

---

# Absorption d'eau par des granulats de béton recyclés modèles immergés dans une pâte de filler

Houda MAIMOUNI<sup>1,2</sup>, Sébastien REMOND<sup>1</sup>, Florian HUCHET<sup>2</sup>, Patrick RICHARD<sup>2</sup>, Vincent THIERY<sup>1</sup>, Yannick DESCANTES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 - LGCgE, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

<sup>2</sup> IFSTTAR, MAST dpt, GPEM, CS4, 44344 Bouguenais, France

---

**RÉSUMÉ.** L'intérêt accru pour le recyclage du béton est né d'une volonté d'inscrire le secteur du BTP dans une logique de développement durable. Les granulats de béton recyclés (GBR) sont constitués de granulats naturels et de pâte de ciment adhérente à l'état durci. Ces granulats sont beaucoup plus poreux que les granulats naturels et absorbent une quantité d'eau importante lorsqu'ils sont mélangés avec une pâte de ciment fraîche. L'échange d'eau entre GBR et pâte de ciment à l'état frais modifie l'eau efficace du béton au détriment de ses performances à l'état frais et durci et doit être étudié. Un protocole expérimental original basé sur des mesures d'étalement de mortier est proposé pour suivre le transfert d'eau entre GBR initialement secs et pâte de ciment environnante. Ce protocole est testé sur des sables de pâte de ciment (63 µm/4 mm) à E/C égal à 0,3, 0,5 et 0,7 immergés dans une pâte de filler. Les résultats montrent que les granulats modèles immergés dans une pâte de filler pendant une période de 90 minutes restent non saturés. Le degré de saturation atteint par les granulats de pâte de ciment augmente avec le E/C de la pâte.

**ABSTRACT.** The increased interest in concrete recycling results from a willingness to reconcile construction industry with sustainability. Recycled concrete aggregates (RCA) consist of a mix of natural aggregates and attached mortar. These aggregates are more porous than their natural counterparts and absorb an important amount of water when mixed to a fresh cement paste. Water exchange between RCA and fresh cement modifies the effective water content of a recycled concrete at the expense of fresh state performances and should therefore be studied. An original testing method based on spread measurements is suggested to follow quantitatively water transfer from a fresh paste to initially dry aggregates. This protocol is tested on cement paste sands (63 µm/4 mm) with a 0.3, 0.5 and 0.7 W/C immersed in a limestone filler paste. Results show that the cement paste sands remains unsaturated when immersed in a limestone filler paste during 90 minutes. The saturation degree of cement paste sands increases with their water-to-cement ratio.

**MOTS-CLÉS :** sable recyclé, pâte de filler, pâte de ciment, transfert d'eau, absorption, étalement.

**KEY WORDS :** recycled sand, filler paste, cement paste, water transfer, absorption, spread.

---

## 1. Introduction

Les granulats de béton recyclés (GBR) sont constitués d'un mélange intime entre granulats naturels et pâte de ciment adhérente à l'état durci. Les GBR sont beaucoup plus poreux que les granulats naturels et absorbent une quantité d'eau importante lorsqu'ils sont immergés dans l'eau (environ 9% de la masse sèche [1]). L'absorption d'eau par les GBR en phase de malaxage modifie l'eau efficace du béton recyclé et doit être mesurée afin de prédire avec précision le rapport  $E_{\text{eff}}/C$  d'un béton recyclé. L'eau efficace est l'eau totale présente dans le béton diminuée de l'eau absorbée par les granulats. Une mauvaise évaluation de l'absorption d'eau par les GBR se traduit par une mauvaise estimation du rapport  $E_{\text{eff}}/C$  de la matrice cimentaire. Ceci a des conséquences sur la fluidité du béton et sur ses propriétés mécaniques à l'état durci [2]. Pour corriger l'absorption d'eau par les GBR, il est d'usage dans l'industrie de supposer que l'absorption d'eau mesurée selon la norme NF EN 1097-6 est égale à leur absorption en phase de malaxage du béton. Or, LE et al. [1] montrent que les GBR absorbent dans une pâte de ciment une quantité d'eau inférieure à leur absorption normalisée ( $WA_{24h}$ ).

