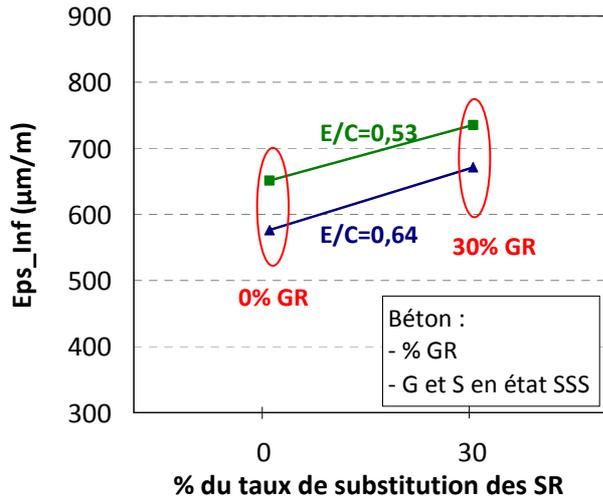


Figure 50. Effet de la proportion de sable et gravier recyclés sur le retrait à long terme (Eps_Inf)

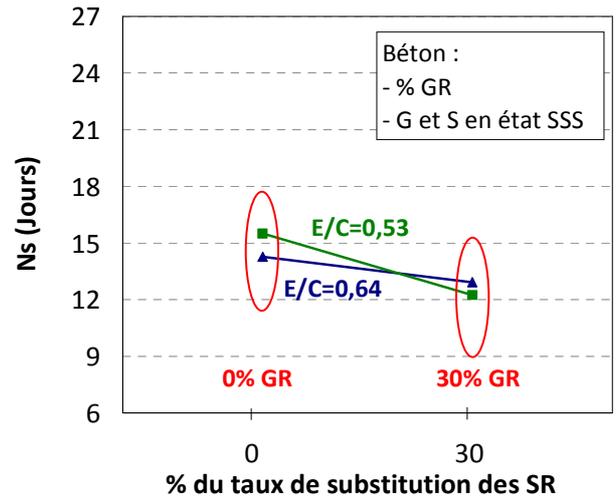


Figure 51. Effet de la proportion de sable et gravier recyclés sur le temps caractéristique du retrait (Ns).

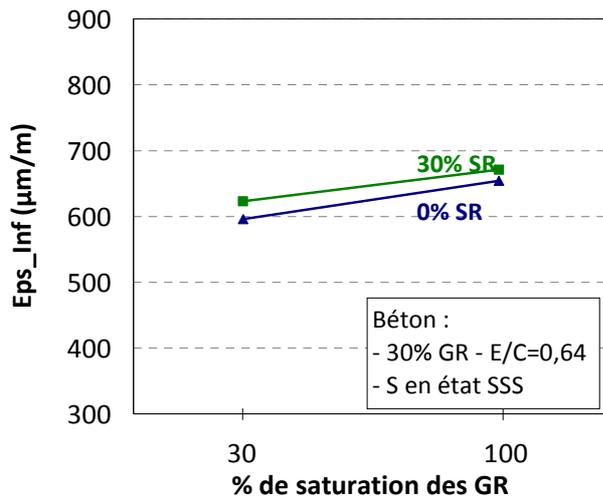


Figure 52. Effet de la saturation et du E/C sur le retrait à long terme (Eps_Inf)

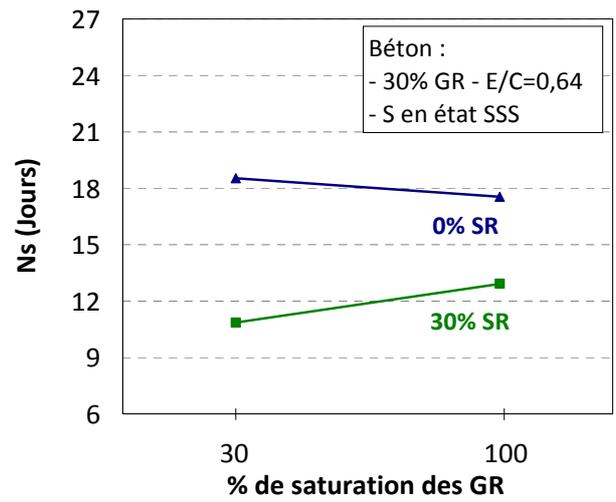


Figure 53. Effet de la saturation et du E/C sur la cinétique du retrait (Ns)

