

# Evolution de l'eau efficace lors du malaxage du béton de granulats recyclés

Eliane Khoury<sup>1,2</sup>, Bogdan Cazacliu<sup>1</sup>, Sébastien Remond<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IFSTTAR, MAST- GPEM- Granulats Procédés et Elaboration des Matériaux, Route de Bouaye-CS4, 44344 Bouguenais, France

<sup>2</sup> IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 - LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement, F-59000 Lille, France

[eliane.khoury@imt-lille-douai.fr](mailto:eliane.khoury@imt-lille-douai.fr), [bogdan.cazacliu@ifsttar.fr](mailto:bogdan.cazacliu@ifsttar.fr), [sebastien.remond@imt-lille-douai.fr](mailto:sebastien.remond@imt-lille-douai.fr)

## Résumé

Les caractéristiques intrinsèques des granulats de bétons concassés (GBC) rendent difficile le contrôle de l'eau efficace réelle ( $E_{eff}(réelle)$ ) lorsque ces granulats sont utilisés dans des nouveaux bétons recyclés. Le sens de migration de l'eau entre GBC et la pâte de ciment peut changer. L'eau peut entrer ou sortir des GBC, en fonction de leur niveau initial d'humidité et du mode de cette pré-humidification. Par conséquent, l' $E_{eff}(réelle)$  dans le béton à base de GBC peut diminuer et/ou augmenter pendant le malaxage. Par  $E_{eff}(réelle)$ , on entend ici la quantité d'eau réellement présente au sein de la pâte de ciment à un instant donné du malaxage, à l'exclusion de l'eau présente dans la porosité des granulats. Cette  $E_{eff}(réelle)$  est à opposer à l'eau efficace théorique, différence entre l'eau totale et l'eau absorbée par les granulats déterminée selon la norme EN 1097-6.

L'objectif principal de ce travail est d'estimer l'évolution de l' $E_{eff}(réelle)$  au cours et à la fin du malaxage des bétons de GBC. Pour ce faire un découpage pertinent des courbes de puissance consommée enregistrée lors du malaxage est proposé et basé sur des considérations physiques (étapes de l'agglomération humide). Ensuite une méthode est proposée à partir de ce découpage pour estimer l'évolution de l' $E_{eff}(réelle)$  durant le malaxage ainsi que la capacité d'absorption des GBC.

**Mots-clés :** Bétons recyclés, granulats de béton concassé, eau efficace, humidité initiale, échange d'eau, absorption d'eau, puissance de malaxeur.

## Abstract

The intrinsic characteristics of crushed concrete aggregates (CCA) make it difficult to control real effective water ( $E_{eff}(real)$ ) when these aggregates are used in new recycled concrete. The direction of water migration between CCA and the cement paste can change. Water can enter or exit the CCA, depending on their initial moisture level and the mode of his pre-humidification. Therefore, the amount of  $E_{eff}(real)$  in recycled concrete may decrease and / or increase during mixing. By  $E_{eff}(real)$ , we mean here the amount of water actually present in the cement paste at a given moment of mixing, excluding the water present in the porosity of the aggregates. This  $E_{eff}(real)$  is to oppose to the theoretical effective water, determined by difference between the total water and the water absorbed by aggregates according to EN 1097-6.

The main objective of this work is to estimate the evolution of the  $E_{eff}(real)$  during and at the end of the mixing of recycled concrete. To do this, an interpretation of the power curves recorded during mixing is proposed and based on physical considerations (wet agglomeration steps). Then a method is proposed from this division to estimate the evolution of the  $E_{eff}(real)$  during mixing as well as the water absorption capacity of CCA.

**Keywords:** Recycled concretes, crushed concrete aggregates, effective water, pre-wetting history, water exchange, water absorption, power of the mixer.

## 1. Introduction

Il est montré, dans autres études, que l'échange d'eau entre les granulats de béton concassés (GBC) et un milieu autre que l'eau (comme la pâte de ciment) est plus complexe que ce qui est généralement considéré (Maimouni et al. 2018). L'humidité initiale trouvée dans les GBC est souvent supérieure à l'humidité initiale des granulats naturels (GN). Ainsi, l'humidité initiale dans les GN ne dépasse pas 1%, alors qu'elle peut dépasser 3,5% pour les GBC (Montero and Laserna 2017). Par conséquent, les formulations de nouveau béton recyclé peuvent être erronées en raison de la quantité d'eau supplémentaire ignorée lors de la formulation. La détermination de la capacité d'absorption d'eau (WA) et la connaissance de l'état de saturation initial des GBC sont nécessaires pour la formulation de nouveaux bétons. Khoury et al. ont étudié l'influence des histoires de pré-mouillage de GBC sur leur capacité d'absorption d'eau. Pour ce faire, des GBC de 6,3/10 mm ont été pré-humidifiés en utilisant différentes méthodes simulant des granulats pré-humidifiés à long terme (LT) et à court terme (CT). Il a été démontré que ces histoires de pré-humidification (LT ou CT) entraînaient différents niveaux d'absorption totale d'eau pour un même niveau d'humidité initial (Khoury et al. 2017).

