

Douai, France  
5-6 Novembre 2015

## **INFLUENCE DU DEGRÉ DE SATURATION INITIAL DES GRANULATS RECYCLÉS SUR LES CARACTÉRISTIQUES DE LA PÂTE CIMENTAIRE À L'ÉTAT FRAIS : CONSÉQUENCES SUR LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON RECYCLÉ**

SOUCHE Jean-Claude<sup>A</sup>, SALGUES Marie<sup>A</sup>, DEVILLERS Philippe<sup>B</sup>, GARCIA-DIAZ Eric<sup>A</sup>

A Centre des Matériaux de Mines d'Alès (C2MA) Rue Jules Renard 30100 Alès

B Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier (ENSAM)

### **RESUMÉ:**

Dans une démarche de valorisation des déchets, les granulats recyclés sont introduits dans la formulation des bétons pour donner naissance à de nouveaux matériaux : les bétons recyclés.

Dans cette étude, l'effet du degré de saturation initial des granulats recyclés sur les comportements du béton est observé expérimentalement et analysé.

Deux bétons avec des rapports eau/ciment différents ont été testés en conditions endogènes ainsi qu'en dessiccation (vitesse de vent égale à 8 m/s). L'absorption d'eau des granulats recyclés est comparée et mise en relation avec la rhéologie et la résistance mécanique des bétons recyclés.

Les résultats expérimentaux soulignent la capacité des granulats recyclés partiellement saturés à capter rapidement l'eau contenue dans la pâte de ciment, modifiant ainsi fortement le rapport E/C et les propriétés rhéologiques du béton.

Après saturation en eau, les granulats peuvent libérer de l'eau dans la pâte de ciment si les conditions de séchage conduisent à un manque d'eau dans le béton. Ce phénomène de transfert hydrique dû à l'absorption des gravillons recyclés impacte également les résistances à la compression à 28 jours des bétons durcis.

**MOTS CLES :** Bétons recyclés, absorption d'eau, propriétés rhéologiques, séchage sous vent, cure interne, transferts hydriques

---

## 1. INTRODUCTION

Dans le contexte du développement durable, le recyclage des déchets de chantiers de construction et de démolition devient une nécessité pour préserver les ressources minérales non renouvelables et pour minimiser l'emprise foncière des lieux de stockage. Le projet national RECYBETON a pour but de lever les verrous scientifiques qui s'opposent à une utilisation usuelle sur chantiers de granulats recyclés au sein des bétons. (PN RECYBETON 2011). En effet, les granulats recyclés sont composés de deux parties : les granulats naturels et le mortier adhérent du béton de première génération.

La part de mortier du béton "parent" varie entre 20 et 60% en fonction de la taille des granulats. Par conséquent, les gravillons recyclés ont une masse volumique plus faible que les graviers naturels, -9% environ (Hansen 1992), (Sanchez de Juan & Alaejos Gutierrez 2004)). Les gravillons recyclés sont également plus poreux. (Etxeberria larranaga 2004), (Brito & Alves 2010), (DAO 2012), (Pepe 2014). La qualité du granulat et du mortier du béton de première génération conditionnent les caractéristiques du béton recyclé. (Brito et al 2010), (Poon & Chan 2006), (Li 2008), (Chakradhara Rao et al. 2010).

Cet article a pour but de mesurer l'influence des propriétés des gravillons recyclés et en particulier leur absorption sur le béton recyclé obtenu. L'effet de la pré-saturation des gravillons recyclés sera testé en conditions endogènes et sous séchage. L'évaluation et la compréhension des transferts hydriques entre les gravillons recyclés et la pâte de ciment en fonction du temps est proposée dans les conditions d'essais. Cette étude conclut sur les impacts des granulats recyclés et de leur niveau de pré-saturation sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques du béton recyclé obtenu.

## 2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

### 2.1 L'eau dans le béton

Les gravillons recyclés ont de fortes capacités d'absorption d'eau, de 5,6 à 5,8 % respectivement pour les fractions granulaires 4-10 et 10-20. (Sedran 2013). L'absorption d'eau des granulats recyclés est un paramètre déterminant de la formulation des bétons. De plus, initialement, ces granulats peuvent être totalement ou partiellement saturés. Par conséquent, l'emploi de gravillons recyclés modifie la quantité d'eau disponible pour la pâte au cours du temps. Pour clarifier les échanges d'eau entre gravillons et pâte de ciment dans le béton frais, quelques notions doivent être détaillées.