2.7.2. Sensibilité à la fissuration

- **Données expérimentales : essai de retrait empêché (anneau)**

Influence du taux de substitution

Le principe de l'essai est décrit dans la partie 2.1 (voir paragraphe 2.1.4). Après le coulage du béton autour de l'anneau métallique, ce dernier est conservé dans la salle climatisée à température et humidité contrôlées ($T^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=50\%$), couvert d'un film plastique pour éviter tout séchage pendant les 24 premières heures. Les mesures débutent dès la mise en œuvre du béton. A partir des déformations mesurées sur l'anneau, les contraintes maximales dans le béton peuvent être calculées (équation 2). Etant donné que le passage des déformations aux contraintes ne tient compte que de la géométrie et des propriétés de l'anneau en acier, les courbes de contraintes obtenues gardent la même allure que les courbes de déformation de l'anneau. Les résultats de ces calculs portant sur l'influence des proportions de GR sur la contrainte maximale de l'anneau sont présentés dans la Figure 54 et Figure 55. La brusque diminution des valeurs traduit une fissuration traversante de l'anneau en béton, leur stabilisation ou leur diminution résulte de la relaxation des contraintes dans le béton. Le béton à 30% de GR a tendance à fissurer dans les 40 premiers jours de mesure. Concernant le béton à 100% GR au-delà de 40 jours on remarque une stabilisation des contraintes suivie d'une diminution causée par l'apparition des microfissurations. La diminution de la sensibilité à la fissuration, entre 30 et 100 % de GR, est liée à des effets opposés : d'une part une diminution de la résistance (Figure 38) et augmentation du retrait (Figure 46), d'autre part une diminution du module (Figure 43).

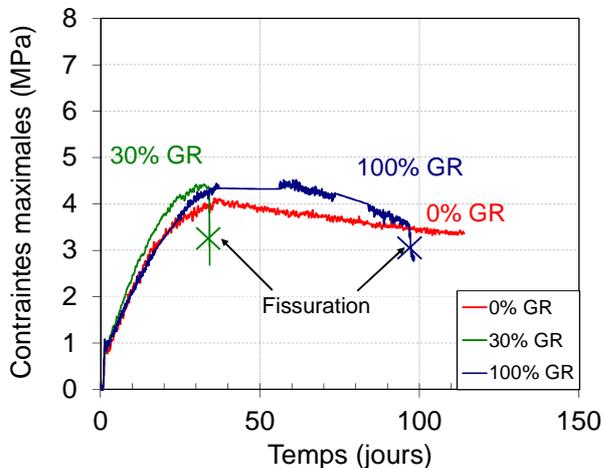


Figure 54. Influence de la proportion de graviers recyclés (à l'état SSS) sur la contrainte maximale de l'anneau et l'âge de fissuration. Béton de classe C25.

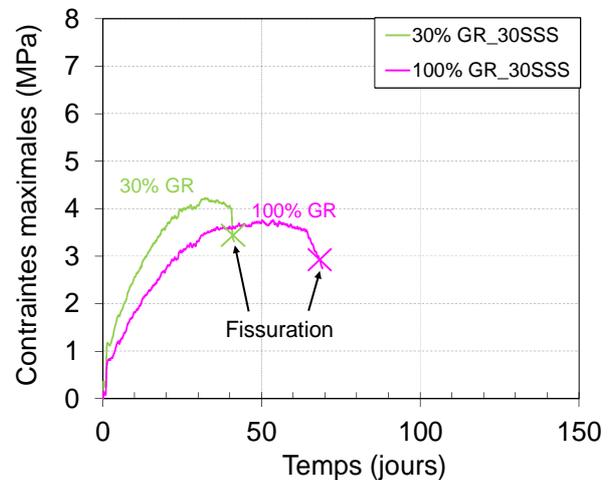


Figure 55. Influence de la proportion de graviers recyclés (à l'état 30SSS) sur la contrainte maximale de l'anneau et l'âge de fissuration. Béton de classe C25.