L'objectif de ce travail est de répondre à la problématique de suivi de transfert d'eau entre matrice cimentaire à l'état frais et granulats de béton recyclé initialement secs au cours du malaxage. Premièrement, les matériaux modèles et protocoles utilisés seront présentés. La méthode expérimentale mise au point pour mesurer l'absorption d'eau par des granulats modèles immergés dans une pâte sera ensuite présentée. La dernière partie

sera dédiée à la présentation des résultats de mesures d'étalement des mortiers contenant les granulats modèles et d'absorption de ces granulats immergés dans la pâte. Les conclusions et perspectives de ce travail seront enfin présentées.

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1. Matériaux

Les GBR modèles sont constitués de 3 sables de pâte de ciment matures concassées à E/C égal à 0.3, 0.5 et 0.7 (notés respectivement SPC3, SPC5 et SPC7). Pour cela, un ciment CEMI 52.5N de l'usine Lafarge est utilisé. Les sables récupérés ont des courbes granulométriques similaires et une taille comprise entre 63  $\mu\text{m}$  et 4 mm avec un diamètre médian  $d_{50}$  autour de 2 mm. Une pâte de filler modélise la pâte de ciment fraîche pendant la période dormante. Le filler utilisé est un filler calcaire Betocarb HP-OG (Omya, Orgon). L'homogénéité des pâtes de ciment préparées a été vérifiée et les caractéristiques des SPC sont donc mesurées sur la fraction (4 mm/10 mm) selon la norme NF EN 1097-6 et par porosimétrie au mercure (**Tableau 1**). Ici, La masse volumique réelle est le rapport entre masse sèche et volume solide plus volume des pores, y compris celui des pores non accessibles.

**Tableau 1.** Absorption d'eau, porosité et masse volumique réelle de granulats de pâte de ciment (4/10 mm) à différents E/C mesurées selon la norme NF EN 1097-6. Porosité et masse volumique réelle des pâtes de ciment mesurées avec le porosimètre à intrusion de mercure (MIP). L'écart-type est calculé à partir de 3 mesures répétitives.

E/C	NF EN 1097-6			MIP	
	WA <sub>24</sub> (%)	Porosité (%)	$\rho_{rd}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)	$\rho_{rd}$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.3	12.9±0.4	25.1±0.5	1.9±0.0	13.2±0.4	1.9±0.0
0.5	23.9±0.2	37.4±0.2	1.6±0.0	23.7±1.7	1.6±0.0
0.7	35.6±0.7	47.1±0.5	1.3±0.0	34.0±0.8	1.3±0.0