Le malaxage de béton, ordinaire ou recyclé, passe par plusieurs étapes et entre ces étapes, il existe une agglomération de poudres et un procédé de granulation (Cazacliu 2008). Le comportement en agglomération humide des poudres et le processus de granulation peuvent être modifiés par plusieurs paramètres, tels que la quantité d'eau contenue dans le mélange. Dans la littérature, les différents états des particules humides ont été décrits en fonction de la quantité de liquide présent dans le mélange granulaire (Goldszal and Bousquet 2001). L'utilisation des courbes de puissance consommées par le malaxeur lors du malaxage du béton est l'une des méthodes permettant de suivre l'évolution du mélange. Cette technique a été développée par Cazacliu et al. (Cazacliu 2008).

L'objectif principal de ce travail est d'estimer l'évolution de l' $E_{eff}(réelle)$  lors du malaxage de bétons de granulats recyclés. Pour ce faire, dans un premier temps, les effets de l'histoire de pré-mouillage des GBC (pré-humidifiés à

long terme (LT) et à court terme (CT)) sur les propriétés du béton recyclé frais ont été étudiés. Ensuite, un découpage pertinent des courbes de consommation d'énergie enregistrée lors du malaxage a été proposé et fondé sur des considérations physiques, les étapes d'agglomération par voie humide (Goldszal and Bousquet 2001). Une méthode a été proposée à partir de cette division pour estimer l'évolution de l' $E_{\text{eff}}$  (réelle) lors du malaxage ainsi que la capacité d'absorption des GBC à la fin du malaxage. Par  $E_{\text{eff}}$  (réelle), on entend ici la quantité d'eau réellement présente au sein de la pâte de ciment à un instant donné du malaxage, à l'exclusion de l'eau présente dans la porosité des granulats. Cette eau efficace réelle est à opposer à l'eau efficace théorique, différence entre l'eau totale et l'eau absorbée par les granulats déterminée selon la norme [NF EN 1097-6].

## 2. Procédure expérimentale

Dans cette étude, des bétons à base de GN et des bétons à base de GBC sont réalisés. Les matériaux communs utilisés pour ces deux types de bétons sont: - un ciment CEMI 52.5 - un filler de calcaire - un sable naturel silico-calcaire 0/4 mm et - un superplastifiant haut réducteur d'eau. En outre, les bétons recyclés sont préparés avec des gravillons de béton concassé (GBC) de fraction granulaire 6.3/10 mm issus de la «Plateforme de recyclage de Gonesse». Les bétons à base de granulats naturels sont fabriqués à partir de gravillons naturels siliceux (GN) de fraction granulaire 5.6/11.2mm. Le béton de granulats recyclés est formulé en effectuant une substitution totale des gravillons naturels par un même volume réel de GBC.

Au total 41 gâchées de béton à base de GBC et 4 gâchées de bétons à base de granulats naturels sont réalisées. Quatre séries de bétons sont préparées en variant le rapport eau efficace théorique sur poudre, " $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$ ", entre 0.3 et 0.34 pour les bétons à base de GBC et entre 0.34 et 0.37 pour les bétons à base de GN.

Pour les bétons à base de GBC, et pour chaque  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$  onze gâchées sont réalisées avec des GBC utilisés dans différentes conditions d'humidité initiale. Les bétons sont notés selon l'état d'humidité initiale des GBC. Des GBC secs, pré-mouillés à court terme et à long terme avec un teneur en eau initiale ( $w_i$ ) d'environ 1%, 2%, 3%, 4% et saturés surface sèche sont codés respectivement "OD", "air-USSS1%", "air-USSS2%", "air-USSS3%", "air-USSS4%", "air-SSS" ( $w_i = 4.9\%$ ), "void-USSS1.2%", "void-USSS2%", "void-USSS3.22%", "void-USSS4.3%" et "void-SSS" ( $w_i = 6\%$ ).

