

---

# Influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés

Zengfeng ZHAO<sup>1</sup>, Luc COURARD<sup>1</sup>, Frédéric MICHEL<sup>1</sup>, Sébastien REMOND<sup>2</sup>, Denis DAMIDOT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Liège, Département ArGEnCo, GeMMe Matériaux de construction, Liège, Belgique, email : [zengfeng.zhao@ulg.ac.be](mailto:zengfeng.zhao@ulg.ac.be), [luc.courard@ulg.ac.be](mailto:luc.courard@ulg.ac.be), [frederic.michel@ulg.ac.be](mailto:frederic.michel@ulg.ac.be)

<sup>2</sup>Mines Douai, Département Génie Civil et Environnemental, LGCgE, Douai, France, mail : [sebastien.remond@mines-douai.fr](mailto:sebastien.remond@mines-douai.fr), [denis.damidot@mines-douai.fr](mailto:denis.damidot@mines-douai.fr)

---

## RÉSUMÉ

*De très grandes quantités de déchets de construction et de démolition sont produites chaque année. Afin de faire bon usage des granulats recyclés (GR) dans le béton, il est très important d'étudier l'influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés. Dans cette étude, les granulats recyclés de blocs (GR\_Blocs) et de hourdis (GR\_Hourdis) ont été concassés et puis séparés en 4 fractions granulaires (0/2, 2/6,3, 6,3/14, 14/20mm). Chaque fraction granulaire des GR a été caractérisée. Les résultats montrent que la teneur en pâte de ciment durcie des GR augmente lorsque la taille des particules diminue. Les sables recyclés possèdent ainsi des teneurs en pâte de ciment nettement plus élevées que les gravillons recyclés. Les sables recyclés possèdent en particulier un coefficient d'absorption d'eau très élevé par rapport aux gravillons recyclés. Les valeurs de teneur en pâte de ciment durcie obtenues pour les GR\_Blocs sont plus faibles que celles mesurées sur les GR\_Hourdis, ce qui provient d'une plus faible quantité de pâte de ciment initiale du bloc. Les résultats montrent que pour toutes les fractions des GR, les GR\_Hourdis sont plus anguleux que les GR\_Blocs.*

## ABSTRACT

*Large quantities of construction and demolition waste are produced each year. In order to make good use of recycled concrete aggregates (RCA) in concrete, it is very important to study the influence of the granular fraction and the origin of RCA on their properties. In this study, RCA from blocks (RCA\_Blocks) and slabs (RCA\_Slabs) were crushed and then separated into four granular fractions (0/2, 2/6.3, 6.3/14, 14/20mm). Each granular fraction of RCA was characterized. The results show that the hardened cement paste content of RCA increases as the particle size decreases. The fine RCA thus possess higher cement paste contents than the coarser fraction of RCA. The fine RCA in particular has a higher water absorption coefficient compared to coarser fraction of RCA. The values of hardened cement paste content obtained for the RCA\_Blocks are lower than those measured on the RCA\_Slabs, which is due to a smaller amount of initial cement paste content in blocks. The results show that for all fractions of RCA, the RCA\_Slabs are more angular than RCA\_Blocks.*

*MOTS-CLÉS : granulats recyclés, fraction granulaire, teneur en pâte de ciment, absorption d'eau, forme.*

*KEY WORDS: recycled concrete aggregates, granular fraction, cement paste content, water absorption, sharp.*

---

## 1. Introduction

De très grandes quantités de déchets de construction et de démolition sont produites chaque année. Jusqu'à présent, seule une petite fraction de ces déchets de béton est réutilisée sous forme de granulats pour la fabrication de béton [ETX 07]. Afin de faire bon usage des granulats recyclés (GR) dans le béton, il est très important d'étudier l'influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés [HAN 83].