### 2.2. Préparation des mortiers

Trois séries de mortiers sont préparées pour étudier l'absorption d'eau par les sables SPC3, SPC5 et SPC7 immergés dans une pâte de filler. La composition des mortiers est présentée sur le **Tableau 2**. L'eau efficace des mortiers à un instant  $t$  ( $E_{\text{eff}}(t)$ ) est la somme de l'eau efficace théorique ( $E_{\text{eff,th}}$ ) et l'eau d'ajustement prévue ( $E_{\text{aj}}$ ) pour atteindre le rapport ( $E_{\text{eff}}/F$ ) voulu. Avant le premier contact des granulats avec la pâte de filler ( $t=0$ ), l'eau efficace est juste égale à l'eau de gâchage. Le volume du SPC, la masse de filler et la quantité d'eau efficace théorique sont maintenus constants dans toutes les formulations. L'eau efficace est ajustée en fonction de la teneur en eau du SPC et du rapport  $E_{\text{eff}}/F$  visé. Pour les mortiers fabriqués avec sables secs, l'eau d'ajustement est égale à l'eau absorbée par le SPC selon la norme NF EN 1097-6 ( $E_{\text{aj}}=WA_{24h}m_{\text{SPC}}$ ).  $WA_{24h}$  et  $m_{\text{SPC}}$  sont respectivement le coefficient d'absorption normalisé et la masse sèche du SPC. Pour les mortiers fabriqués avec sables saturés, l'eau d'ajustement est une fraction comprise entre 0 et 50% de l'eau absorbée. L'appellation des mortiers fait référence à l'état de saturation du SPC, le rapport E/C du SPC et la quantité d'eau d'ajustement. Par exemple, D/3 est un mortier fabriqué avec SPC3 sec. S/5/10 est un mortier fabriqué avec SPC5 à l'état initialement saturé, l'eau efficace à  $t=0$  est égal à l'eau efficace théorique plus 10% de l'eau absorbée normalisée. Le diamètre d'étalement des mortiers préparés est mesuré à 6, 15, 30, 45, 60, 75 et 90 minutes à partir du début du malaxage. Avant chaque mesure d'étalement, le mortier est malaxé pendant 4 minutes à 63 trs/min. Un cône MBE est utilisé pour mener les mesures d'étalement selon le protocole décrit dans [3]. L'essai de suivi d'étalement est répété 3 fois sur les mortiers D/3, S/3, D/5, S/5, D/7, S/7 et seulement une fois pour le reste des mortiers.

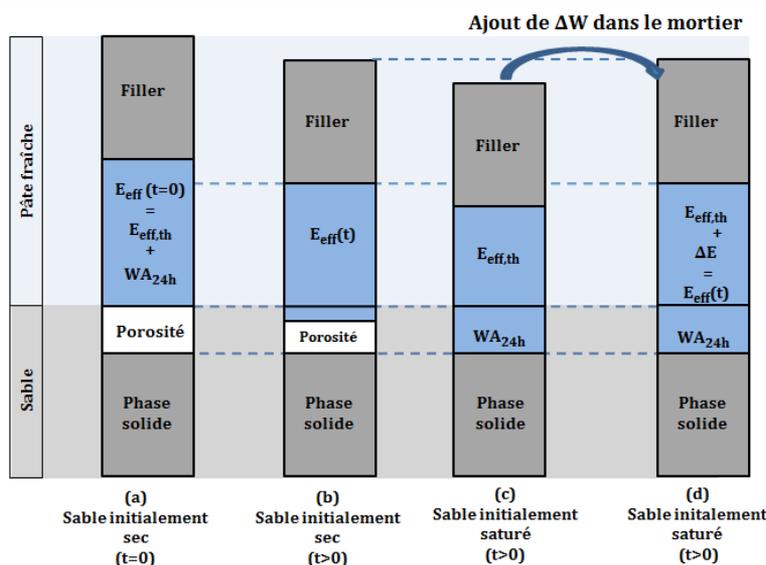
### 2.3. Protocole de suivi de transfert d'eau de la pâte de filler fraîche vers les granulats initialement secs

Le protocole de suivi de transfert d'eau d'une pâte de filler fraîche vers des granulats initialement secs est schématisé sur la **Figure 1**. Deux échantillons identiques du sable testé sont incorporés dans deux mortiers soit à l'état sec (a) soit à l'état saturé (b). Les deux mortiers ont des compositions identiques et diffèrent uniquement sur l'emplacement de l'eau d'absorption qui est présente initialement dans la pâte pour le mortier (a) et dans la porosité interne des granulats pour le mortier (b). Dès le premier contact des granulats secs avec la pâte, une fraction d'eau migre de la pâte vers la porosité interne des granulats initialement secs. La fraction d'eau absorbée est déterminée en rajoutant au mortier fabriqué avec sable saturé (c) la quantité d'eau  $\Delta W$  nécessaire pour donner à ce mortier le même diamètre d'étalement que celui du mortier (b) au même instant  $t$ . Si les mortiers (b) et (d) présentent le même diamètre d'étalement, nous déduisons que les deux mortiers ont la même quantité d'eau

efficace. Ensuite, connaissant l'eau totale du mortier (b), l'eau absorbée par les granulats peut être calculée par différence.

