

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON PARENT SUR LA QUALITÉ DES GRANULATS RECYCLÉS

MARCHI Thibaut ^A, DEVILLERS Philippe ^B, SOUCHE Jean Claude ^A, SALGUES Marie ^A, GARCIA DIAZ Eric ^A

A IMT Mines Alès, Centre des Matériaux de l'École des mines d'Alès, 6 av. de Clavières 30319 Alès cedex, France
B LIFAM, ENSA de Montpellier, Univ Montpellier, France.

Résumé : La directive 2008/98/CE du Parlement européen du 19 novembre 2008 relative aux déchets impose aux états membres de l'Union Européenne, un objectif de réemploi, recyclage et valorisation des déchets non dangereux. En France, l'Ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010, imposera en 2020 la valorisation, à hauteur de 70% minimum en masse, des déchets non dangereux de construction et de démolition. La substitution des granulats naturels qui composent pour partie le matériau béton, par des granulats recyclés issus de la démolition vise à économiser la ressource naturelle.

Ces dernières années, des études ont permis de caractériser et d'étudier des formulations de béton à base de granulats recyclés constitués d'impuretés de diverses natures. La diversité de provenance des granulats recyclés utilisés limite les moyens d'interprétation des résultats sur la qualité des granulats issus du recyclage.

Par conséquent cette étude est menée à partir de matériaux recyclés qui sont exclusivement issus de bétons dits « parents », dont la composition est maîtrisée. Ces bétons sont confectionnés en centrale BPE puis subissent un procédé de concassage et de criblage pour produire des granulats recyclés de différentes coupures granulométriques.

La comparaison des performances mécaniques de ces granulats et l'observation de la microstructure ont été effectuées pour qualifier l'adhérence pâte/granat et vérifier leur taux de fissuration et de fragmentation. Il s'avère que la qualité de la pâte du béton parent a une incidence importante sur la qualité et la performance du granulat recyclé. A l'échelle microscopique, les caractéristiques de transfert des granulats recyclés peuvent favoriser une hydratation de la pâte des nouveaux bétons par effet de cure interne.

Mots-clés : recyclage, concassage, qualité de pâte, durabilité, béton parent, auréole de transition

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

1. INTRODUCTION

La valorisation des matériaux issus de la déconstruction représente un réel enjeu pour préserver les ressources naturelles et limiter l'engorgement des aires de stockage de déchets inertes. L'usage de granulats recyclés (GR) dans les bétons dépend en premier lieu de la qualité de ceux-ci. En effet, même les (GR) de meilleure qualité qui disponibles dans le commerce contiennent de nombreuses impuretés (bois, plastiques, restes de bitumes etc... conformément à la norme NF EN 12620/A1) .

Leur valorisation impose donc un procédé de traitement sélectif afin de les transformer en graviers de qualité utilisables dans des bétons d'ouvrages (Cudeville, 2011). Toutefois, les travaux précédents que nous avons menés (Souche, 2015) dans le cadre du projet RECYBETON ont mis en évidence l'impact de la nature des recyclés du commerce sur les résultats des recherches.

Par conséquent, les matériaux recyclés utilisés dans ces travaux sont exclusivement issus de deux bétons parents (BP), spécialement confectionnés en centrale BPE. Le concassage et le criblage de ces (BP), préalablement caractérisés, dans une usine de recyclage standard, permettent ainsi de produire des (GR) de composition maîtrisée. Cette méthodologie s'intègre ainsi dans une approche de déconstruction et de démolition sélective (Silva, de Brito, & Dhir, 2017) qui reste de loin la méthode la plus efficace pour assurer la valorisation des déchets de démolition.

Toutefois, les caractéristiques des (GR) issus de bétons de démolition qui présentent un potentiel d'intégration dans des bétons structurels (Pedro, De Brito, & Evangelista, 2017), peuvent cependant être affectées par le processus de recyclage, la qualité du (BP) et par la dimension des granulats. L'identification préalable des (GR) est donc primordiale. En effet, les propriétés des bétons futurs seront dépendantes de celles des granulats recyclés qu'ils contiennent, et donc de celles des (BP) dont ils sont issus (Duc-Tung Dao, 2012). De nombreuses études révèlent que la quantité de pâte présente dans les granulats recyclés influe directement sur les propriétés physiques des graviers recyclés, avec une augmentation de la quantité d'eau absorbée et une diminution de la densité (Pedro et al., 2017). Plus la résistance des bétons parents est élevée, plus le pourcentage de pâte adhérente au granulat recyclé après concassage augmente (Akbarnezhad, et al., 2013). La performance des granulats recyclés diminue avec l'augmentation de la quantité de pâte adhérente au granulat naturel (Dihl et al., 2004). Pedro et al. (2014) ont étudié la capacité d'autoréplication de bétons à base de (GR) de même performance que le béton source. Ils ont démontré que la qualité des graviers recyclés dépendait des performances du béton source.