Le malaxage est effectué dans un malaxeur intensif type Eirich de 5 litres. Le volume de toutes les gâchées est de 4 litres. Pour toutes les formulations et après avoir mis les gravillons (naturels ou recyclés), le sable, le ciment et le filler calcaire dans la cuve du malaxeur, les matériaux sont mélangés à sec pendant 30 secondes. Après malaxage à sec,  $E_{\text{ajout}}$  est ajoutée avec le superplastifiant en 10 secondes et la formulation complète est mélangée pendant 5 minutes supplémentaires. Le moteur du malaxeur est alimenté par un variateur qui permet d'enregistrer la puissance de malaxage. La fréquence d'acquisition est de 10 Hz. Les courbes de puissance présentées dans les résultats ci-après sont obtenues après l'application d'un lissage en calculant une moyenne mobile sur 10 points.

Immédiatement après le malaxage, l'affaissement initial du béton frais est mesuré en utilisant la procédure d'essai d'affaissement standard (NF EN 12350-2).

## 3. Evolution de l'eau efficace réelle durant le malaxage des bétons recyclés

Une méthode permettant de suivre l'évolution de l'eau efficace réelle dans le béton à base de GBC durant le malaxage est élaborée. Pour ce faire les courbes des puissances consommées durant le malaxage des bétons à base de GN sont utilisées comme abaques de calcul pour les bétons à base de GBC.

La **Figure 1** présente les puissances consommées durant le malaxage des bétons à base de GN pour les quatre rapports  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$  (0.338, 0.351, 0.357 et 0.371). On observe que la puissance consommée augmente quand le rapport  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$  diminue, donc avec la réduction d'eau efficace réelle dans le malaxeur.

On peut considérer, dans cette analyse, que les rapports  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$  des bétons de GN sont égaux à  $E_{\text{eff}}$  (réelle) /  $P$  car les GN sont peu absorbants. Il est ainsi considéré qu'il n'y a pas d'échanges d'eau entre les GN et la pâte dans les bétons de granulats naturels.

En addition, dans toute la suite, nous faisons l'hypothèse que, lorsque la puissance dissipée pour un béton à base de GBC est identique à celle dissipée pour un béton de GN, alors les quantités d'eau efficace réelle qu'ils contiennent sont identiques. Cette hypothèse peut être justifiée sur la base des constatations suivantes :

- Les formulations des bétons à base de GBC sont proches de celles des bétons à base de GN et elles sont conçues de manière à rester dans la même gamme de consistance que les bétons à base de GN (affaissements initiaux variant entre 2 et 11cm). Les GN sont notamment remplacés par un même volume réel de GBC,- Dans les 4 formulations de bétons à base de GN, seule la quantité d'eau efficace change. Par conséquent les différences observées entre les puissances de ces 4 bétons sont dues uniquement à la variation de l'eau efficace d'une gâchée à une autre, - Enfin, les puissances consommées lors du malaxage à sec des bétons à base de GN sont quasi identiques aux puissances consommées par les bétons à base de GBC. On suppose donc ici que c'est uniquement la variation de l'eau efficace au cours du malaxage qui est responsable de la variation de puissance d'un béton à l'autre.

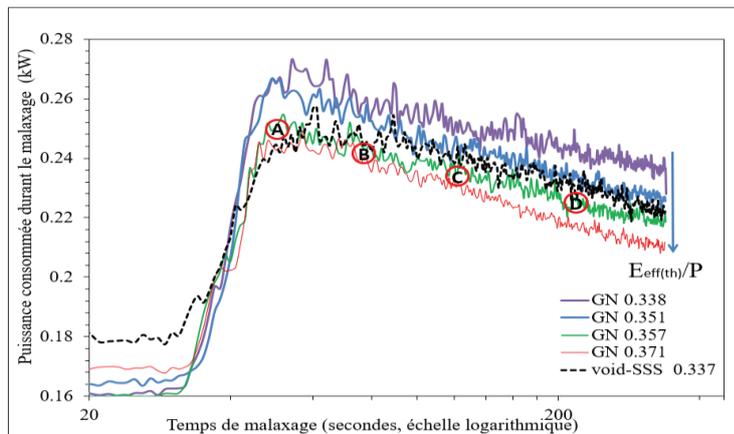


Figure 1. Intersection de la courbe de puissance enregistrée durant le malaxage d'un béton recyclé dont les GBC sont saturés sous vide partiel et  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P = 0.337$  (void-SSS 0.337) avec celles des quatre bétons de granulats naturels. Les points A, B, C et D sont quatre points d'intersection entre les courbes.