Influence du taux de saturation et de la formulation

L'étude de l'effet de la saturation initiale des GR et de la formulation est présentée dans les figures (Figure 56 et Figure 57). Nous observons que les âges de fissuration sont proches (pour différents taux de saturations initiaux des graviers), cependant le béton C25 à 70% SSS n'a pas fissuré au cours des cinq mois de mesure. Cette tendance pourrait être expliquée par

l'influence des conditions initiales (Figure 56). En effet nous avons observé une différence significative des contraintes après décoffrage (à 24 heures) avec les deux autres bétons (30 et 100 % SSS). La diminution du rapport E/C de 0,64 à 0,53 semble influencer sur le comportement et augmenter la sensibilité à la fissuration. De plus dans notre cas d'étude en parallèle aux variations de E/C le volume de pâte a augmenté d'environ 7% (de 290 à 310 litres/m³).

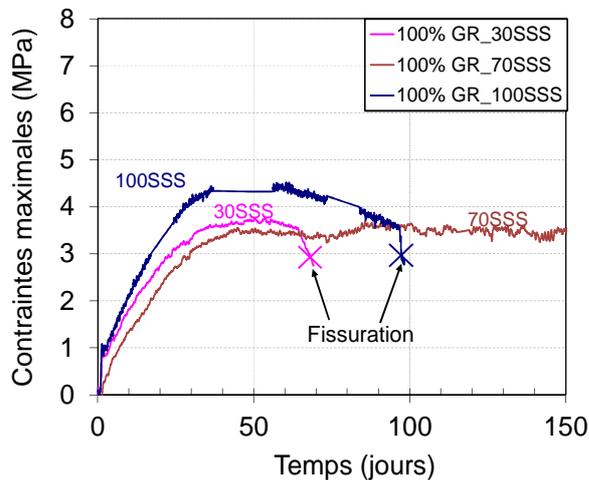


Figure 56. Bétons de classe de résistance C25. Influence du taux de saturation initial des graviers recyclés sur la contrainte maximale de l'anneau et l'âge de fissuration.

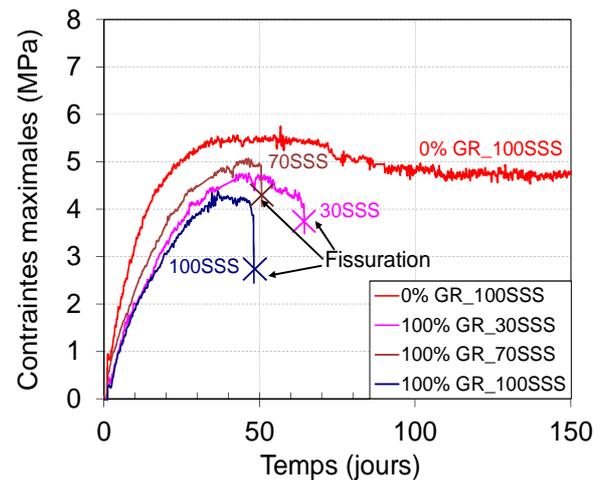


Figure 57. Bétons de classe de résistance C35. Influence du taux de saturation initial des graviers recyclés et de leur proportion sur la contrainte maximale de l'anneau et l'âge de fissuration.

- **Calculs viscoélastiques**

En complément des résultats décrits précédemment, le calcul viscoélastique permet l'évaluation des contraintes relaxées et de l'évolution du module différé du béton. En effet, les déformations de l'anneau, l'évolution du retrait et du module élastique sont utilisées comme données d'entrée pour estimer le module différé (tenant compte de la relaxation) et les contraintes dans l'anneau en béton.

Influence du taux de substitution

Dans cette partie nous mettons en évidence l'influence du taux de substitution des GR sur le risque de fissuration. Les Tableau 7 et 8 récapitulent toutes les données d'entrée nécessaires pour le calcul viscoélastique. Les indicateurs de retrait ϵ_∞ et N_5 sont issus de l'analyse des essais de retrait par le modèle de Torben (équation 4). Les données de l'anneau ont été représentées par un modèle exponentiel nécessitant la calibration de deux paramètres : A coefficient traduisant l'amplitude et B. Par ailleurs, les résultats expérimentaux du module statique sont utilisés afin d'identifier par calibration avec la fonction mathématique de Grasley (Grasley and Dambrosia, 2011) les deux paramètres k et λ . Le paramètre $E1J$ est le module d'Young déterminé expérimentalement sur des éprouvettes dédiées au moment du décoffrage de l'anneau.

Tableau 7. Données d'entrée pour le calcul viscoélastique: Influence du taux de substitution des GR (gravier à l'état 100SSS). Béton de classe C25.