Ce rapport entre la quantité de pâte adhérente et la qualité du granulat recyclé reste toutefois à exprimer en fonction de la qualité de la pâte du (BP).

L'effet de la qualité de la pâte du béton parent sur les propriétés des graviers recyclés a été étudié par Kou & Poon, (2015) à partir de bétons parents de résistances mécaniques allant de 30 à 100 MPa, concassés pour obtenir un D_{max} de 20 mm. Les résultats révèlent alors que la résistance à la compression de bétons à haute performance à base de graviers recyclés (100% de substitution) provenant des BP de 80 et 100 MPa est similaire voire légèrement supérieure à celle du béton de graviers naturel. Ces résultats ont été confirmés par Akbarnezhad et al. (2013) en intégrant également l'effet du cycle de concassage.

Par conséquent, l'objectif de cet article est de quantifier l'influence de la qualité des (BP) dont les caractéristiques sont connues sur les performances des bétons de deuxième génération.

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

Le protocole expérimental ci-après définit la méthode mise en œuvre afin de caractériser d'une part les bétons parents et les granulats recyclés résultant de leur concassage.

2. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le protocole expérimental peut se décomposer en deux cycles :

- La fabrication des granulats recyclés au sein du site industriel de l'entreprise Mialannes à Pignan (34) ; fabrication des deux (BP), concassage et fabrication des familles de (GR) de nature et de granulométrie différentes.
- La caractérisation des (GR) qui a été réalisée avec les moyens d'essais du laboratoire C2MA à IMT Mines d'Alès.

2.1. Origine des granulats recyclés

Les (GR) utilisés dans notre étude sont exclusivement issus de deux (BP), représentatifs des bétons standards employés sur des chantiers de bâtiment (C25/30) ou d'infrastructures de génie civil (C40/47). Ces bétons confectionnés en centrale BPE selon un procédé industriel ont subi par la suite un procédé de concassage et de criblage au sein de l'usine prévue à cet effet pour produire des granulats recyclés de composition maîtrisée et de différentes coupures granulométriques.

2.1.1. Confection des bétons parents

Les deux bétons ont été confectionnés en conditions de centrale BPE (Figure 1) :

- Un béton de type XC1 C25/30 D16 S4 employé dans le bâtiment [BP-C25],
- Un béton de type XF1 C40/50 D16 S4 employé dans les infrastructures de génie civil [BP-C40].



J-0

Coulage – bennes de 4 m³



J+2

Démoulage



J+2 à J+50

Séchage

Figure 1 : Processus de confection des bétons parents - usine Mialannes à Pignan (Hérault)

Un volume de l'ordre de 8 m³ a été réalisé pour chaque composition. Afin de différencier ces deux (BP), ils ont été teintés dans la masse : teinte grise pour le béton [BP-C25] et teinte ocre pour le béton [BP-C40]. Leurs formulations respectives sont données dans le tableau 1. On notera ici, que les formulations font intervenir un ciment CEM I sans ajout de fines.

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

Tableau 1 : Formulation des bétons parents

Intitulé	Classe de résistance	Fc28 (Mpa)	CEMI 52,5N (kg/m ³)	E _{eff} (kg/m ³)	0/4 concassé	0/4 mixte	GN 4/16	Plast. Prémia 180	E _{eff} /C
[BP-C25]	C25/30	30,80	300	187	514	431	1003	-	0,63
[BP-C40]	C40/50	49,50	461	200	-	814	1034	1,76	0,44

Avant de fabriquer les (GR), les deux (BP) ont été caractérisés par la mesure des densités sèches du béton et de la pâte, le calcul des teneurs en pâte et en granulats, le rapport E_{eff}/C, la mesure et le calcul des porosités à l'eau du béton et de la pâte. La figure 2 synthétise ces premiers résultats.