En premier lieu, l'eau de pré-saturation ( $W_{ps}$ ) correspond à la quantité d'eau utilisée pour saturer les granulats recyclés avant l'introduction dans le malaxeur. La quantité maximale d'eau que les gravillons recyclés peuvent absorber correspond à leur absorption nominale ( $A$ ). Les gravillons sont alors dans un état Saturé Surface Sèche (SSS). L'eau d'ajout ( $W_{ad}$ ) est l'eau complémentaire qui est introduite dans le malaxeur au cours du mélange. L'eau disponible pour l'hydratation du ciment est appelée eau efficace ( $W_{eff}$  ou  $E_{eff}$ ). Au final, l'eau totale ( $W_{tot}$ ) introduite dans le malaxeur peut être obtenue par l'équation (1) ci-dessous :

$$W_{tot} = W_{ps}(1A) + W_{eff} = W_{ps} + W_{ad} \quad (1)$$

Lors des expériences, deux degrés de pré-saturation des granulats recyclés sont réalisés. Les gravillons sont pré-saturés soit à leur absorption nominale + 1% (1,2 A), soit partiellement (0,5A). L'eau de pré-saturation est donc variable, en revanche l'eau d'ajout est constante. Ainsi, l'eau totale n'est pas constante pour un béton dont les gravillons ont été pré-saturés à 1,2A ou à 0,5A.

## 2.2 Matériaux et formulations

Deux familles de béton ont été étudiées. Les formulations sont issues du projet national (PN RECYBETON 2011). Une est destinée au bâtiment, elle est nommée B, l'autre est destinée au génie civil, elle est nommée GC (Sedran 2013). Les rapports E/C respectifs sont 0,6 et 0,45. Des granulats naturels, sables et graviers, sont utilisés pour réaliser des bétons témoins (BN et GCN). En parallèle, un mélange de sable naturel et de graviers recyclés est employé pour formuler des bétons recyclés (BR and GCR). Le tableau 1 récapitule la nomenclature des bétons étudiés.

Désignation des bétons	Classes de résistance	Pourcentage de gravillons recyclés (%)	Degré de pré-saturation des gravillons recyclés
BN	C25-30	Sable 0 - Graviers 0	-
BR 1.2A		Sable 0 - Graviers 100	1.2A (SSD + 1%)
BR 0.5A			0.5A (50% SSD)
GCN	C35-45	Sable 0 - Graviers 0	-
GCR 1.2A		Sable 0 - Graviers 100	1.2A (SSD + 1%)
GCR 0.5A			0.5A (50% SSD)

Tableau.1. Nomenclature des bétons étudiés

Tous les bétons sont formulés avec un ciment Portland CEM II/A-L 42,5 N de Rochefort en France. Les formulations testées sont résumées dans le tableau 2.

Constituants (Kg/m <sup>3</sup> )	BN	BR 1.2A	BR 0.5A	GCN	GCR 1.2A	GCR 0.5A
Ciment Holcim CEM II/A-L 42,5 N	270	282	282	299	336	336
Filler calcaire	45	31	31	58	53	53
Sable 0/4	780	806	806	771	782	782
Graviers naturels 4/10	266	-	-	264	-	-
Graviers recyclés 4/10	-	163	163	-	158	158
Graviers naturels 6,3/20	820	-	-	810	-	-
Graviers recyclés 10/20	-	701	701	-	682	682
Superplastifiant	1.35	1.40	1.40	2.10	2.18	2.18
Eau efficace initiale	166	174	174	151	156.8	156.8
Eau de pré-saturation des graviers recyclés 4/10	-	10.76	4.56	-	10.43	4.42
Eau de pré-saturation des graviers recyclés 10/20	-	47.67	20.33	-	46.38	19.78

Tableau.2. Formulation des bétons des familles B (classe C25/30) et GC (classe C35/45)

Le liant équivalent ( $L_{eq}$ ) est défini conformément à la norme EN 206 comme la somme massique du ciment et de 25 % du filler calcaire.