Les granulats recyclés (GR) sont composés d'un mélange de granulats naturels et de pâte de ciment durcie. Cette dernière est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels [ZHA 13]. La teneur en pâte de ciment durcie et ses propriétés ont donc une influence déterminante sur les propriétés des granulats recyclés [ZHA 15]. Les propriétés des GR dépendent de beaucoup de paramètres tels que le béton d'origine, les contaminants, la méthode de broyage pour la production, le vieillissement et les conditions de stockage. La porosité des GR constitue un frein majeur à leur réutilisation dans la mesure où l'absorption de l'eau au moment du malaxage diminue l'ouvrabilité des bétons [COU 10]. La forme des granulats peut influencer la compacité de mélange de granulats et les propriétés des bétons [HE 12].

Dans cette étude, les pièces de blocs et les cubes de hourdis (PREFER) ont été concassés dans un concasseur à mâchoire de laboratoire en conservant la même ouverture de mâchoire pour tous les produits. Les granulats recyclés de blocs (GR\_Blocs) et de hourdis (GR\_Hourdis) ont été séparés en 4 fractions granulaires (0/2, 2/6,3, 6,3/14, 14/20mm). Chaque fraction granulaire des GR a été caractérisée afin d'étudier l'influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés.

## 2. MATERIAUX

### 2.1. Granulats recyclés

Deux bétons notés Hourdis (C40/50) et Blocs (C8/10) ont tout d'abord été collectés auprès de la société PREFER, puis concassés dans un concasseur à mâchoires de laboratoire en conservant la même ouverture de mâchoire pour tous les produits afin de disposer de GR dont on connaît la composition du béton d'origine. Ces deux bétons ont tous été réalisés avec deux ciments (CEM I 52,5 N pour le Hourdis et CEM III/A 42,5 pour le Blocs) et avec des granulats naturels concassés calcaires. Après concassage, les granulats recyclés de blocs (GR\_Blocs) et de hourdis (GR\_Hourdis) ont été séparés en 4 fractions granulaires (0/2, 2/6,3, 6,3/14, 14/20mm). Des granulats recyclés produits dans des plateformes de concassage industrielles (GR\_Trade) ont également été utilisés mais seulement pour comparer la granulométrie des GR fabriqués au laboratoire. Les granulats recyclés (0/31,5mm) ont été fournis par la société Tradecowall et le centre de recyclage de Valorem à Mont-Saint-Guibert (Belgique).

## 3. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

### 3.1. Mesure de la teneur en pâte de ciment

Une méthode basée sur la dissolution de la pâte de ciment durcie des GR dans une solution d'acide salicylique a été développée [ZHA 13]. L'acide salicylique ne dissout pas les phases principales des granulats naturels (notamment la calcite) mais dissout de nombreux anhydres et hydrates de la pâte de ciment (silicates, portlandite et C-S-H par exemple).

Le protocole expérimental adopté pour cette mesure est le suivant [ZHA 14]:

a) Un échantillon représentatif de GR est séché à 105°C jusqu'à masse constante, puis broyé à une dimension inférieure à 200 µm;

b) 0,5g (masse  $M_1$ ) de l'échantillon broyé sont ensuite immergés dans une solution de 14g d'acide salicylique dans 80ml de méthanol et mis sous agitation pendant 1 heure;

c) La fraction solide est filtrée sur un verre fritté (Pyrex N°4, dimension des pores: 10-16µm) et lavée quatre fois avec du méthanol (2-3mm au-dessus du filtre à chaque lavage);

d) Le résidu solide est séché à l'étuve à 70°C jusqu'à masse constante (masse  $M_2$ );

e) La teneur en pâte de ciment (TPC) est ensuite calculée de la manière suivante (Équation 1) :

$$TPC (\%) = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100$$

Équation 1

### 3.2. Mesure de l'absorption d'eau des granulats recyclés

Le coefficient d'absorption d'eau des trois fractions grossières des GR pour les deux GR étudiés a été déterminé en se basant sur la norme EN 1097-6 ([ZHA 14] a montré que la norme EN 1097-6 n'est pas adaptée pour la mesure du coefficient d'absorption d'eau de la fraction inférieure à 0,63mm). Le coefficient d'absorption de la fraction 0/2 mm des GR a été déterminé en se basant sur la méthode IFSTTAR n°78 [ZHA 14].