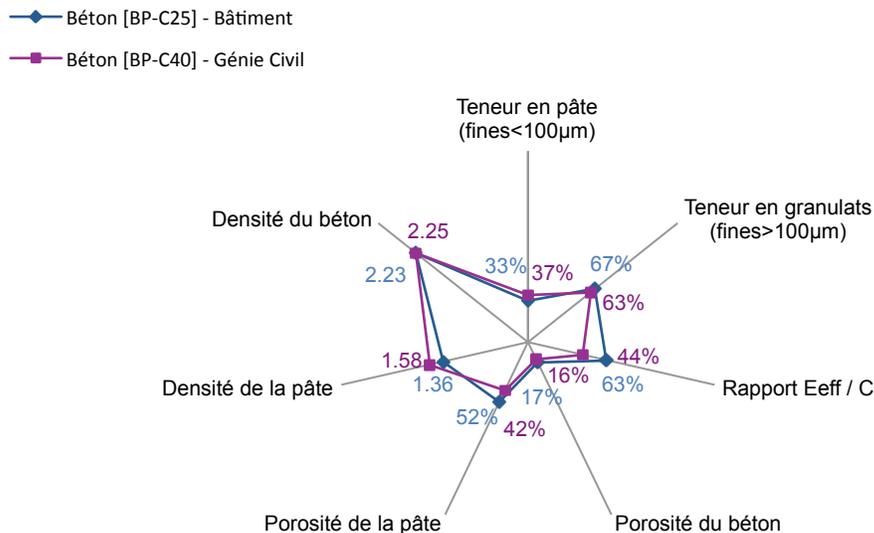


Figure 2 : Propriétés des bétons parents

Les (BP) sont constitués de granulats naturels concassés de même provenance. Pour des raisons liées à la maniabilité du béton frais, le béton BP-C25 est composé de deux sables, un sable concassé de module de finesse égal à 3,10 (NF EN 12 620) et un sable mixte de module de finesse égal 3,31. Le béton BP-C40 est composé uniquement de sable mixte (mélange alluvionnaire et concassé), la classe de consistance S4 est obtenue en utilisant un super plastifiant. Les (BP) présentent des teneurs en eau très différentes, qui se traduisent par des rapports E_{eff}/C différents (Tableau 1). Le béton BP-C40 présente une plus grande quantité de pâte mais de densité plus élevée que le béton BP-C25, ce qui justifie l'écart de porosités entre les pâtes adhérentes aux granulats (Figure 2).

2.1.2. Processus de concassage et criblage

Le processus de préparation employé consiste tout d'abord à réduire les blocs en morceaux de diamètre inférieur à 800 mm à l'aide d'un brise roche hydraulique puis à concasser ces blocs à l'aide d'un concasseur à percussion (Metso – Lokotrack LT 1213S).

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018



J+50
Concassage par Metso –
Lokotrack LT 1213S



J+50
Récupération granulométrie
0/14 mm



J+50
Criblage 0/4, 4/6 et 5/14

Figure 3 : Processus de concassage des bétons parents - usine Mialanes/Biocama à Pignan

Le concassage associé à une phase de criblage a ainsi permis de générer des classes granulaires compatibles avec un usage dans des bétons de structure et des bétons à hautes performances en particulier. Cette catégorie de concasseur est bien adaptée pour le traitement d'un matériau préalablement sélectionné (Silva et al., 2017), mais son utilisation est limitée pour l'élimination de contaminants fixés au béton parent.

La quantité de pâte présente dans les granulats recyclés augmente avec la réduction de la taille des granulats (Sánchez de Juan & Alaejos Gutiérrez, 2009). La granulométrie des granulats recyclés représente un paramètre important dans les conditions limites de leur utilisation. Le processus de concassage employé est à l'origine de cet écart. Les sables recyclés devraient avoir ainsi une densité plus faible et un taux d'absorption d'eau plus élevé que les graviers recyclés.

Les granulats recyclés ainsi obtenus ont été stockés sous abris puis ont été soumis aux essais de caractérisation à J+250 jours.

3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRANULATS RECYCLÉS

Les principales propriétés des granulats recyclés, utiles pour déterminer leurs performances futures dans un nouveau béton, sont la granulométrie, l'absorption d'eau, la densité, le taux d'abrasion et la quantité de pâte adhérente aux granulats (Sánchez de Juan & Alaejos Gutiérrez, 2009).

La caractérisation des (GR) menée dans cette étude répond à ces critères tout en ayant pour objectif d'identifier les différents paramètres pouvant influencer sur la durabilité des bétons, c'est-à-dire la résistance mécanique, l'absorption d'eau par capillarité, la perméabilité au gaz et la résistance à la carbonatation.