## 2.3 Conditions expérimentales

Les essais sont réalisés en conditions endogènes et sous dessiccation. Dans ce dernier cas, le banc de séchage développé par (Mbemba-kiele 2010) a été adapté pour simuler un séchage sévère (8 m/s or 29 km/h). La pièce est régulée en température à  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  et en hygrométrie à  $50 \text{ } \% \text{ RH} \pm 4 \text{ } \%$ .



Figure 1. Banc de séchage, vue de face et vue générale

## 2.4 Essais réalisés

### 2.4.1 Teneur en eau des gravillons

L'objectif de ces essais est d'évaluer les transferts hydriques entre les gravillons recyclés et la pâte de ciment en fonction du temps et des conditions d'essai. Le protocole expérimental est inspiré des travaux de Bello (Bello 2014) relatifs aux granulats légers et est explicité sur la figure 2.

A la sortie du malaxeur, le béton est conservé au sein d'un moule spécifique, en conditions endogènes ou de dessiccation, comportant 12 alvéoles identiques de  $2000 \text{ cm}^3$  chacune. A différentes échéances, environ 2 litres de béton sont manuellement prélevés puis tamisés afin de séparer les gravillons de la pâte de ciment. Les gravillons humides sont pesés puis séchés à l'étuve à  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 2 heures. A l'issue de ce traitement, les gravillons refroidis sont à nouveau pesés. La différence entre les deux pesées donne la masse d'eau contenue dans les gravillons.




1 : Tamisage ( $\phi = 5\text{mm}$ )	2 : Pesée1	3 : Etuve at $105^\circ\text{C}$	4 : Pesée2
		Gravillons recyclés au séchage	

Figure.2. protocole de séparation des graviers et de la pâte de ciment, puis d'évaluation de la quantité d'eau contenue dans les graviers.

### 2.4.2 Comportement rhéologique du béton frais

L'ouvrabilité du béton frais est mesurée conformément à la norme NF EN 206-1. Le suivi de l'affaissement au cours du temps (toutes les 10 mn) permet de mesurer le raidissement du béton. Avant chaque essai au cône le béton est malaxé à nouveau pendant 15 secondes.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Evaluation des transferts hydriques entre pâte de ciment et gravillons

Les figures 3 et 4 montrent les transferts hydriques pour les bétons recyclés de bâtiment. Le comportement de ces bétons varie en fonction du degré initial de saturation des gravillons et des conditions d'exposition.

Dans le malaxeur, les granulats initialement saturés à 50 % absorbent l'eau destinée à l'hydratation de la pâte. A l'issue du malaxage, les gravillons sont saturés à 90%. Leur absorption se poursuit pendant les 30 premières minutes pour atteindre leur absorption nominale conformément à la figure 3. En revanche, les granulats initialement pré-saturés à 1.2A n'absorbent pas d'eau dans la pâte conformément à la figure 4.

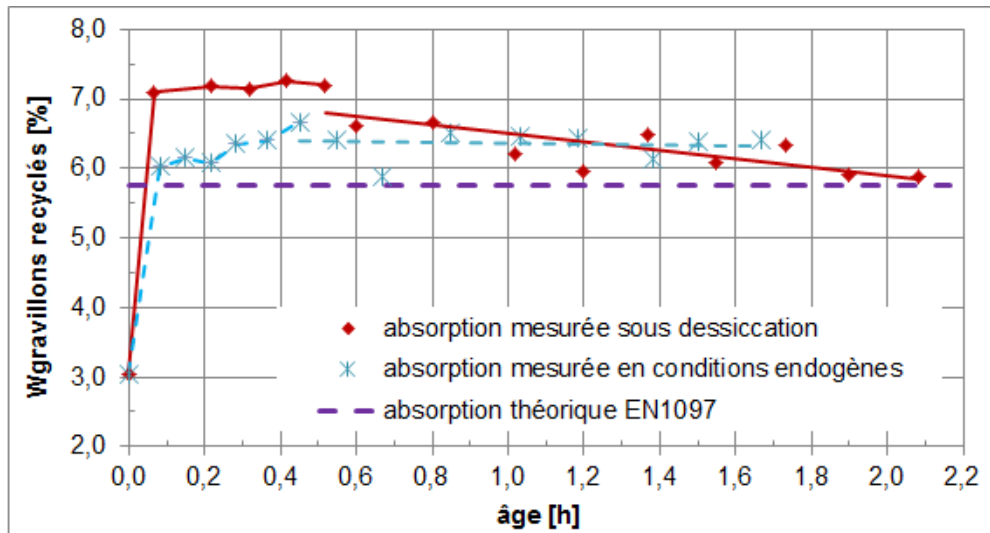


Figure.3. Teneur en eau des gravillons du béton BR0.5A sous séchage ou en conditions endogènes

