

Liège, Belgique
8-9 Novembre 2018

CARACTÉRISATION DE L'HÉTÉROGENÉITÉ DES GRANULATS DE BETON RECYCLÉ, UNE VARIABILITÉ INTRINSÈQUE

Eliane KHOURY^{AB}, Weslei AMBROS^C, Bogdan CAZACLIU^A, Carlos HOFFMANN SAMPAIO^C, Sébastien REMOND^B

^A FSTTAR, MAST- GPEM- Granulats Procédés et Elaboration des Matériaux, Route de Bouaye-CS4, 44344 Bouguenais, France

^B IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 - LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement, F-59000 Lille, France

^C Laboratoire de traitement des minéraux, Université fédérale Rio Grande do Sul, 9500 Bento Gonçalves Avenue, Zip Code: 91501-970, Porto Alegre, Brazil

Résumé : Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés de deux matériaux différents: des granulats naturels et de la pâte de ciment ancienne adhérente. Il est généralement admis que plus les GBR sont de petite taille, plus la quantité de pâte de ciment collée est importante. Dans cette étude, il est montré que pour une même classe granulaire donnée, de très grandes disparités peuvent être présentes dans la teneur en pâte, ce qui peut générer une dispersion dans les résultats des tests de caractérisation des GBR, surtout l'absorption d'eau. L'hétérogénéité d'une classe granulaire étroite de 6.3/10 mm est étudiée en triant des échantillons en fonction de leur densité en utilisant un jig à eau. Le tri par jig est essentiellement une séparation par densité et non par taille. Il est montré que la moyenne des coefficients d'absorption d'eau déterminés après une immersion dans l'eau pendant 24 heures est d'environ 5% pour des échantillons représentatif quartés avant les essais de séparation par densités au jig. Tandis que pour les spécimens homogènes séparés par densité, l'absorption d'eau varie de 2% à 9%. La distribution de l'absorption d'eau dans un échantillon de 120 kg de GBR est bien estimée par une distribution log-normale. Cette caractérisation de l'hétérogénéité intrinsèque des GBR offre la possibilité de définir des échantillons représentatifs, non seulement en ce qui concerne la taille mais aussi la composition minérale des grains dans les stocks de GBR. Ainsi, après avoir discuté des résultats de cette étude, le jig à eau semble être un outil efficace pour séparer ou trier les GBR et obtenir des échantillons homogènes pour leur caractérisation et la possibilité de reconstruire l'échantillon global.

Mots-clés : granulats de béton recyclés (GBR), absorption d'eau (WA), hétérogénéité, tri par densité, jig à eau.

1. INTRODUCTION

De nombreux pays ont fait de gros efforts pour traiter de grandes quantités de déchets de construction et de démolition (CDW) et de les réintroduire dans le cycle de vie de la construction. Cependant, la réutilisation de ces déchets pour produire du nouveau béton n'a pas encore été largement adoptée, et la mise en décharge demeure la principale solution pour éliminer ces matériaux (Coelho et al., 2013) (Cardoso et al., 2016). D'autre part, différentes études ont été menées pour développer la production de béton avec des granulats de béton recyclés (GBR) conformément aux codes et normes applicables (Silva et al., 2014). Jusqu'à présent, seul un petit pourcentage des granulats naturels ont été remplacés par ces matériaux pour formuler de nouveaux bétons recyclés. La difficulté d'utilisation des GBR dans la formulation des bétons est liée à leur forte absorption d'eau et à l'hétérogénéité temporelle de cette caractéristique (Angulo et al., 2010).

En raison de leur forte porosité, les GBR absorbent une partie de l'eau de gâchage, ce qui peut réduire l'ouvrabilité du béton, à moins que l'eau absorbée ne soit prise en compte dans la conception du mélange. La méconnaissance de l'absorption d'eau exacte se produisant au cours du malaxage entraîne toutefois une mauvaise estimation du coefficient d'absorption d'eau des GBR et conduit à une détermination inadéquate de l'eau efficace pour le béton recyclé, induisant de mauvaises propriétés mécaniques (excès dans l'eau de gâchage) ou une mauvaise ouvrabilité des bétons recyclés (manque d'eau). La pré-saturation des GBR avant le mélange peut apparaître comme une solution technique potentielle. Cependant, la pré-saturation avant le malaxage du béton est une tâche complexe à l'échelle industrielle ce qui n'est généralement pas appliqué dans la fabrication de béton recyclé (Khoury et al., 2017). Par conséquent, une meilleure connaissance de la capacité d'absorption d'eau des GBR in situ paraît la meilleure solution pour contrôler l'eau dans le béton.