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

3.1. Propriétés macroscopiques

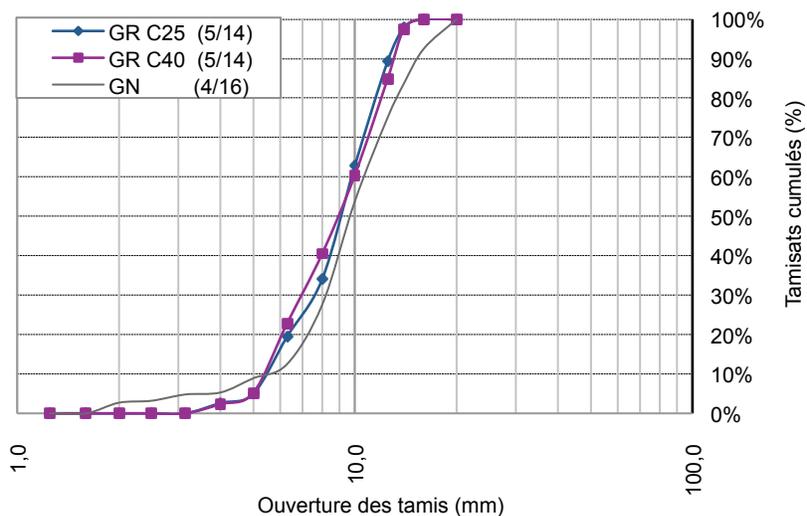


Figure 4 : Courbe granulométrique – GR 5/14 et GN 4/16

Le concassage des bétons parents constitués de granulats naturels 0/4 et 4/16, a permis la réalisation de granulats recyclés présentant une granulométrie identique pour les deux bétons parents : 0/4, 4/6 et 5/14. Les courbes granulométriques des graviers naturels et recyclés sont données Figure 4. Le D_{max} des graviers recyclés est inférieur à celui des granulats naturels, ce qui a été observé également par Akbarnezhad, Ong, Tam, & Zhang, (2013). Le D_{min} des graviers recyclés est supérieur à celui des granulats naturels en raison du processus de criblage employé. Les propriétés physiques des granulats ont été mesurées dans le respect des normes européennes afférentes (Figure 5).

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

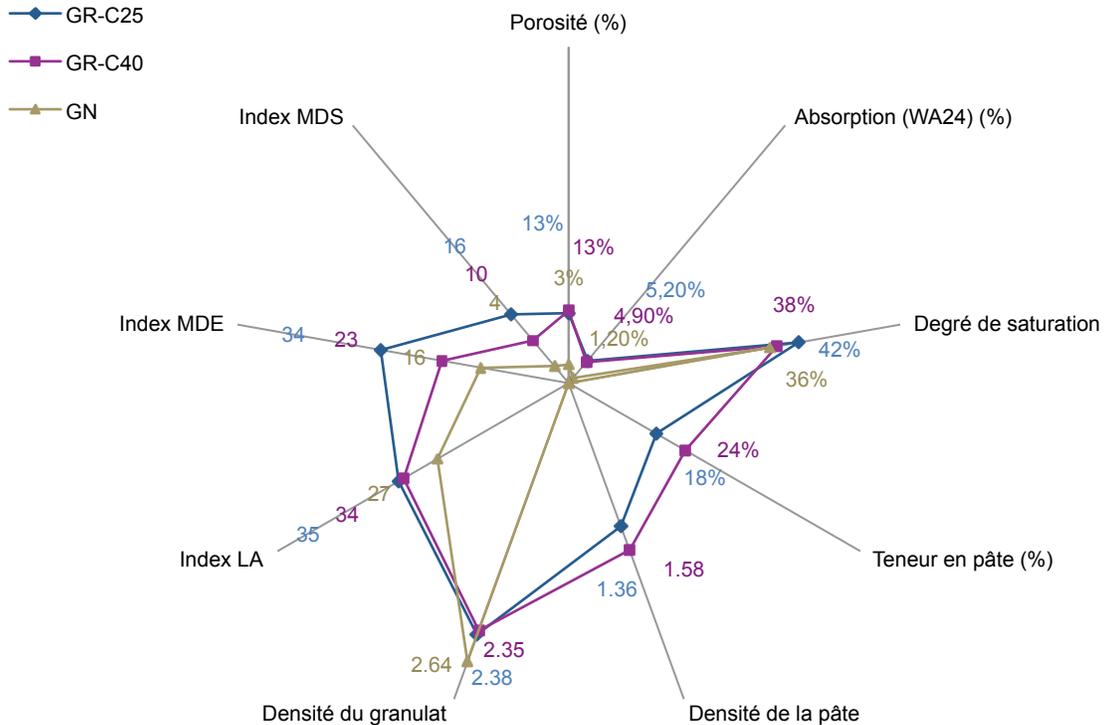


Figure 5 : Propriété physiques des granulats naturels et recyclés

Les essais de caractérisation dont les résultats sont synthétisés sur la figure 5 montrent une teneur en pâte supérieure pour le GR-C40 (24% contre 18%). Par contre la pâte du GR-40 est plus dense que celle du GR-C25 (1,58 contre 1,36). Ces facteurs semblent s'équilibrer et confèrent aux GR une capacité de résistance à la fragmentation comparable.