**Tableau 2.** Compositions de mortiers.  $m_{CPS}$ ,  $F$ ,  $E_{eff}$  et  $E_{CPS}$  sont respectivement la masse de sable modèle, la masse de filler, l'eau efficace et l'eau contenue dans la porosité du sable à  $t=0$ .

		$m_{CPS}(g)$	$F(g)$	$E_{eff}(t=0)(g)$	$E_{abs}(t=0)(g)$
Series I	D/3	650	689	408	0
	S/3	650	689	324	84
	S/3/10	650	689	332	84
	S/3/20	650	689	340	84
	S/3/30	650	689	349	84
	S/3/40	650	689	357	84
Series II	D/5	529	689	450	0
	S/5	529	689	324	126
	S/5/10	529	689	336	126
	S/5/20	529	689	349	126
	S/5/30	529	689	362	126
	S/5/40	529	689	374	126
Series III	D/7	447	689	483	0
	S/7	447	689	324	159
	S/7/10	447	689	340	159
	S/7/20	447	689	356	159
	S/7/30	447	689	371	159
	S/7/40	447	689	387	159
	S/7/50	447	689	403	159



**Figure 1.** Illustration schématique de la méthode de suivi de transfert d'eau de la pâte de filler fraîche vers les granulats initialement secs.

### 3. Résultats et conclusions

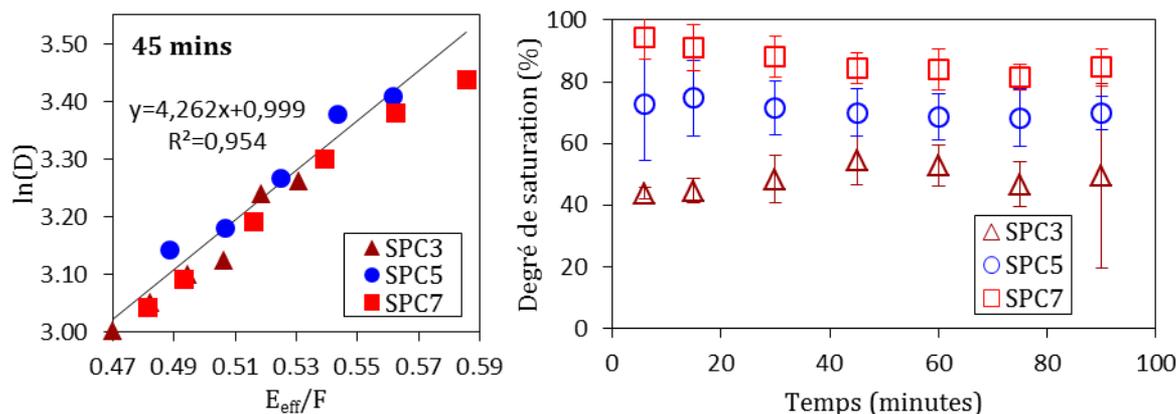
Nous supposons que le sable initialement saturé échange une quantité d'eau négligeable avec la pâte de filler fraîche. Comme l'eau efficace est le seul paramètre qui varie entre les mortiers à base de sables saturés, nous analysons la variation du diamètre d'étalement de ces mortiers en fonction du rapport  $E_{eff}/F$  à chaque échéance de mesure. Sur la Figure 2 (gauche) on peut observer que la variation du logarithme du diamètre d'étalement ( $\ln(D)$ ) en fonction de  $E_{eff}/F$  est linéaire. Cette tendance est observée à chaque instant de mesure quelle que soit la nature du SPC ( $R^2$  compris entre 0.94 et 0.97). La relation empirique entre  $\ln(D)$  et  $E_{eff}/F$  s'écrit :