### 3.3. Mesure de la forme des granulats recyclés

La forme des GR a été mesurée par analyse d'images avec le logiciel de la société Occhio [MIC 14]. Les particules représentatives sont déposées sur une plaque en verre qui se positionne entre une caméra et une source lumineuse. Le logiciel mesure ensuite la taille et la forme de chaque particule individuellement. Les paramètres sélectionnés peuvent être séparés en deux catégories: la largeur ( $l$ ) et la longueur ( $L$ ). Le coefficient d'élongation  $q$  est déterminé par  $q=l/L$ . Pour chaque fraction granulaire, entre 2000 et 10000 particules ont été mesurées en quelques minutes.

L'indice de forme des GR a été aussi mesuré au pied à coulisse pour les trois fractions grossières. L'épaisseur ( $e$ ), la largeur ( $l$ ), et la longueur ( $L$ ) de chaque particule ont été mesurées au pied à coulisse en se basant sur 200 particules représentatives ( $L \geq l \geq e$ ). La norme britannique EN BS 812 caractérise la forme au moyen de 4 catégories: cubique (équidimensionnelle), plate, allongée, allongée et plate (Figure 1). Ces 4 catégories sont définies par le coefficient d'aplatissement  $p$  ( $p=e/l$ ) et le coefficient d'élongation  $q$  ( $q=l/L$ ).

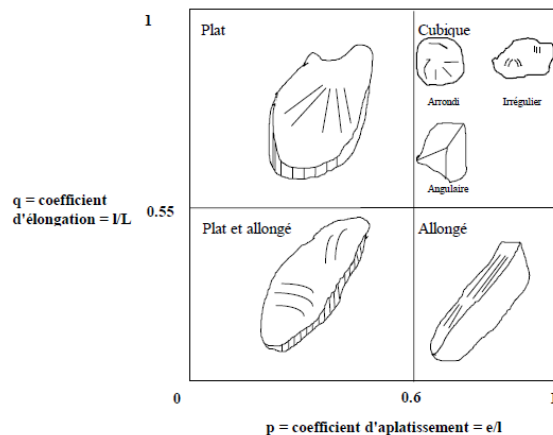


Figure 1. Catégories de forme en fonction du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'élongation [LAB 15]

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 4.1. Granulométrie

La Figure 2 présente les courbes granulométriques des GR fabriqués au laboratoire et des GR « industriels » provenant du centre de recyclage Tradecowall. Cette figure montre que pour les GR fabriqués au laboratoire et pour une même ouverture de mâchoire du concasseur, les courbes granulométriques sont similaires. Le GR industriel présente une quantité de fines plus importante que les autres. Le GR\_Hourdis montre une quantité de fines (inférieur à 1 mm) plus importante que le GR\_Blocs, ce qui est dû à la composition initiale du béton des hourdis contenant une plus grande quantité de pâte de ciment (théoriquement de 19,5% en masse pour le béton du hourdis et de 14,0% en masse pour le béton du bloc).