En suivant la classification des GR de Silva, de Brito, & Dhir (2014) les GR-C40 et GR-C25 sont de classe B-I, ce qui conduirait à fragiliser les bétons à base de granulats recyclés, avec des pertes de résistance estimées entre 31 et 34 % toujours selon Silva et al.(2014). Le degré de qualité des GR reste toutefois à définir selon des critères de performance mécanique et de durabilité. Les méthodes employées pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Indice Los Angeles LA) et à l'usure en condition saturé ou non (Indices Micro Deval MDS & MDE) sont respectivement conformes aux normes NF EN 1097-2 et NF EN 1097-1, sur une coupure granulométrique 10/14 pour l'ensemble des granulats.

Les résultats sont disponibles sur les courbes 6 et 7 ci-dessous.

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

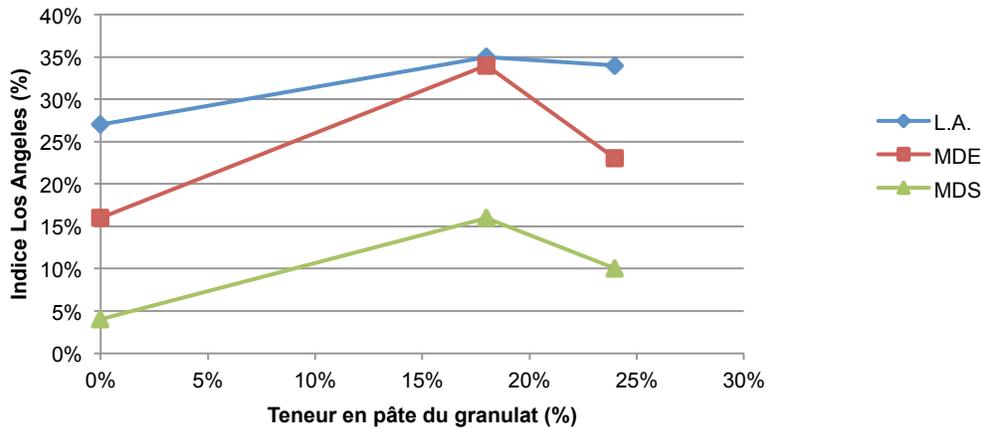


Figure 6: Influence de la teneur de pâte sur les index de résistance mécanique des granulats.

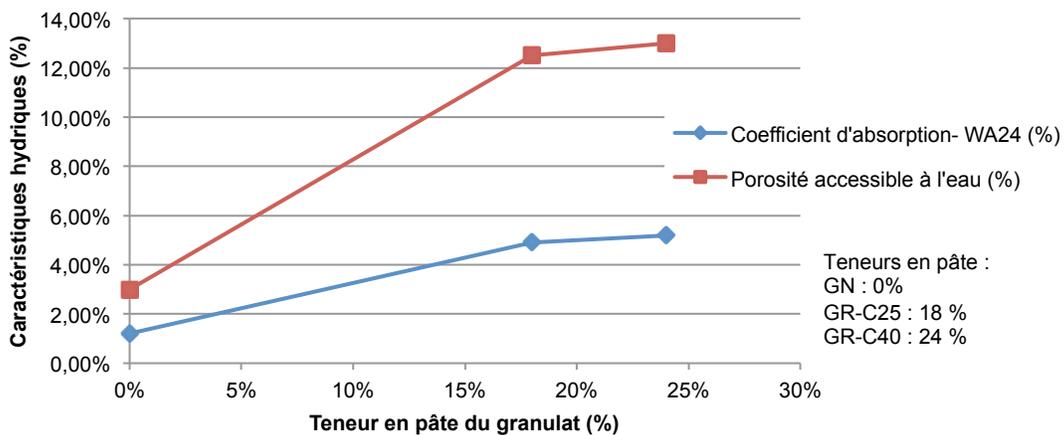


Figure 7 : Influence de la teneur de pâte sur les caractéristiques hydriques des granulats

Par contre, les résultats de ces essais de caractérisation macroscopique montrent que le taux d'usure (Index Micro Deval MDE & MDS) semble davantage lié à la qualité de la pâte plutôt qu'à la quantité de pâte. En effet, le GR-C40 présente un taux d'usure inférieur au GR-C25, malgré une teneur en pâte supérieure.

En ce qui concerne la variation du taux de fragmentation des graviers (Index Los Angeles L.A.) un écart de 7 à 8 % apparaît entre le granulat naturel et les granulats recyclés tandis que l'influence de la qualité de pâte du GR-C40 ne semble pas intervenir. Ce résultat est identique à ceux obtenus par Akbarnezhad et al. (2013) pour des graviers recyclés de D_{max} égal à 12 mm ou 20 mm.