Plus généralement, une caractérisation sophistiquée (composition minérale, granulométrie, forme des particules, abrasion, densité, absorption d'eau et teneur en pâte ou en mortier de ciment) doit être réalisée pour mieux comprendre les effets de l'utilisation des GBR sur la production et la performance du béton recyclé (Belin et al., 2013). Ainsi, la première étape de la caractérisation consiste à extraire un échantillon représentatif et à déterminer différentes propriétés en fonction des voies de recyclage prévues (De Brito et al., 2016). Les granulats naturels peuvent présenter des hétérogénéités, mais les procédures décrites dans les normes européennes d'échantillonnage et de caractérisation permettent de produire des matériaux suffisamment cohérents pour la construction. Au contraire, les GBR sont composés de granulats naturels mais également de pâte de ciment durcie et d'autres impuretés qui ne sont pas réparties de façon homogène dans les différentes classes granulaires. Par conséquent, un lot de GBR présente une hétérogénéité très significative par rapport à celle des granulats naturels.

Ainsi, l'hétérogénéité des granulats de béton recyclés limite leur utilisation en raison de l'incertitude de leur comportement attendu (Khoury et al., 2017) (Joseph et al., 2015). En effet, une large dispersion des résultats peut être observée dans la littérature, principalement causée par les différentes sources et la qualité des bétons d'origine qui sont recyclés (de Juan et al., 2009) (Gonzalez et al., 2014). Ces résultats mettent en évidence les hétérogénéités et les difficultés de caractérisation des GBR et confirment la nécessité de contrôler leurs propriétés pour différentes applications (Duan et al., 2014). Il a déjà été démontré que la densité augmente et que la teneur en pâte de ciment collée diminue avec la fraction granulométrique du béton concassé (Abbas et al., 2009). De plus, in situ, le béton concassé obtenu à partir de CDW est toujours mélangé avec d'autres matériaux concassés tels que la brique, l'asphalte, le gypse, le verre, etc. Dans la littérature, des jigs ont été proposés pour trier les particules de béton et / ou pour diminuer les impuretés d'un lot de granulats recyclés mélangés suite à un tri de densité (Cazacliu et al., 2014).

L'objectif de cet article est de montrer que dans une même classe granulaire donnée d'un lot de GBR bien contrôlé et fabriqué industriellement, de grandes disparités peuvent être présentes dans la pâte de ciment adhérente, générant une dispersion significative dans les propriétés physiques. Un jig à eau de laboratoire est utilisé pour séparer les granulats de béton recyclé selon leur densité. Ensuite, les échantillons de densités homogènes sont caractérisés afin de déterminer l'absorption d'eau, la distribution granulométrique, les densités, la porosité et la teneur en pâte de ciment, afin d'évaluer leur distribution statistique dans le matériau d'origine.

2. PROCÉDURE EXPERIMENTALE

2.1 Matériaux

Un lot de GBR de classe granulaire 6.3 / 10 mm issu de la plateforme de recyclage de Gonesse (France) et composé à 99% de béton recyclé et 1% d'autres matériaux inertes est testé dans cette étude. Une fraction granulaire étroite est choisie pour souligner les différences de densité plutôt que les différences de taille des particules. Les principales propriétés physiques des GBR utilisés sont déterminées selon la norme NF EN 1097-6 sur la fraction initiale 6.3/10 mm non triée.

- coefficient d'absorption d'eau ($WA_{(24h)}$) : $4.88 \pm 0.11\%$
- densité réelle séchée (dans l'eau) (ρ_{rd}) : $2.308 \pm 0.004 \text{ g / cm}^3$
- densité absolue (dans l'eau) (ρ_a) : $2.603 \pm 0.008 \text{ g / cm}^3$.

2.2 Jig à eau

Le tri des GBR est effectué dans un jig à eau à l'échelle du lot, avec le modèle Alljig® S 400 de AllMineral possédant une capacité d'environ 20 kg par lot, **Figure 1**.