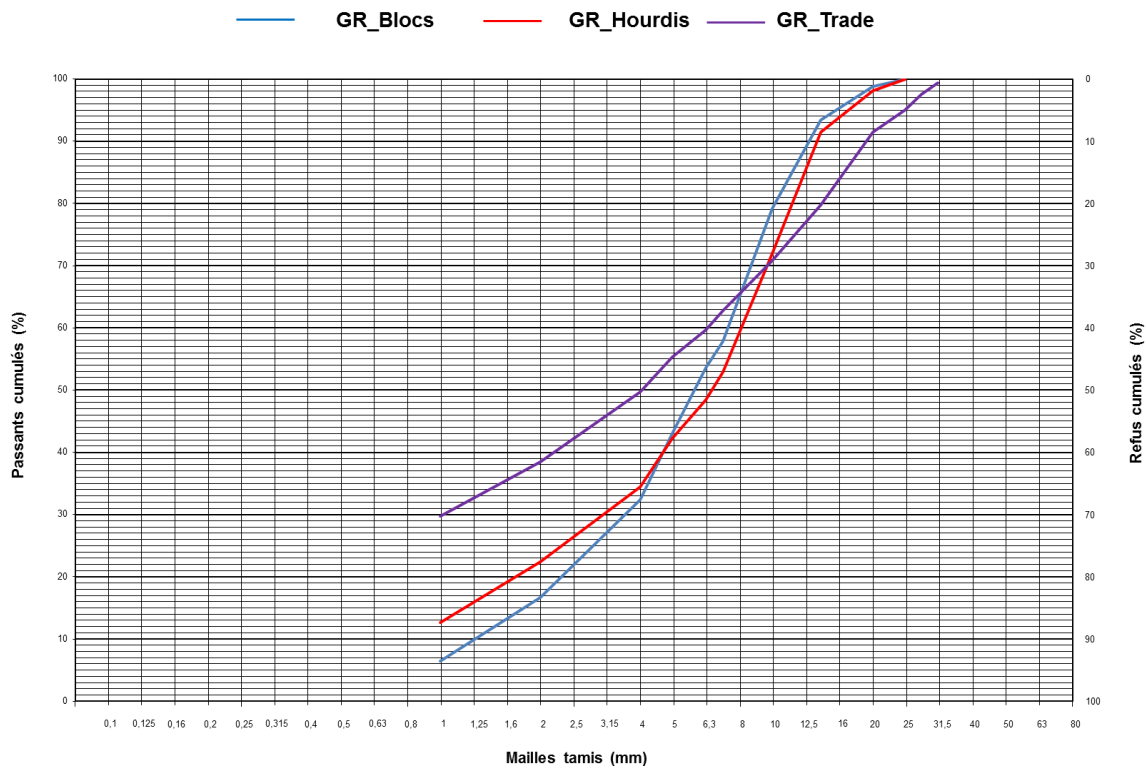


Figure 2. Courbes granulométriques des GR fabriqués au laboratoire (GR\_Hourdis et GR\_Blocs) et des GR industriels (GR\_Trade)

#### 4.2. Teneur en pâte de ciment

La Figure 3 présente la variation de la teneur en pâte de ciment (TPC) en fonction de la fraction granulaire des GR. La teneur en pâte de ciment durcie diminue lorsque la taille des particules augmente pour tous les types de GR. Les sables recyclés possèdent ainsi des teneurs en pâte de ciment nettement plus élevées que les gravillons recyclés. Les teneurs élevées en pâte de ciment dans les sables recyclés pénalisent lourdement leurs propriétés d'usage par rapport aux gravillons recyclés. Les valeurs de TPC obtenues pour les GR\_Blocs sont plus faibles que celles mesurées sur les GR\_Hourdis, ce qui provient d'une plus faible quantité de pâte de ciment initiale du bloc. La teneur en pâte de ciment est probablement aussi liée à une résistance plus faible du béton pour blocs, ce qui entraîne un nettoyage par broyage plus efficace.

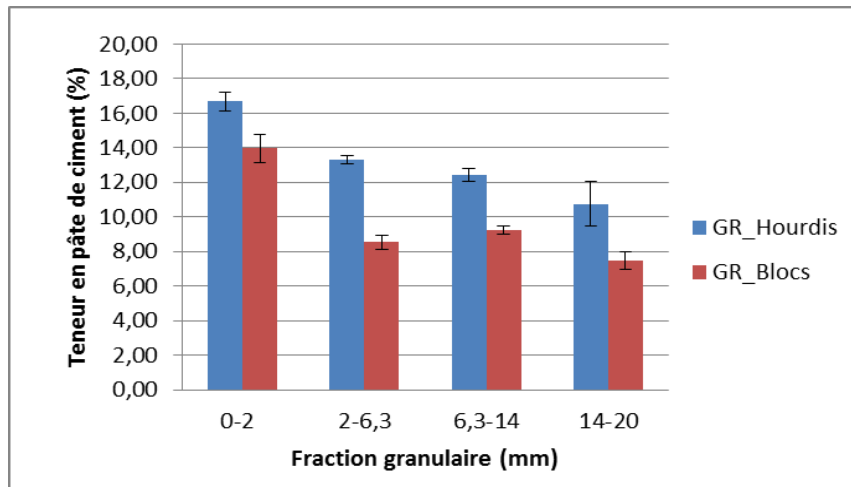


Figure 3. Variation de la TPC en fonction de la fraction granulaire pour GR\_Hourdis et GR\_Blocs