La pâte adhérente sur les granulats recyclés, conduit à une augmentation importante (facteur de 4) de la porosité accessible à l'eau des graviers recyclés, que ce soit pour le GR-C25 ou le GR-C40 (figure 7). Cette porosité ne se retrouve que partiellement accessible sous pression atmosphérique en 24 heures, comme le révèle l'évolution du coefficient d'absorption d'eau à 24 heures (Figure 9). La majorité du volume des pores n'est accessible qu'après mise sous vide de l'échantillon conformément à la norme NF EN 18-459. La tortuosité et la topographie du milieu poreux peuvent expliquer ces écarts. L'analyse microscopique de la porosité par intrusion de mercure permettra d'éclaircir ce point.

3.2. Propriétés microscopiques

Dans la continuité des essais de caractérisation macroscopiques, des essais à l'échelle micro ont été menés et notamment la mesure de la porosité au porosimètre à mercure (figure 8) et la prise de clichés au Microscope Electronique à Balayage (figure 9).

Les essais de mesure de la porosité par intrusion de mercure montrent que les granulats recyclés comportent trois modes poreux. Le premier mode correspond à la porosité des granulats naturels (Figure 8), il se situe entre $0,1 \mu\text{m}$ et $4 \mu\text{m}$. Le second mode poreux (présent uniquement pour les granulats recyclés) correspond à la porosité capillaire de la pâte de ciment adhérente au granulat naturel. Le rayon moyen de ce mode poreux est égal à 101 nm pour le GR-C25 et à 65 nm pour le GR-C40 (Figure 8). Enfin, le dernier mode poreux correspond à la porosité des hydrates de la pâte de ciment adhérente au granulat naturel. Le rayon moyen de ce mode poreux est égal à 18 nm pour le GR-C25 et à 14 nm pour le GR-C40. Ce dernier mode poreux n'existe que pour les granulats recyclés (Figure 8).

Le rapport entre la porosité accessible à l'eau et la porosité mesurée par intrusion de mercure est validé par une loi de régression linéaire (Baroghel Bouny, 2000). Les pores présents dans la pâte des GR-C40 sont plus petits que ceux qui se retrouvent dans la pâte des GR-C25. L'intervalle entre extrema des volumes d'intrusion des GR-C25 et GR-C40 traduit une porosité plus fermée pour la pâte issue d'un béton BP-C40 initialement plus performante et plus dense. La qualité de la pâte du GR-C40 est ainsi meilleure que celle du GR-C25.

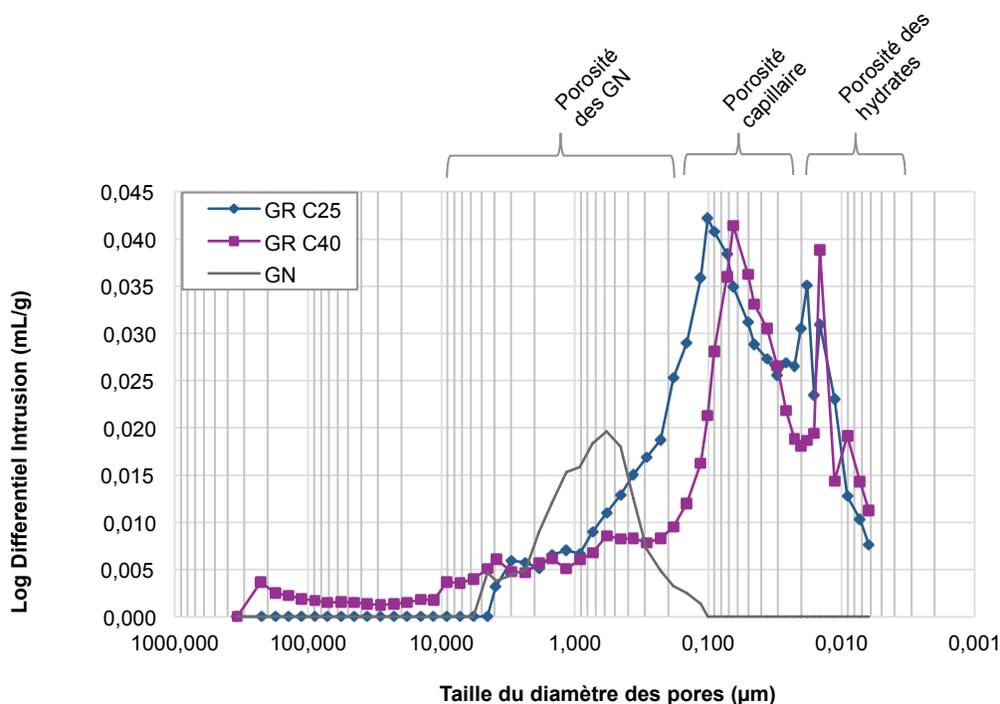


Figure 8 : Mesure de porosité par intrusion de mercure

Les granulats naturels analysés au microscope électronique à balayage, d'origine silico-calcaire, montrent une composition chimique avec une teneur en calcium et en silicium importante. L'exploitation des photos