Gravier à l'état 100SSS	0% GR	30% GR	100% GR
Données retrait			
ε_{∞} ($\mu\text{m/m}$)	544	609	613
N_S éprouvette (j)	17,7	18,3	25,3
N_S anneau (j)	46,8	49,2	77,2
Données anneau			
A ($\mu\text{m/m}$)	58,1	70,2	67,2
$B \times 10^{-2}$	8,4	7,1	6,4
Données module			
E_{ij} (GPa)	21,7	17,6	15,9
k	1,664	1,787	1,765
λ	0,717	0,664	0,672

Tableau 8 Données d'entrée pour le calcul viscoélastique : Influence du taux de substitution des GR (gravier à l'état 30SSS). Béton de classe C25.

Gravier à l'état 30SSS	30% GR	100% GR
Données retrait		
ε_{∞} ($\mu\text{m/m}$)	522	608
N_S éprouvette (j)	21,5	25,7
N_S anneau (j)	61,8	78,8
Données anneau		
A ($\mu\text{m/m}$)	62,5	57,0
$B \times 10^{-2}$	9,2	6,1
Données module		
E_{ij} (GPa)	17,0	13,6
k	1,826	1,969
λ	0,687	0,621

En ce qui concerne la relaxation des bétons, on remarque qu'elle est croissante en fonction du pourcentage de substitution (Figure 59 et Figure 61). Cette même tendance a été observée lors d'essais de retrait empêché au jeune âge TSTM (*Temperature Stress Testing Machine*), de même le béton à 100% de GR avait la déformation de fluage la plus importante (Bendimerad, 2016). L'évolution des contraintes viscoélastiques est calculée à partir des données du module différé ainsi que des autres données d'entrée, et représentée par la Figure 58 et la Figure 60, de même que la résistance en traction obtenue par des essais de fendage.

La comparaison des contraintes viscoélastiques et la résistance à la traction permet la détermination de l'âge théorique à la fissuration. Ce dernier est de 41,1 jours à 0% GR, de 18,6 jours à 30% GR et de 27,6 jours à 100% GR (gravier à l'état 100% SSS). Lors des essais expérimentaux de l'anneau, les âges de fissuration observés sont différents mais la tendance est identique (pas de fissuration observée pour le 0% GR, fissuration à 34,1 jours pour le 30% GR et de 95,8 jours pour le 100% GR). Le même comportement est observé dans le cas

d'utilisation des graviers à l'état 30% SSS – teneur en eau des matériaux à l'issue du stockage
Figure 60.

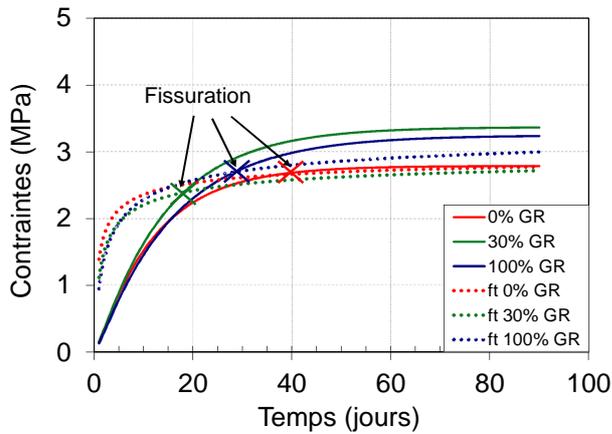


Figure 58. Calcul viscoélastique des contraintes développées dans l'anneau et évolution de la résistance en traction : Influence du taux de substitution. Béton de classe C25.

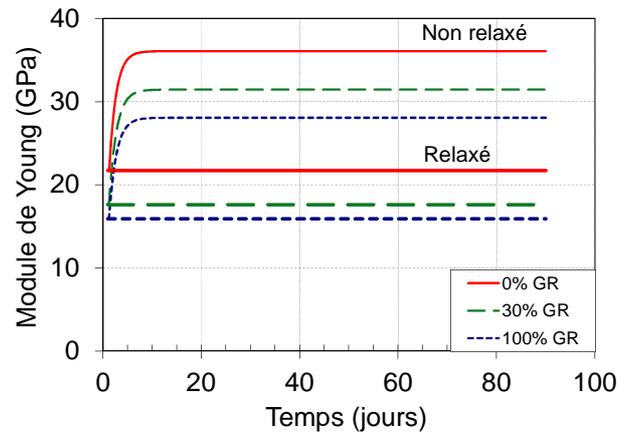


Figure 59. Influence du taux de substitution des GR (gravier à l'état 100SSS) sur l'évolution du module d'Young relaxé dans l'anneau.