Figure 1. Jig à eau

2.3 Procédure de séparation par densité

Dans un premier temps, 120 kg de GBR sont triés dans le jig en six passages de séparation, notés JIG 1, JIG 2, JIG 3, JIG 4, JIG 5 et JIG 6, avec une masse de 20 kg de GBR chacun remplissant la boîte jusqu'à environ 15 cm. Chaque lot est séparé en six couches de 2.5 cm de hauteur, notées L1 (en bas) à L6 (en haut) pour obtenir les GBR triés de «Génération 1»: L1, L2, L3, L4, L5 et L6, **Figure 2**. Pour finir la première étape de séparation, l'absorption d'eau ($WA_{(24h)}$) et les densités (ρ_{rd} et ρ_a) des GBR issus des essais de séparation : JIG 1, JIG 2, JIG 3 et JIG 4 sont déterminées selon la norme NF EN 1097-6. Dans la seconde étape de séparation, les couches correspondant au même niveau dans les 6 jigs de la Génération 1 sont mélangées et soumises à une nouvelle séparation. Les six nouvelles séries de séparation: JIG L1-JIG L2-JIG L3-JIG L4-JIG L5 et JIG L6, **Figure 2**, produisent 36 lots de GBR triés notés: LiLj avec $i = j = 1$ à 6. Pour tous les GBR triés de la «Génération 2», l'absorption d'eau ($WA_{(24h)}$) et les densités (ρ_{rd} et ρ_a) sont déterminées avec le test standard NF EN 1097-6. Dans l'étape finale, 6 lots de GBR triés issus de la "Génération 2" (L3L3, L3L4, L3L5, L5L3, L5L4 et L5L5) ayant des valeurs de $WA_{(24h)}$ similaires sont mélangés de nouveau et sont triés pour une troisième fois (JIG L3L5). Le test standard NF EN 1097-6 est utilisé pour mesurer l'absorption d'eau et la densité de ces GBR triés de la «Génération 3». Une caractérisation complémentaire des GBR triés et non triés est faite: porosité, perte de masse entre 75°C et 475°C (proportionnelle à la teneur en pâte de ciment), distribution granulométrique et taille des pores (porosimètre à mercure). Le **Tableau 1** résume tous les essais de caractérisation effectués pour les GBR hétérogènes et triés.

Tableau 1. Récapitulatif des essais de caractérisation des GBR hétérogènes et triés

| Caractérisation des GBR triés | Absorption d'eau / Densités (NF EN 1097-6) WA | Vidéo granulométrie (VDG) | Porosimétrie à intrusion de mercure | Pycnomètre à hélium | Perte de masse entre 75°C et 475°C |
|-------------------------------|---|---------------------------|---|---|------------------------------------|
| GBR d'origine (hétérogènes) | x | x | | | |
| "Génération 1" | | | | | |
| JIG 1 | x | x | | | |
| JIG 2 | x | x | | | |
| JIG 3 | x | x | | | |
| JIG 4 | x | x | | | |
| "Génération 2" | | | | | |
| JIG L1 | x | x | 8 échantillons des GBR triés de la Génération 2 | 8 échantillons des GBR triés de la Génération 2 | x |
| JIG L2 | x | x | | | x |
| JIG L3 | x | x | | | x |
| JIG L4 | x | x | | | x |
| JIG L5 | x | x | | | x |
| JIG L6 | x | x | | | x |
| "Génération 3" | | | | | |
| JIG L3L5 | x | x | | | |

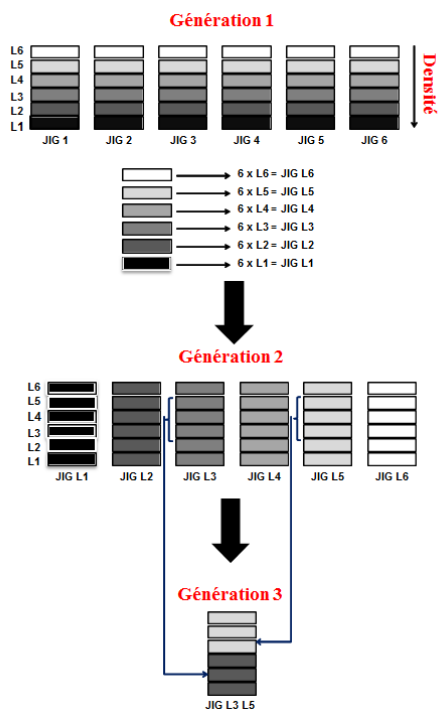


Figure 2. Procédure expérimentale de l'essai de séparation au jig à eau, séparation des GBR par densité en 3 générations