La **Figure 1** présente aussi un exemple d'exploitation d'une courbe de puissance obtenue pour un béton à base de GN afin d'estimer la quantité d'eau efficace réelle dans un béton à base de GBC. Dans cet exemple, les GBC du béton recyclé sont pré-saturés sous vide partiel (void-SSS) pour un rapport  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P = 0.337$ . Nous pouvons, à partir des points d'intersection et avec une interpolation, déterminer l'évolution de l'eau efficace à chaque instant. La même procédure est utilisée pour toutes formulations avec les GBC dans différents états d'humidité initiale et avec différents  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$ . A partir de l'intersection des courbes de puissance de chaque béton à base de GBC avec les courbes de puissance des quatre bétons de GN, l'eau efficace réelle est déterminée dans chaque béton à base de GBC pour 9 échéances données (0, 10, 30, 60, 90, 120, 180, 260 et 290 secondes à partir de la fin de l'introduction d'eau). Ici les échéances sont prises à partir de la fin de l'introduction de l'eau dans le mélange. Pour chacune de ces échéances ( $T_i$ ), la puissance prise en compte est la moyenne des puissances consommées entre les instants  $T_i$  et  $T_i+10s$ . A l'instant  $T_0$ ,  $E_{\text{eff}}(\text{réelle}, T_0)/P$  est déterminé selon l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en négligeant l'eau échangée par les GBC humidifiés avec le mélange durant le malaxage à sec.

$$E_{\text{eff}}(\text{réelle}, T_0) = E_{\text{totale}} - w_i * M_{\text{GBC}} \quad (1)$$

Où,  $w_i$  est la quantité d'eau initiale dans les GBC de masse  $M_{\text{GBC}}$  et l'eau totale ( $E_{\text{totale}}$ ) correspond au volume d'eau ajoutée dans le malaxeur plus l'eau initiale contenue dans l'ensemble des constituants (granulats naturels ou recyclés ( $w_i$ ) et adjuvant).

A 10, 30, 60, 90, 120, 180, 260 et 290 secondes après la fin de l'introduction de l'eau,  $E_{\text{eff}}(\text{réelle})/P$  est extrapolée linéairement à chaque instant en utilisant les puissances et les  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$  des bétons à base de GN.

La même procédure est utilisée pour toutes les formulations avec les GBC dans différents états d'humidité initiale et avec différents  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$ . Pour la présentation des résultats, nous allons prendre pour origine de l'axe des temps, le tout début du malaxage à sec.

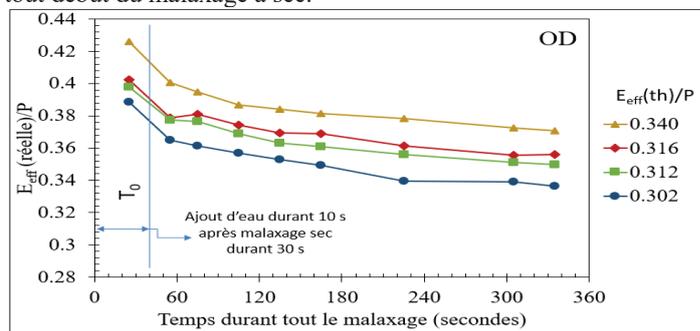


Figure 2. Évolution des  $E_{\text{eff}}(\text{réelle})/P$  pour les bétons recyclés avec GBC secs pour différents rapports théoriques  $E_{\text{eff}}(\text{th})/P$ .

La **Figure 2** montre l'estimation de l'évolution de l'eau efficace réelle dans le béton recyclé à base de GBC secs durant le malaxage. Nous pouvons observer dans la figure que l'eau efficace réelle estimée diminue avec le temps de malaxage. On observe par ailleurs que, quel que soit le temps de malaxage, l'eau efficace réellement présente dans le béton est systématiquement plus élevée que l'eau efficace théorique déterminée à partir de la norme européenne [NF EN 1097-6]. Par conséquent, les GBC n'arrivent pas à absorber toute la quantité d'eau ajoutée pour compenser leur

absorption. Nous pouvons conclure de cela que l'absorption d'eau des GBC dans le béton doit être déterminée par une autre méthode que celle utilisée pour les bétons à base de GN.