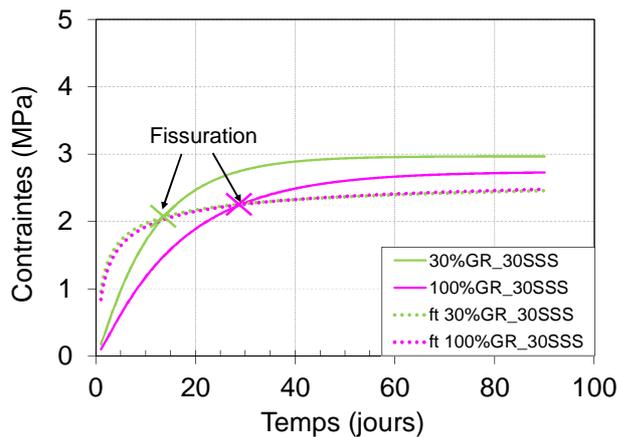


Figure 60. Calcul viscoélastique des contraintes développées dans l'anneau et évolution de la résistance en traction : Influence du taux de substitution. Béton de classe C25.

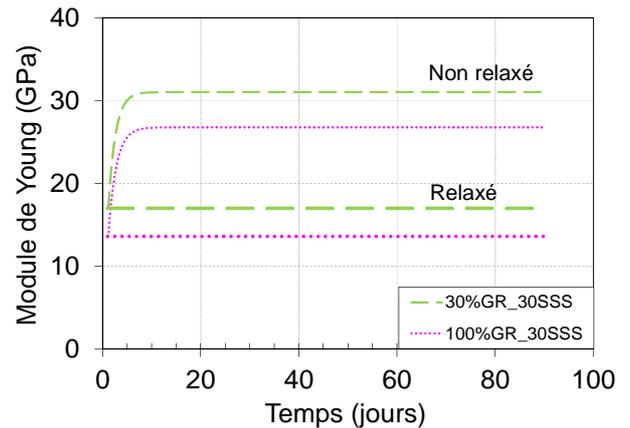


Figure 61. Influence du taux de substitution des GR (gravier à l'état 30SSS) sur l'évolution du module de Young relaxé dans l'anneau.

Influence du taux de saturation et de la formulation

Dans le cadre de l'étude de l'influence du taux de saturation et de la formulation (E/C) le même principe de calcul est adopté. Les données relatives aux amplitudes et cinétiques de retrait, les paramètres donnant l'évolution de la déformation de l'anneau ainsi que ceux du module d'Young (E statique) des bétons de classes de résistance visées C25 et C35 sont rassemblés dans les Tableau 9 et Tableau 10 respectivement.

Tableau 9. Données d'entrée pour le calcul viscoélastique : Influence du taux de saturation des GR : Bétons de classe C25

Béton 0SR-100GR	30% SSS	70% SSS	100% SSS
Données retrait			
ε_{∞} ($\mu\text{m/m}$)	608	605	613
N_S éprouvette (j)	25,7	21,8	25,3
N_S anneau (j)	78,8	63,2	77,2
Données anneau			
A ($\mu\text{m/m}$)	57,0	51,8	67,2
B x 10^{-2}	6,1	5,4	6,4
Données module			
E_{ij} (GPa)	13,6	15,3	15,9
k	1,969	1,808	1,765
λ	0,621	0,555	0,672

Tableau 10. Données d'entrée pour le calcul viscoélastique : Influence du taux de saturation et de la proportion des GR : Bétons de classe C35

Béton 0% GR et 100% GR	0%GR 100SSS	100%GR 30SSS	100%GR 70SSS	100%GR 100SSS
Données retrait				
ε_{∞} ($\mu\text{m/m}$)	592	617	639	633
N_S éprouvette (j)	17,7	24,9	27,3	23,4
N_S anneau (j)	46,9	75,7	85,0	69,5
Données anneau				
A ($\mu\text{m/m}$)	81,7	83,6	76,6	69,1
B x 10^{-2}	8,5	8,4	5,8	5,1
Données module				
E_{ij} (GPa)	24,5	16,3	19,1	16,7
k	1,545	1,825	1,592	1,799
λ	0,905	0,747	0,862	0,786

Le taux de saturation des GR semble n'a pas d'influence significative sur la relaxation et ceci a été observé quelque que soit le rapport E/C (Figure 63 et Figure 65).