3. RÉSULTATS et DISCUSSION

3.1. Densités

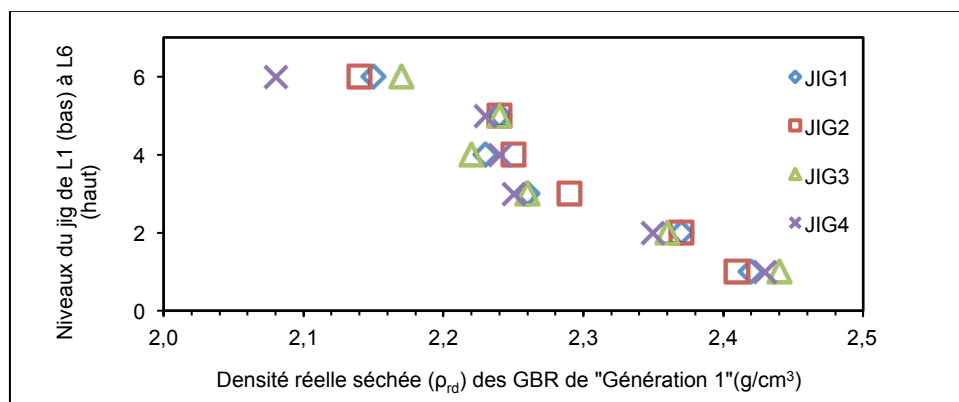


Figure 3. Densités réelles des GBR de « Génération 1 » variant dans les niveaux du jig à eau

La **Figure 3** et la **Figure 4** montrent la variation de la densité réelle ρ_{rd} des GBR d'une classe granulaire de 6.3/10mm dans les 6 niveaux des jigs de la « Génération 1 » et la « Génération 2 » respectivement. Comme le montre la **Figure 3**, ρ_{rd} diminue avec la hauteur des niveaux du jig. Pour les GBR triés dans la couche L1 de la « Génération 1 », ρ_{rd} varie de 2.41 à 2.44 g/cm³ et dans la couche L6 elle varie de 2.08 à 2.17 g/cm³. Pour les GBR triés de la « Génération 2 », et comme le montre la **Figure 4**, ρ_{rd} varie de 2.56 dans la couche L1 à 2.3 g/cm³ dans la couche L6 du JIGL1. Dans le JIGL6, ρ_{rd} varie de 2.3 (L1) à 2.02 g/cm³ (L6). Ainsi, on peut déduire que le cycle supplémentaire dans la procédure de séparation au jig permet une meilleure séparation des GBR. Cette interprétation du résultat est valable pour toutes les couches de la Génération 2. La littérature montre que la densité réelle sèche ρ_{rd} de la plupart des granulats naturels se situe entre 2.40-2.60 g / cm³ et entre 1.60 et 2.00 g /cm³ pour les pâtes de ciment pures (Cardoso et al., 2016) (de Juan et al., 2009) (Webb P., 2001). De plus, dans la littérature, il est montré aussi que la teneur en pâte de ciment adhérente dans les GBR peut varier en fonction de la composition initiale du béton et de la taille des particules. Les résultats précédents suggèrent donc que les GBR recueillis dans les couches inférieures du jig sont composés essentiellement de granulats naturels alors que ceux des couches supérieures contiennent des teneurs en pâte adhérente proches de celles que l'on peut trouver dans les sables recyclés.