#### 4.3. Absorption d'eau des granulats recyclés

La Figure 4 présente la variation de l'absorption d'eau en fonction de la fraction granulaire pour GR\_Blocs et GR\_Hourdis. L'absorption d'eau diminue quand la taille des particules augmente aussi bien pour les GR\_Blocs

que pour les GR\_Hourdis. Les sables recyclés possèdent en particulier un coefficient d'absorption d'eau très élevé par rapport aux gravillons recyclés. Pour les deux fractions les plus grandes, les GR\_Blocs montrent une plus grande valeur d'absorption d'eau que les GR\_Hourdis. Pour les deux fractions plus petites, les GR\_Hourdis présentent une valeur d'absorption d'eau légèrement plus grande que celle des GR\_Blocs. L'absorption d'eau des granulats recyclés dépend de l'absorption d'eau des granulats naturels, de celle de la pâte de ciment adhérente et des proportions relatives de ces deux phases. La teneur en pâte de ciment durcie et la porosité de pâte de ciment peut influencer l'absorption de d'eau des granulats recyclés.

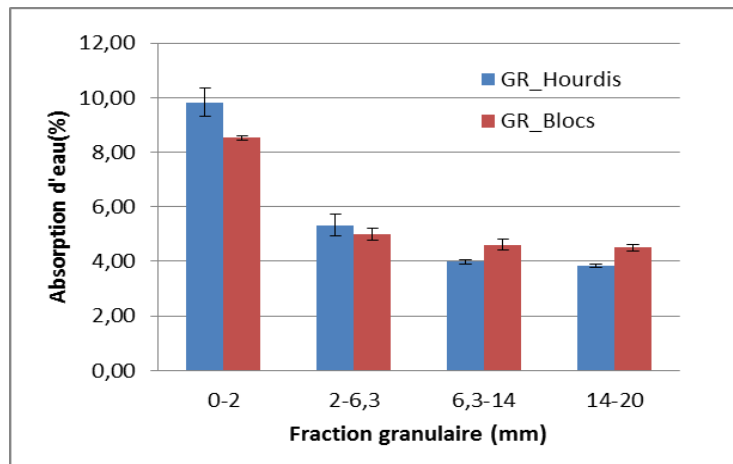


Figure 4. Variation de l'absorption d'eau en fonction de la fraction granulaire pour les GR\_Hourdis et les GR\_Blocs (Remarque : les valeurs obtenues pour la fraction 0/2 mm sont basées sur la méthode IFSTTAR N° 78)

#### 4.4. Forme des granulats recyclés

La Figure 5 présente la variation du coefficient d'élongation moyen des GR par analyse images (q) en fonction de la fraction granulaire. Pour toutes les fractions des GR, les GR\_Hourdis sont plus anguleux que les GR\_Blocs, ce qui est probablement lié à la différence de résistance en compression du béton initial.