Pour les bétons de classe C35 (Figure 64), nous observons un risque de fissuration plus élevé que celui des bétons de classe C25. Cela s'explique par le fait que ce type de béton avec un E/C plus faible développe un retrait proche des bétons C25 (Figure 48), mais des rigidités plus élevées donc des contraintes plus importantes.

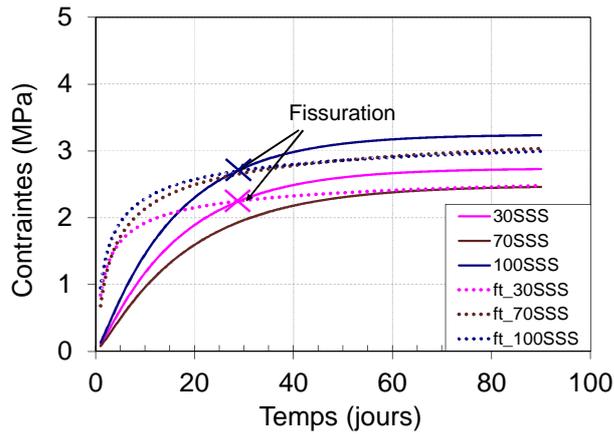


Figure 62. Calcul viscoélastique des contraintes développées dans l'anneau et évolution de la résistance en traction : Influence du taux de saturation.

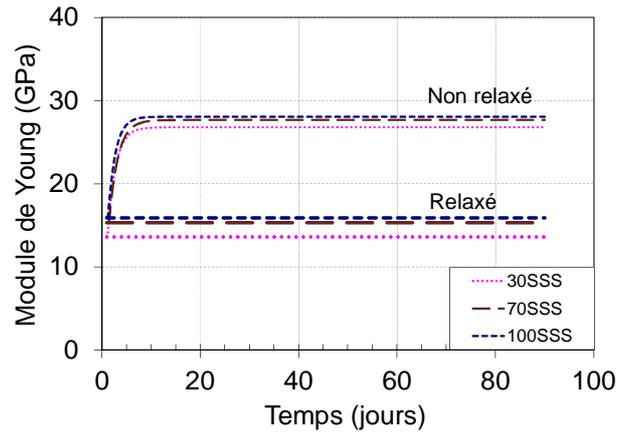


Figure 63. Influence du taux de saturation des GR sur l'évolution du module de Young relaxé dans l'anneau : Béton de classe C25.

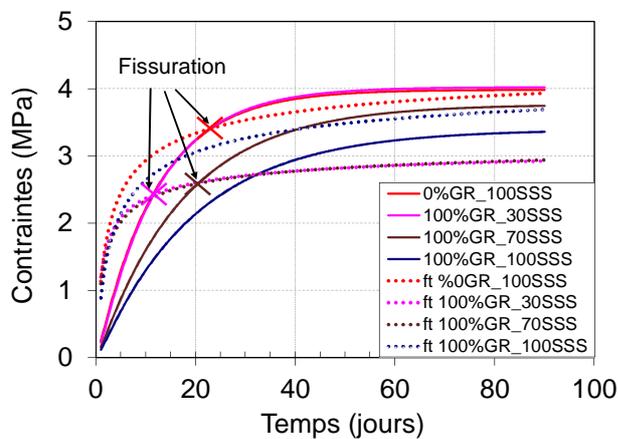


Figure 64. Calcul viscoélastique des contraintes développées dans l'anneau et évolution de la résistance en traction : Influence du taux de saturation.