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

des granulats recyclés, avec un grossissement égal à 1500 montre la présence de microfissures au sein de la pâte adhérente au granulat d'une épaisseur moyenne comprise entre 1 et 5 μm , localisées majoritairement dans la pâte adhérente et à l'interface entre la pâte et le granulat (Figure 9).

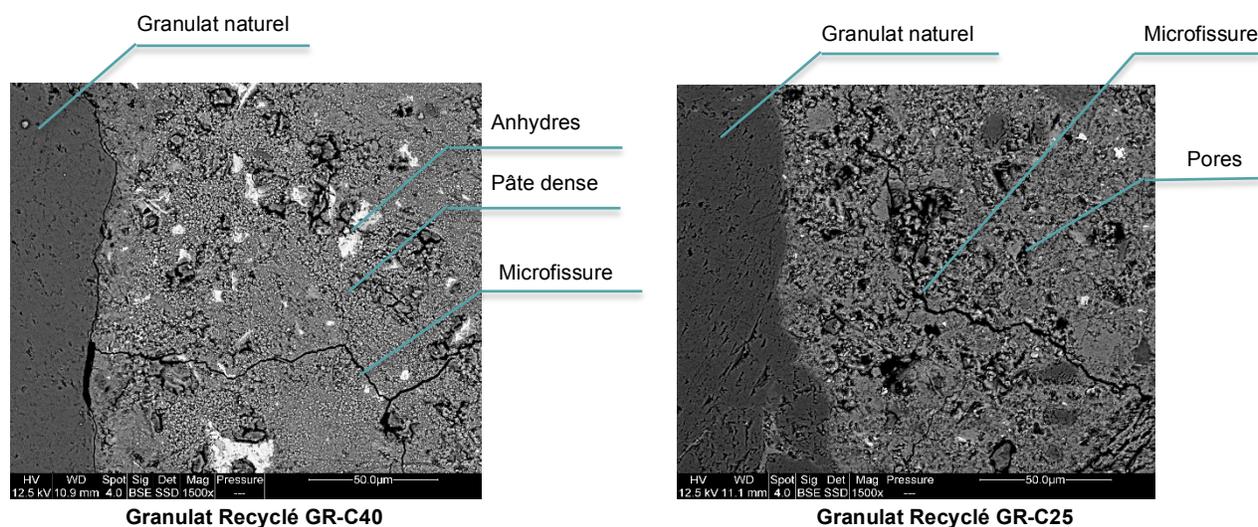


Figure 9 : Photos au Microscope Electronique à Balayage des GR

Ces microfissures n'apparaissant pas dans la pâte adhérente des échantillons de béton récupérés avant passage au concasseur mobile par percussion, elles résultent probablement du procédé de concassage. La multiplication des phases de concassage et de broyage réduisent effectivement la rugosité, l'irrégularité et la quantité de pâte adhérente aux granulats naturels (Silva et al., 2017). Le procédé de fracturation fragilise ainsi les granulats recyclés, par la création de microfissures dans la pâte adhérente. Ces microfissures peuvent par la suite constituer des plans de rupture préférentiels des bétons à base de granulats recyclés.

En se basant toujours sur l'exploitation des clichés obtenus au MEB, l'analyse de l'auréole de transition effectuée sur les granulats recyclés, selon les méthodes exposées par (Nguyen, 2013) à l'interface entre la pâte et les granulats naturels, sur une épaisseur voisine de 60 μm révèle une porosité moyenne de 10 à 15 % dans les GR-C25 et une porosité de 5 à 10% dans les GR-C40. Cet écart de porosité s'explique par la plus grande densité de la pâte adhérente des GR-C40. La faible porosité obtenue peut d'ailleurs traduire l'effet de la carbonatation de la pâte adhérente, un essai à la phénolphtaléine permettra de le confirmer.