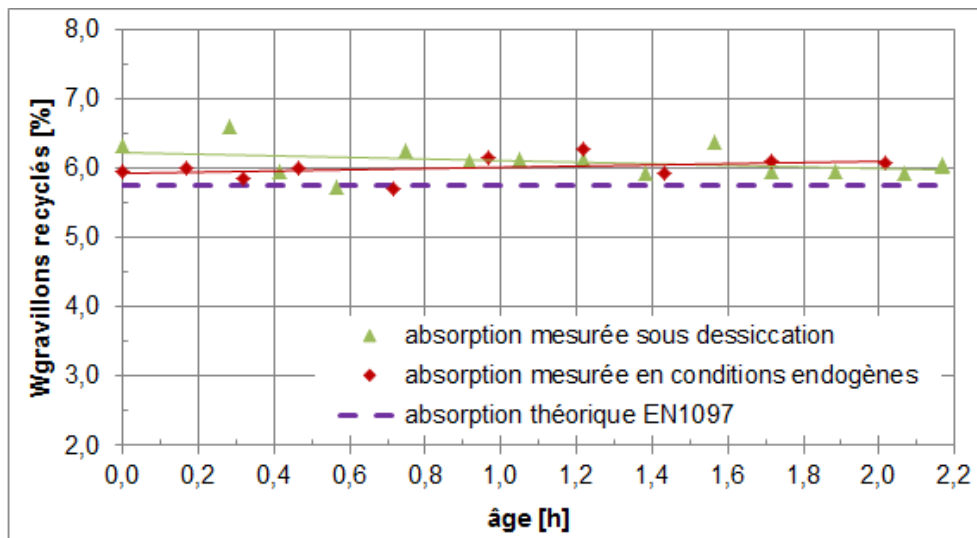


Figure.4. Teneur en eau des gravillons du béton BR1,2A sous séchage ou en conditions endogènes

Après ces 30 minutes, sous des conditions de dessiccation défavorables, les gravillons du béton BR0,5A relèguent de l'eau dans la pâte de ciment d'après la figure 3.

Le fort taux d'évaporation, de l'ordre de 1,08 Kg/m<sup>2</sup>/h (ACI305R-91 1999), induit un manque d'eau dans la pâte de ciment pallié en partie par un transfert d'eau des granulats vers la pâte  
 Les gravillons recyclés agissent donc comme réservoirs d'eau tampons pour la pâte de ciment. En conditions endogènes ou lorsque la quantité d'eau est suffisante dans la pâte, ce phénomène n'est pas observable (figure 3 et 4).

La variation volumique d'eau au sein des gravillons, de la pâte et du béton BR0,5A soumis à forte dessiccation (figure.5) permet d'identifier plusieurs phases :

- Dès le début du séchage (0,12 heure), le béton perd continuellement de l'eau avec un flux massique d'évaporation surfacique constant égal à 1,08 kg / m<sup>2</sup> / h,
- Pour la pâte de ciment et les granulats recyclés :
  - Pendant la première demi-heure, la pâte fournit de l'eau aux gravillons recyclés jusqu'à atteindre l'absorption nominale,
  - Puis après 0,5 heure, du fait du séchage le béton perd de l'eau provenant à la fois de la pâte mais également des gravillons recyclés comme le montre la figure 5 ci-dessous.