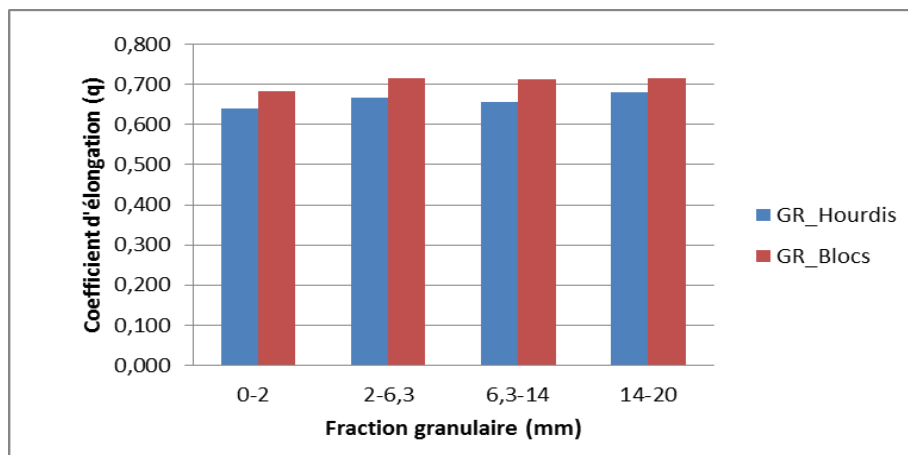


Figure 5. Variation du coefficient d'élongation des GR mesurée par analyse images en fonction de la fraction granulaire pour les GR\_Hourdis et les GR\_Blocs

La Figure 6 présente l'indice de forme mesurée au pied à coulisse en fonction du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'élongation pour les trois fractions grossières des GR\_Hourdis et des GR\_Blocs. Les GR\_Blocs ont un plus grand pourcentage de grains de forme cubique que les GR\_Hourdis (Tableau 1). Les GR\_Hourdis présentent une plus grande quantité de particules de forme plate, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par analyse d'image. La forme des GR peut être due à la différente résistance en compression du béton original.

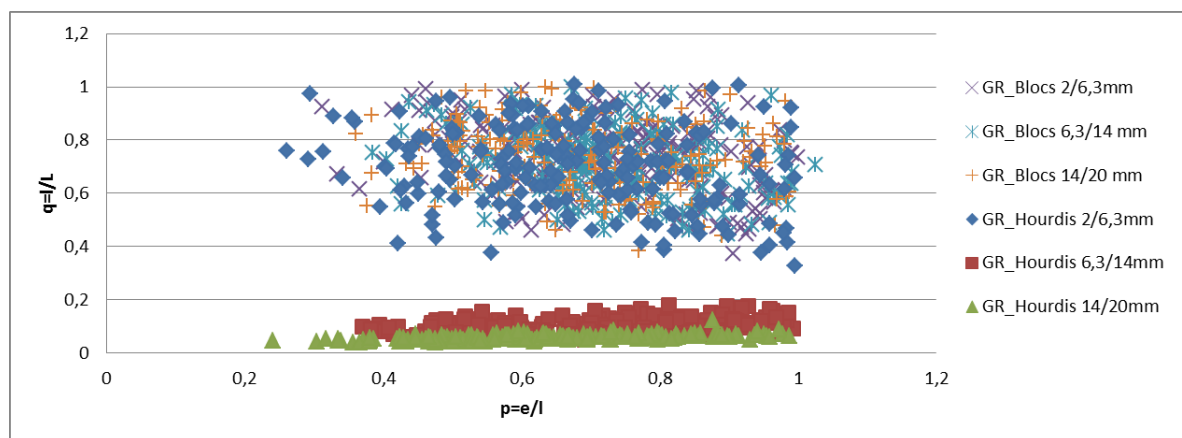


Figure 6. Catégories de forme mesurées au pied à coulisse en fonction du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'élongation pour les trois fractions grossières des GR\_Hourdis et des GR\_Blocs

Tableau 1. Catégories de forme en fonction du coefficient d'aplatissement et du coefficient d'élongation (%)

Fractions (mm)	Cubique	Plat	Allongé	Allongé et plat
GR_Hourdis 2/6,3	51	31	13,5	4,5
GR_Hourdis 6,3/14	0,0	0,0	71,0	29
GR_Hourdis 14/20	0	0	57,5	42,5
GR_Blocs 2/6,3	65,5	22,5	11	1
GR_Blocs 6,3/14	70,5	17	11,5	1
GR_Blocs 14/20	62	31,5	6	0,5