La question de l'âge des (GR) produits dans cette étude peut se poser car ils sont jeunes en comparaison de (GR) que l'on retrouve dans la pratique qui sont issus d'ouvrages pouvant avoir plusieurs décennies. Le programme général des essais a permis de laisser vieillir les (GR) pendant 6 mois avant utilisation. Cette durée est importante en comparaison d'autres études (3 mois), (DAO, 2012), par conséquent l'hydratation de la pâte adhérente aux granulats recyclés a été jugée suffisante au moment de la réalisation des essais de caractérisation des granulats (J+250 jours),

4. CONCLUSIONS

Cette étude constitue la première partie de travaux sur l'emploi de (GR) dans des bétons de type BHP. Pour ne pas être tributaire de la grande disparité des granulats recyclés provenant des usines de

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

recyclage, les matériaux sources (BP) ont été confectionnés spécifiquement pour atteindre de bonnes caractéristiques de granulats recyclés.

Cette étude met ainsi en évidence les facteurs influençant la qualité des granulats recyclés issus de deux bétons parents préalablement caractérisés.

Les résultats obtenus permettent de retenir les conclusions suivantes :

- La qualité de la pâte du béton parent a une incidence tout aussi importante que la quantité de pâte adhérente sur la qualité et la performance du granulat recyclé obtenu.
- La qualité de la pâte du béton parent peut être exprimée en fonction de la variation du taux d'usure des granulats recyclés par une mesure de l'index de Microdeval.
- Les moyens de concassage utiles à la confection des granulats recyclés doivent être adaptés à la performance de la pâte du béton parent et de la qualité des granulats naturels. Les concasseurs à percussion mobile moins puissants éliminent moins de pâte (Silva et al., 2017) qu'un concasseur à mâchoires, mais présentent toutefois l'avantage de limiter la microfissuration de la pâte adhérente aux granulats naturels.
- La pâte du béton parent C40/50, de plus faible rapport E_{eff}/C que celle du béton parent C25/30, présente d'avantage d'anhydres notamment dans la zone d'auréole de transition. Le coefficient d'absorption d'eau à 24 heures des granulats recyclés étant 5 fois plus élevé que celui des granulats naturels, il conviendra de vérifier si l'eau absorbée dans les granulats recyclés permet d'améliorer l'hydratation de la pâte des nouveaux bétons par effet de cure interne.

Andreu & Miren (2014) ont effectué une étude comparable, en utilisant des bétons parents de résistance égale à 40 MPa, 60 MPa et 100 MPa et ont montré des résultats aux tendances similaires sur les variations de densité et d'absorption d'eau des granulats recyclés.

5. RÉFÉRENCES

- Agrela, F., Alaejos, P., & De Juan, M. S. (2013). 12 – Properties of concrete with recycled aggregates. In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (pp. 304–329).
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Tam, C. T., & Zhang, M. H. (2013). Effects of the Parent Concrete Properties and Crushing Procedure on the Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregates, (December), 1795–1802. (ASCE)MT.1943-5533.0000789.
- Andreu, G., & Miren, E. (2014). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227–235.
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, 357–369. [conbuildmat.2014.12.103](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103)
- Coelho, A., & De Brito, J. (2013). Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW). In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (pp. 210–245). Elsevier.
- DAO, D.-T. (2012). *(Multi-) recyclage du béton hydraulique. In french, PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes*. Ecole Centrale de Nantes
- Dhir, R. K., Paine, K. A., and Dyer, T. D. (2004). "Recycling construction and demolition wastes in concrete." *Concrete*, 38(3), 25–28.

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

- Dos Santos, J. R., Branco, F., and De Brito, J. (2004). "Mechanical properties of concrete with coarse recycled aggregates." *J. Int. Assoc. Bridge Struct. Eng.*, 14(3), 213–215.
- Kou, S., & Poon, C. (2015). Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 501–508.conbuildmat.2014.12.035
- Lotfy, A., & Al-Fayez, M. (2015). Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 61, 36–43. CEMCONCOMP.2015.02.009
- Nguyen, T. D. (2013). *Etude de la zone d'interphase "granulats calcaires poreux-pâte de ciment": influence des propriétés physico-mécaniques des granulats; conséquences sur les propriétés mécaniques du mortier. Thèse de doctorat.* Ecole des Mines de Saint Etienne.
- Pedro, D., De Brito, J., & Evangelista, L. (2017). Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties.conbuildmat.2017.07.215
- Pedro, D., de Brito, J., & Evangelista, L. (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*, 71, 141–151.
- Richardson, A. E. (2013). 13 – Strength and durability of concrete using recycled aggregates (RAs). In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (pp. 330–348).
- Sánchez, M., Juan, D., & Alaejos, P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872–877.conbuildmat.2008.04.012
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217.CONBUILDMAT.2014.04.117
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 598–614.JCLEPRO.2016.12.070
- Souche, J.-C. (2015). *Etude du retrait plastique des bétons à base de granulats recyclés avec mesure de l'influence de leur degré de saturation. In french PhD Thesis.* Université de Montpellier.