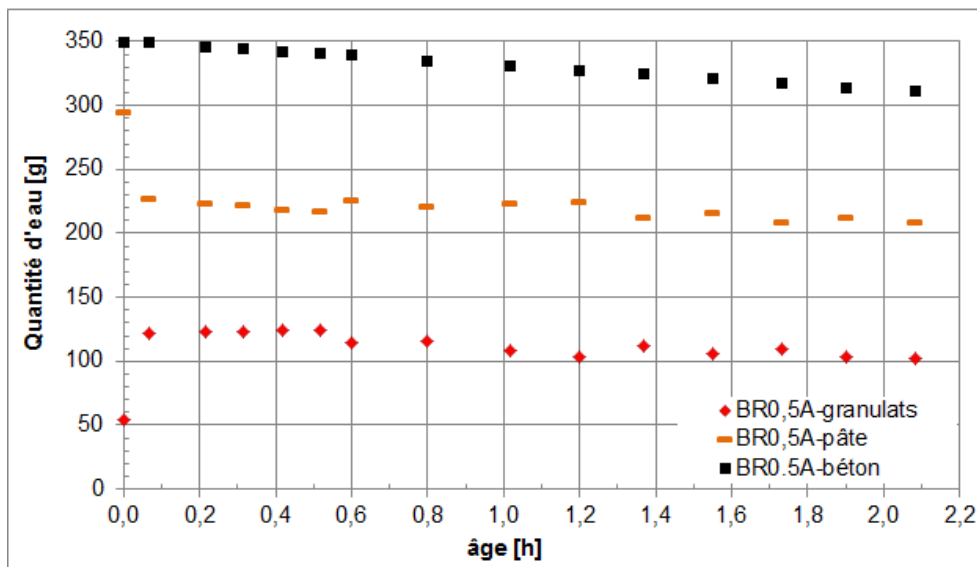


Figure.5. Variation de volume d'eau dans le béton, la pâte et les gravillons recyclés en fonction du temps, BR0,5A.

Pour les bétons de génie civil testés, les résultats sont similaires à ceux des bétons de bâtiment exposés ci-dessus.

### 3.2 Ouvrabilité du béton frais

Les résultats des essais d'affaissement au cône qui sont présentés dans le tableau 3.

Valeurs d'essais d'affaissement au cône (cm)	BR 1,2A	BR 0,5A	GcR 1,2A	GcR 0,5A
Sortie du malaxeur (t <sub>0</sub> )	21,5	18	20	17
t <sub>0</sub> + 10mn	19,5	16,4	16,2	2,5

Tableau.3. variation des valeurs des essais d'affaissement en fonction du temps, bétons recyclés

En sortie de malaxeur, les bétons BR0.5A et GCR0.5A ont un affaissement plus faible que les bétons BR1.2A et GCR1.2A. En effet, l'absorption d'eau dans la pâte de ciment entraîne une chute du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  qui a pour conséquence une perte d'ouvrabilité (Kou 2006), (Yong et al 2009), (Xiao et al. 2012).

Pendant les dix premières minutes, le degré de saturation des gravillons recyclés a un impact modéré sur les variations d'affaissement au cône pour les bétons BR1,2A, BR0,5A, GcR1,2A. A cet âge,  $t_0+10$  mn, les transferts hydriques entre gravillons et pâte sont en grande partie réalisés et le vieillissement de la pâte de ciment contrôle les variations d'ouvrabilité.

Pour béton GCR0,5A initialement peu dosé en eau, l'absorption des gravillons recyclés peut contribuer à la chute brutale de la valeur d'affaissement entre  $t_0$  et  $t_0+10$  mn. Néanmoins, ce seul paramètre ne justifie pas une telle perte d'affaissement.