$$\ln(D) = a(E_{eff}/F) + b \quad (1)$$

a et b sont les coefficients de la droite de régression de  $\ln(D)$  en fonction de  $E_{eff}/F$  et dépendent de l'échéance de mesure. Connaissant le diamètre d'étalement du mortier fabriqué avec SPC initialement sec à chaque instant t, le rapport  $E_{eff}/F$  de ce mortier peut être calculé selon l'équation (1). Enfin, l'eau absorbée par le SPC ( $E_{abs}$ ) peut être déduite de l'eau totale (2). Le degré de saturation des SPC est le rapport entre la quantité d'eau absorbée par le SPC à chaque instant t et la quantité d'eau absorbée normalisée ( $m_{CPS}WA_{24h}$ ) et s'écrit:

$$E_{abs} = E_{tot} - E_{eff} = E_{tot} - F(\ln(D) - b)/a \quad (2)$$

$$S(\%) = E_{abs}/(m_{CPS}WA_{24h}) \quad (3)$$



**Figure 2.** Logarithme du diamètre d'étalement mesuré à 45 minutes en fonction du rapport  $E_{eff}/C$  pour les mortiers incorporant SPC3, SPC5 et SPC7 à l'état saturé (gauche). Evolution temporelle du degré de saturation des SPC initialement secs immergés dans une pâte de filler (droite)

La Figure 2 (droite) montre l'évolution temporelle du degré de saturation des SPC initialement secs. L'absorption d'eau par les sables étudiés est très rapide entre 0 et 6 minutes puis atteint un plateau après 6 minutes. Ce plateau est confirmé par une analyse statistique de la pente de variation du degré de saturation. Nous observons également que le degré de saturation reste inférieur à 100% pour les trois sables et augmente avec le E/C de la pâte de ciment constituant les SPC. Plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer l'augmentation du degré de saturation avec le E/C. Si le SPC n'atteint pas la saturation à cause de l'occlusion des pores par des grains de filler, on pourrait s'attendre à ce que ce phénomène ralentisse davantage l'absorption lorsque les pores sont petits. Or il est connu que la taille moyenne des pores des pâtes de ciment pures augmente avec le E/C. Ceci pourrait expliquer les degrés de saturation plus élevés pour les SPC ayant un E/C plus grand. Une deuxième hypothèse pour expliquer cette tendance est l'augmentation de la connectivité du réseau poreux du SPC avec le E/C qui pourrait favoriser un transfert d'eau plus rapide de la pâte de filler vers la porosité interne du SPC.

En conclusion, un protocole expérimental de mesure d'absorption d'eau par un sable fin est mis au point. Ce protocole est testé sur trois sables de pâte de ciment homogènes à E/C égal à 0,3, 0,5 et 0,7. L'examen du diamètre d'étalement des mortiers fabriqués avec ces sables initialement saturés en variant uniquement l'eau efficace permet d'établir une relation empirique entre étalement et rapport  $E_{eff}/F$ . Ensuite, la mesure du diamètre d'étalement du mortier fabriqué avec sable sec permet de déduire la quantité d'eau absorbée par le sable sec à l'échéance de mesure. Les résultats montrent que le degré de saturation des SPC est d'autant plus grand que leur porosité est grande et reste inférieur à l'unité. En perspective, ce protocole peut être testé sur des granulats homogènes initialement partiellement saturés ou des GBR industriels.

## Références

- [LE 16] LE, T., REMOND, S., Le SAOUT, G., & GARCIA-DIAZ, E. (2016). Fresh behavior of mortar based on recycled sand– Influence of moisture condition. *Construction and Building Materials*, 106, 35-42.
- [POO 04] POON, C. S., SHUI, Z. H., LAM, L., Fok, H., & KOU, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and concrete research*, 34(1), 31-36.
- [ROU 05] ROUSSEL, N., & COUSSOT, P. (2005). "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow. *Journal of rheology*, 49(3), 705-718.