## 5. CONCLUSION

Dans cette étude, les granulats recyclés de blocs (GR\_Blocs) et de hourdis (GR\_Hourdis) ont été caractérisés afin d'étudier l'influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés. La teneur en pâte de ciment durcie des GR a été mesurée par dissolution dans l'acide salicylique. Les résultats montrent que la teneur en pâte de ciment durcie des GR augmente lorsque la taille des particules diminue. Les sables recyclés possèdent ainsi des teneurs en pâte de ciment nettement plus élevées que les gravillons recyclés. Les teneurs élevées en pâte de ciment dans les sables recyclés pénalisent lourdement leurs propriétés d'usage par rapport aux gravillons recyclés. Les sables recyclés possèdent en particulier un coefficient d'absorption d'eau très élevé par rapport aux gravillons recyclés.

Les valeurs de teneur en pâte de ciment durcie obtenues pour les GR\_Blocs sont plus faibles que celles mesurées sur les GR\_Hourdis, ce qui provient d'une plus faible quantité de pâte de ciment initiale du bloc. La forme des GR a été mesurée par analyse d'images et au pied à coulisse. Les résultats montrent que, pour toutes les fractions des GR, les GR\_Hourdis sont plus anguleux que les GR\_Blocs. L'indice de forme des GR mesuré au pied à coulisse montre que les GR\_Hourdis présentent une plus grande quantité de particules de forme plate, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par analyse d'images. Les résultats obtenus dans cette étude ne sont valables que pour les bétons étudiés et le concasseur employé: il est possible qu'un autre type de concasseur (par exemple à marteau ou percussion) donnerait d'autres formes et d'autres teneurs en fines.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société Prefer pour la fourniture des blocs et des cubes et la société Tradecowall pour la fourniture des granulats recyclés. Ils remercient également M. Dislaire pour son aide dans l'interprétation et l'analyse d'images. Enfin, les auteurs remercient la DGO6 du Gouvernement de Wallonie pour son soutien financier au travers du projet Beware Academia CONRePaD *Composition de béton à base de granulats recyclés en utilisant la technique de compacité de l'empilement granulaire.*

## BIBLIOGRAPHIE

- [COU 10] Courard L., Michel F., Delhez P., « *Use of Concrete Road Recycled Aggregates for Roller Compacted Concrete* », *Construction and Building Materials*, vol.24, n6, 2010, p. 390-395.
- [ETX 07] Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M., « *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete* », *Cement and Concrete Research*, vol.37, n5, 2007, p.735-742.
- [HAN 83] Hansen T., Narud H., « *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate* », *Concrete International*, vol.5, n1, 1983, p.79-83.
- [HE 12] He H., Le N. F., Stroeven P., « *Particulate structure and microstructure evolution of concrete investigated by DEM Part 1: Aggregate and binder packing* », *HERON*, vol.57, n2, 2012, p.119-132.
- [LAB 15] Laboratoire de Géotechnologie, Université de Liège. [http://www.facsu.ulg.ac.be/upload/docs/application/pdf/2015-05/essai\\_forme-roche.pdf](http://www.facsu.ulg.ac.be/upload/docs/application/pdf/2015-05/essai_forme-roche.pdf)
- [MIC 14] Michel F., Courard L., « *Particle size distribution of limestone fillers: granulometry and specific surface area investigations* », *Journal of Particulate Science and Technology*, vol.32, n4, 2014, p. 334-340.
- [ZHA 13] Zhao Z., Remond S., Damidot D., Xu W., « *Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates* », *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol.2, n3-4, 2013, p.186-203.
- [ZHA 14] Zhao Z., Remond S, Damidot D., Xu W., « *Teneur en pâte de ciment et coefficient d'absorption d'eau des sables recyclés*». *Quinzième édition des Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)2B*, Douai, France, 03-04 Juillet 2014, p. 101-111.
- [ZHA 15] Zhao Z., Remond S., Damidot D., Xu W., « *Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars*», *Construction and Building Materials*, vol. 81, 2015, p. 179-186.