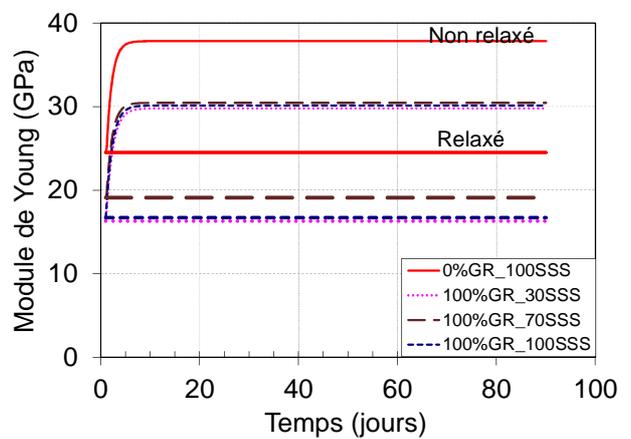


Figure 65. Influence du taux de saturation et la proportion des GR sur l'évolution du module de Young relaxé dans l'anneau : Béton de classe C35.

Conclusions

Cette étude sur la fissuration des parties d'ouvrage en béton recyclé exposées à la dessiccation a permis de définir une méthodologie d'étude des phénomènes et de proposer des interprétations pour les sensibilités relatives à la fissuration en fonction de la proportion des granulats recyclés et de leurs taux de saturation initiaux.

Dans la mesure où la sollicitation provient du retrait de dessiccation, les deux premières parties de l'étude portaient sur l'influence des paramètres étudiés sur le retrait de dessiccation.

La formulation de mortiers (dérivés d'une composition de mortier normalisé) a permis de raccourcir la durée des essais de retrait – donc d'élaborer un programme expérimental plus complet – et en même temps d'amplifier les effets, dans la mesure où la particularité des granulats recyclés réside dans la présence de pâte et mortier du béton origine.

- Le taux de saturation initial des sables et graviers affecte de manière significative la résistance des mortiers et bétons mais pas l'amplitude du retrait.
- L'amplitude du retrait augmente avec la proportion de granulats recyclés. La variation est particulièrement importante dans le cas des mortiers, pour des taux de substitution compris entre 50 et 100 %. Cependant l'influence de ce paramètre sur la résistance mécanique reste limitée.

Ces variations peuvent être interprétées par les courbes de distribution porale (ou de façon plus globale par le diamètre moyen des pores). Ainsi le taux de saturation initial des granulats influence le rapport Eau efficace (réel)/Ciment de la pâte de ciment et sa mésoporosité, laquelle a une influence sur la résistance mécanique mais pas sur le retrait car les ménisques sollicités lors du séchage correspondent à des diamètres inférieurs (microporosité). De plus le taux de saturation initial ne semble pas affecter la microporosité. En revanche, la proportion de granulats recyclés conditionne directement la proportion de pâte d'origine dans le nouveau béton. L'augmentation du taux de substitution se traduit donc par une augmentation de la microporosité (dans laquelle se développe la dépression capillaire), d'où l'influence observée sur le retrait. Par ailleurs, si les granulats recyclés sont initialement saturés, leur influence sur la microstructure de la nouvelle pâte de ciment – donc la résistance mécanique – semble relativement faible. La résistance intrinsèque des granulats recyclés est plus faible mais cet effet pourrait être partiellement compensé par une cure interne.

L'essai de retrait empêché à l'anneau permet d'obtenir directement l'évolution de la sensibilité à la fissuration en fonction des paramètres de formulation. Les calculs viscoélastiques des contraintes développées dans l'anneau permettent de comprendre la contribution des différents phénomènes et propriétés : retrait, module élastique, résistance mécanique, et surtout la relaxation.

Pour analyser l'évolution de la sensibilité à la fissuration des bétons recyclés nous avons utilisé deux approches. La première est une approche expérimentale (essai à l'anneau) les contraintes dans le béton sont obtenues par transformation linéaire des déformations dans l'acier (HOSSAIN AND WEISS, 2004). La classification des bétons vis-à-vis de la sensibilité à la fissuration se fait par un seul critère qui est l'âge de fissuration, ce dernier n'est pas suffisant d'où la nécessité de l'utilisation d'une deuxième approche basée sur le calcul viscoélastique.

Cette dernière permet l'évaluation de l'évolution du module différé du béton, à partir des données expérimentales des retraits libre et empêché et du module. Par conséquent les contraintes réelles dans le béton peuvent être déduites et le risque de fissuration expliqué.