### 3.3 Impact des gravillons recyclés sur les résistances mécaniques du béton

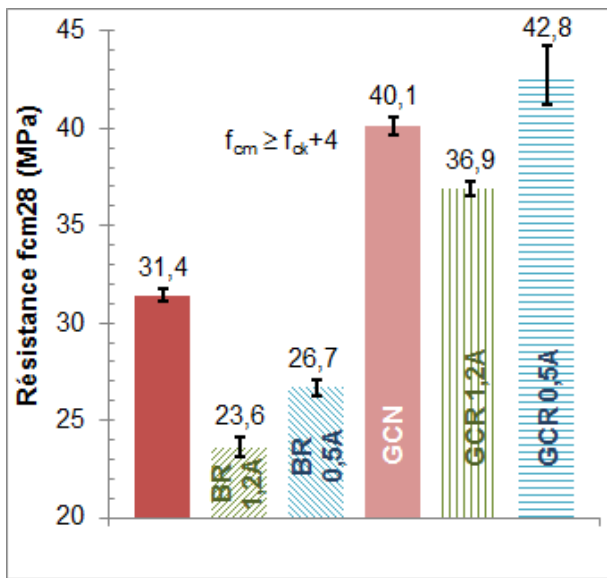


Figure.6. Résistance à la compression à 28 jours

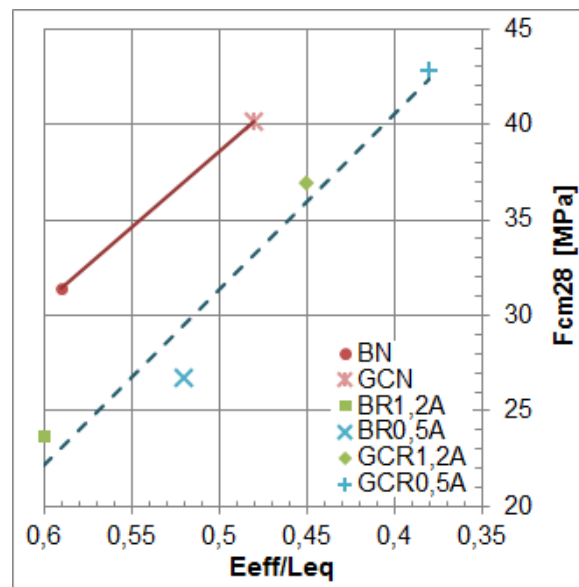


Figure.7. Résistances mécaniques en fonction du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  ratio

La figure 6 met en lumière une chute des résistances mécaniques des bétons recyclés par rapport aux bétons à base de granulats naturels, ce qui est en accord avec la littérature (Poon et al. 2004), (Kou et al. 2011). Des paramètres comme l'eau efficace, la compacité du squelette (+4% pour les bétons naturels) ainsi que la nature ou la forme des gravillons peuvent être à l'origine de ces variations de résistances.

A compacité identique, les bétons BR0,5A et GCR0,5A ont toujours de meilleures résistances à la compression que les bétons BR1,2A and GC1,2A (environ 15% de plus). L'amélioration des caractéristiques mécaniques peut être expliquée par la modification du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  pour les bétons recyclés (absorption des gravillons). En effet, dans le malaxeur, l'eau absorbée qui est prise à la pâte réduit le rapport  $E_{eff}/L_{eq}$ , conformément aux valeurs précisées dans le tableau 4.

Rapport $E_{eff}/L_{eq}$	BR1,2A	BR0,5A	GCR1,2A	GCR0,5A
En entrée de malaxeur	0,6	0,6	0,45	0,45
En sortie de malaxeur	0,6	0,52	0,45	0,38

Tableau.4. variation du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  en entrée et en sortie de malaxeur pour les bétons recyclés

Dans cette étude, le béton recyclé GC0,5A a une meilleure résistance à la compression à 28 jours que le béton témoin correspondant (+ 6,7 %). Ce cas particulier peut résulter de la baisse du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  due à l'absorption des gravillons mais aussi de la plus grande quantité de ciment mise en œuvre dans les formulations de bétons recyclés (Hansen 1992), (Xiao et al. 2012).

La figure 7 donne les résistances mécaniques à la compression des bétons en fonction des rapports  $E_{eff}/L_{eq}$  calculés en sortie de malaxeur. A partir de ces courbes, une analyse inverse permet de calculer les coefficients  $K_g$  and  $K_b$  issus des formules de Feret et de Bolomey comme indiqués dans le tableau 5.

Coefficients de Feret et de Bolomey	Bétons naturels	Bétons recyclés
$K_g$	5,1	4,4 ± 0,3
$K_b$	0,53	0,46 ± 0,2

Tableau.5. Coefficients de Feret et de Bolomey pour les bétons naturels et recyclés

Les coefficients  $K_g$  obtenus par calcul inverse pour les bétons naturels ou recyclés sont du même ordre (15 % d'écart) que ceux considérés par Sedran dans le rapport de formulation du projet national RECYBETON (Sedran, 2013). Les valeurs obtenues mettent en évidence que les gravillons recyclés ont des caractéristiques inférieures à celles des gravillons naturels. La qualité de l'adhérence pâte de ciment/gravillons est assurée dans les deux cas mais elle se traduit par une dégradation parfois importantes des résistances mécaniques (-25 % pour le béton BR1,2A comparé au béton BN).