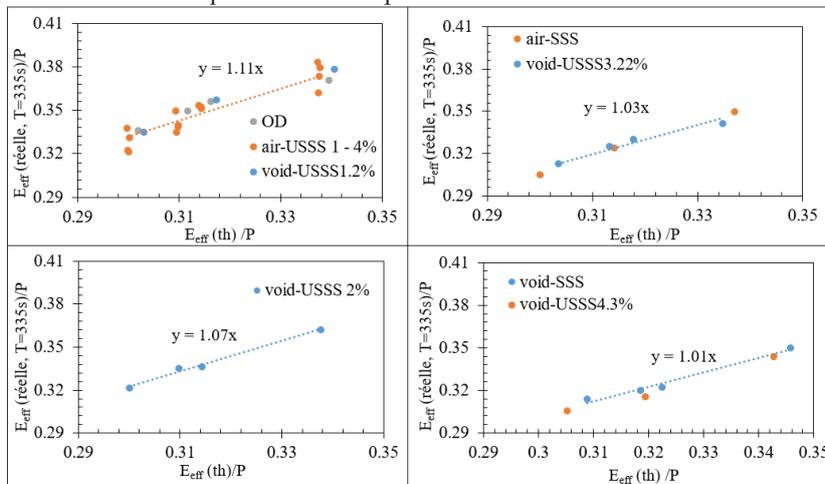


Figure 3. Comparaison des rapports de l'eau efficace réelle sur poudre déterminé à  $T=335s$  et de l'eau efficace théorique sur poudre en fonction des taux de saturation des GBC au début de la fabrication de bétons.

Dans la **Figure 3** les variations de  $E_{\text{eff}}$  (réelle,  $T=335s$ )/ $P$  en fonction de  $E_{\text{eff}}$  (th)/ $P$  sont séparées en 4 groupes. Pour les bétons contenant initialement peu d'eau (OD, air-USSS1-4% et void-USSS1%) la pente est de 11%. L'eau efficace réelle estimée est donc plus grande de 11% par rapport à l'eau efficace théorique.

Pour les bétons à base de GBC air-SSS et void-USSS3.22%, la pente est de 3%. L'eau efficace réelle estimée est plus grande de 3% par rapport à l'eau efficace théorique. Pour les bétons à base de GBC saturés ou quasi saturés sous vide (void-SSS et void-USSS4.3 %) la pente est de 1%. Dans ce cas-là l'eau efficace théorique fournit une bonne estimation de l'eau efficace réelle. Par conséquent, pour bien maîtriser l'eau efficace réelle dans le béton frais, le calcul de l'eau théorique doit prendre en compte non seulement de la capacité d'absorption des GBC dans le béton mais aussi l'histoire d'humidification de ces GBC.

#### 4. Conclusion

Le chapitre présente une méthode permettant de suivre l'évolution de l'eau efficace réelle ainsi que la capacité d'absorption d'eau d'un GBC lors du malaxage d'un nouveau béton. L'eau efficace réelle est estimée à partir d'une comparaison entre les courbes de puissance de bétons de GBC et celles de bétons de GN possédant des compositions et des propriétés à l'état frais similaires à celles des bétons recyclés. Les résultats montrent que, hormis pour quelques états de saturation particuliers (taux de saturation élevés pour une saturation à LT ou une saturation sous vide partiel), l'eau efficace réelle dans le mélange est systématiquement plus élevée que l'eau efficace théorique calculée à partir du coefficient d'absorption d'eau des granulats mesuré selon la norme [NF EN 1097-6]. L'eau efficace doit ainsi être déterminée en prenant en compte non seulement cette capacité d'absorption d'eau mais aussi l'histoire de son humidification. En addition, les résultats montrent qu'avec une saturation sous vide l'eau efficace réelle peut être contrôlée en déterminant dès le début de la fabrication du béton l'eau efficace théorique en fonction de l'état initial de saturation. Une humidification à long terme permet un remplissage des pores les moins accessibles des GBC et réduit ensuite les échanges d'eau entre GBC et pâte de ciment. Au contraire, pour une saturation à CT avec pulvérisation, l'eau est localisée essentiellement dans les pores les plus accessibles et est ainsi facilement échangeable au cours du mélange.

#### Références

- Cazacliu B. 2008. "In-Mixer Measurements for Describing Mixture Evolution during Concrete Mixing." *Chemical Engineering Research and Design* 86 (12): 1423–33.
- Goldszal A., and Bousquet J. 2001. "Wet Agglomeration of Powders: From Physics toward Process Optimization." *Powder Technology* 117 (3): 221–31.
- Khoury E., Cazacliu B., and Remond S. 2017. "Impact of the Initial Moisture Level and Pre-Wetting History of Recycled Concrete Aggregates on Their Water Absorption." *Materials and Structures* 50 (5): 1–12.
- Maimouni H., Remond S., et al. 2018. "Quantitative Assessment of the Saturation Degree of Model Fine Recycled Concrete Aggregates Immersed in a Filler or Cement Paste." *Construction and Building Materials* 175: 496-507.
- Moreno Juez J., Artoni R., and Cazacliu B. 2017. "Monitoring of Concrete Mixing Evolution Using Image Analysis." *Powder Technology* 305: 477–87. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.008>.