La sensibilité à la fissuration n'évolue pas de façon monotone avec la proportion de granulats recyclés. Elle dépend de l'évolution contradictoire de propriétés telles que le retrait et le module élastique, et de la contribution de la relaxation. Pour les bétons de classe C25/30 visée, pour un taux de saturation initial donné (30 % et 100 % de l'état saturé – surface sèche), la sensibilité à la fissuration est maximale pour une proportion de 30 % de graviers recyclés. Entre 30 et 100 %, la sensibilité à la fissuration semble diminuer avec l'augmentation du taux de substitution. Cette tendance a été observée au niveau du chantier expérimental de Chaponost (De Larrard et al., 2015) mené dans le cadre du PN RECYBETON.

Par rapport à l'effet du taux de substitution des graviers naturels par les granulats recyclés, l'influence du taux de saturation initial est relativement faible. Ceci peut être interprété par l'absorption relativement rapide des graviers utilisés au cours de la fabrication du béton et l'influence très limitée, dans cette étude, du taux de saturation initial des graviers sur l'amplitude du retrait.

Références

- ACI 209. *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*; 2008.
- Almudaiheem, J.; Hansen, W. Effect of Specimen Size and Shape on Drying Shrinkage of Concrete. *ACI Mater. J.* **1987**, *84* (2), 130–135.
- Baroghel-Bouny, V.; Godin, J. Experimental Study on Drying Shrinkage of Ordinary and High-Performance Cementitious Materials. *Concr. Sci. Eng.* **2001**, *3* (March), 13–22.
- Bendimerad, A. Z. Comportement Au Jeune Âge et Différé Des Bétons Recyclés : Influence de La Saturation Initiale En Eau et Du Taux de Substitution, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2016.
- Grasley, Z. C.; Dambrosia, M. D. Viscoelastic Properties and Drying Stress Extracted from Concrete Ring Tests. *Cem. Concr. Compos.* **2011**, *33* (2), 171–178.
- Hansen, C. T.; Mattock, A. H. Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete. *J. Am. Inst.* **1966**, *No 63-10*, 267–290.
- Hassanzadeh, H.; Pooladi-darvish, M. Comparison of Different Numerical Laplace Inversion Methods for Engineering Applications. *Appl. Math. Comput.* **2007**, *189*, 1966–1981.
- Hossain, A. B.; Weiss, J. Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens. *Cem. Concr. Compos.* **2004**, *26*, 531–540.
- Khelidj, A.; Loukili, A. Etude Expérimentale Du Couplage Hydro-Chimique Dans Les Bétons En Cours de Maturation: incidence Sur Les Retraits. *Mater. Struct.* **1998**, *31*, 588–594.
- De Larrard, F.; Dao, D.; Rogat, D. *Recyclage Du Béton Dans Le Béton. Le Chantier Expérimental de Chaponost (Rhône)*. RGRA N°924; 2015.
- Samouh, H. Evaluation de La Sensibilité À La Fissuration Des BAP: Apport de L'analyse Du Comportement Viscoélastique. In *Prix jeune chercheurs "René houpert"*. ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015; 2015a; p 8.
- Samouh, H. Nouvelles Approches Des Relations Entre Formulation et Comportement Différé Des Matériaux Cimentaires : Application Aux Bétons Autoplaçants, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2015b.
- Sedran, T. *Mise Au Point Des Formules de Béton de Référence, PN RECYBETON.*; 2013.
- Turcry, P.; Loukili, A.; Haidar, K.; Pijaudier-cabot, G.; Belarbi, A. Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage : Experimental Study and Modeling. *J. Mater. Civ. Eng.* **2006**, *9*.

R. Cortas, "Nouvelle approche expérimentale pour la maîtrise de la fissuration du béton jeune : influence de la nature et de la saturation des granulats", Thèse de doctorat de l'École Centrale de Nantes et de l'Université Libre de Bruxelles, 2012.

R. Cortas, E. Rozière, S. Staquet, A. Hamami, A. Loukili, M.-P. Delplancke-Ogletree, Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age, *Cement & Concrete Composites*, 50, p. 1–9, 2014.

A. Darquennes, M.I.A. Khokhar, E. Rozière, Ph. Turcry, A. Loukili, F. Grondin, "Long-term deformations and cracking risk of concrete with high content of mineral additions", *Materials and Structures*, 2012.

E. Rozière, S. Granger, Ph. Turcry, A. Loukili, "Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Composites*, vol 29, pp. 626-636, 2007.

J. Saliba, E. Rozière, F. Grondin, A. Loukili, "Influence of shrinkage reducing admixture on plastic and long term shrinkage", *Cement and Concrete Composites*, 33 (2), p. 209-217, 2011.