#### 4. CONCLUSIONS

Dans cet article, l'effet du degré de saturation initial des granulats recyclés est étudié. Son impact est mesuré à travers les transferts hydriques entre gravillons recyclés et pâte de ciment, l'ouvrabilité du béton frais et les résistances mécaniques à 28 jours du béton durci.

1 – Les transferts hydriques au sein du béton sont mesurés et quantifiés. Les gravillons recyclés partiellement saturés (0.5) prennent de l'eau à la pâte essentiellement dans le malaxeur et pendant la première demi-heure pour atteindre leur absorption nominale. En revanche, les gravillons recyclés à l'état SSS+1% n'échangent pas d'eau avec la pâte durant le malaxage. Sous des conditions de dessiccation sévère, les granulats des bétons BR0,5A et GC0,5A peuvent rendre de l'eau à la pâte au cours du temps.

2 – La capacité d'absorption des gravillons recyclés entraîne une évolution du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  dans le temps. Cette potentielle perte d'eau efficace a un effet direct sur l'ouvrabilité des bétons à très jeune âge.

3 – D'une manière générale, les bétons recyclés qui comportent 100 % de gravillons recyclés sont moins résistants que les bétons témoins. Cependant, la réduction du rapport  $E_{eff}/L_{eq}$  induite par l'absorption d'eau des gravillons recyclés (0.5A) conduit à une amélioration des résistances mécaniques.

Cette étude sera à poursuivre avec l'évaluation de l'impact du degré initial de saturation des gravillons recyclés sur le retrait plastique et sur la fissuration du béton au très jeune âge.

#### 5. RÉFÉRENCES :

ACI305R-91, 1999. *ACI Manual on concrete practice part 2 "Construction practices and inspection pavements"* ACI, ed.,



- Bello, L., 2014. *Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons légers autoplaçants durables*. Ecole des Mines d'Alès - Ecole Doctorale I2S Mécanique et Génie civil.
- Brito, J. & Alves, F., 2010. Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research. *Materials and Structures*, 43(S1), pp.35–51.
- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S.K. & Barai, S. V., 2010. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44(1), pp.205–220. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-010-9620-x> [Accessed June 19, 2013].
- DAO, D.-T., 2012. *(Multi-) recyclage du béton hydraulique*. Ecole Centrale de Nantes.
- Etxeberria larranaga, M., 2004. *Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete*. Universitat Politècnica de catalunya.
- Hansen, T.C., 1992. *Recycling of demolished Concrete and Masonry*,
- Kou, S., 2006. *Reusing recycled aggregates in structural concrete*. The Hong Kong Polytechnic University.
- Kou, S., Poon, C. & Etxeberria, M., 2011. Cement & Concrete Composites Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), pp.286–291. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.003>.
- Li, X., 2008. Recycling and reuse of waste concrete in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), pp.36–44. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344908001456> [Accessed May 21, 2013].
- Mbemba-kiele, E., 2010. *Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge*. Ecole centrale de Nantes.
- Pepe, M., 2014. *A conceptual model to design recycled aggregate concrete for structural applications*. Università degli studi di Salerno.
- PN RECYBETON, 2011. *( RECYclage complet des BETONs )*,
- Poon, C.S. et al., 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), pp.31–36. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603001868> [Accessed February 14, 2014].
- Poon, C.-S. & Chan, D., 2006. The use of recycled aggregate in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50, pp.293–305.
- Sanchez de Juan, M. & Alaejos Gutierrez, P., 2004. Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In *RILEM Conf on the Use of Recycled materials in building and Structures*. pp. 0–9.
- Sedran, T., 2013. *Mise au point des formules de béton de référence*,
- Xiao, J. et al., 2012. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Construction and Building Materials*, 31, pp.364–383. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811007641> [Accessed May 21, 2013].
- Yong, P.C. & Teo, D.C., 2009. Utilisation of Recycled Aggregate as Coarse Aggregate in Concrete. *UNIMAS E-Journal of Civil Engineering*, 1(1), pp.1–6.