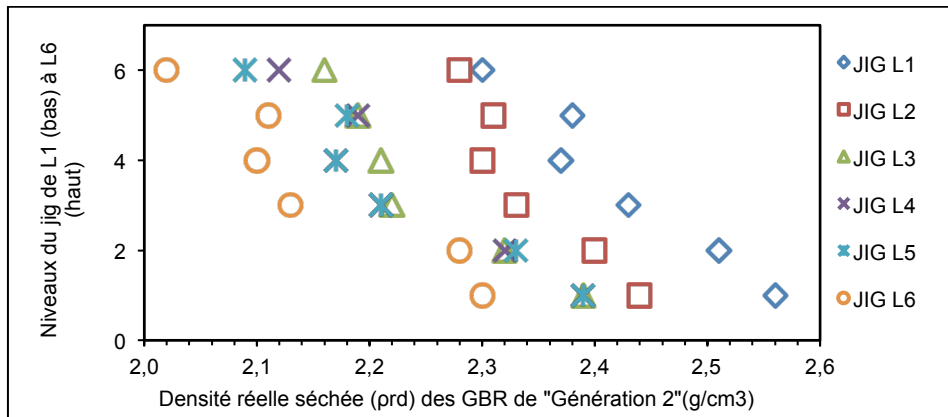


Figure 4. Densités réelles des GBR de « Génération 2 » variant dans les couches de jig à eau

3.2. Distributions granulométriques

La **Figure 5** présente la distribution granulométrique des GBR triés de « Génération 2 » en utilisant un vidéogranulomètre VDG. Seules 5 courbes granulométriques parmi 22 résultats sont présentées pour plus de clarté.

De petites différences sont observées entre les courbes granulométriques. Cependant, elles semblent être disposées en fonction du niveau de la couche et proportionnellement à la densité réelle ρ_{rd} , suggérant que la séparation dans la jig est due à la fois à la densité et à la taille des particules.

Pour confirmer cette observation, le D_{50} (taille pour laquelle la fonction cumulative est égale à 50%) est déterminé pour chaque génération des essais de jig. La **Figure 6** montre la variation de D_{50} en fonction de la densité séchée réelle des produits des générations 1 et 2 des essais de jig (le D_{50} de l'échantillon hétérogène initial est également indiqué à titre de comparaison). Comme on peut le voir sur le graphique, le D_{50} est plus petit pour les granulats moins denses. D_{50} varie linéairement avec ρ_{rd} avec des coefficients de détermination de $R^2 = 0.99$ et 0.94 respectivement pour les GBR triés de la "Génération 1" et de la "Génération 2". Cependant, les différences de taille étaient petites et D_{50} varie entre 8.4 mm et 9.2 mm montrant que la séparation peut être considérée essentiellement par densité.

L'influence de la taille des particules est négligeable comparée à celle de la densité du fait qu'une classe granulaire étroite est choisie pour l'étude.

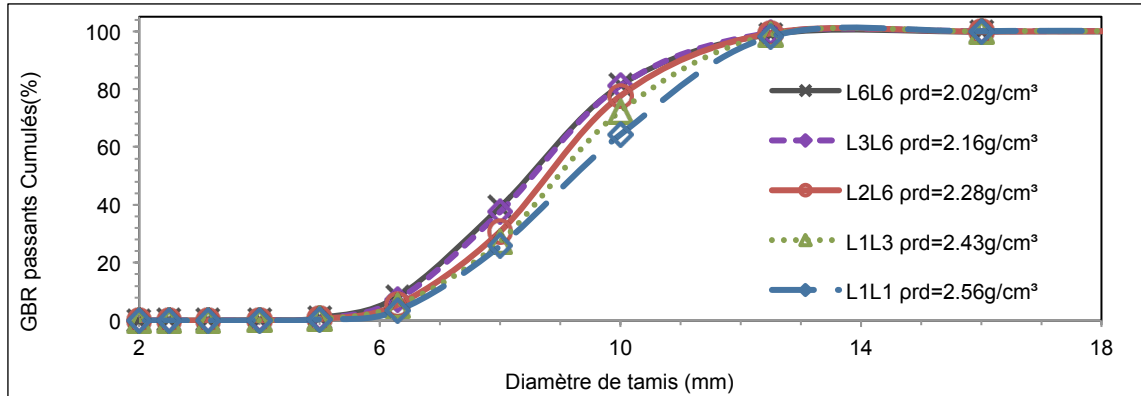


Figure 5. Répartition des tailles de particules pour cinq échantillons de GBR triés de différentes densités de la Génération 2 des essais de jig à eau

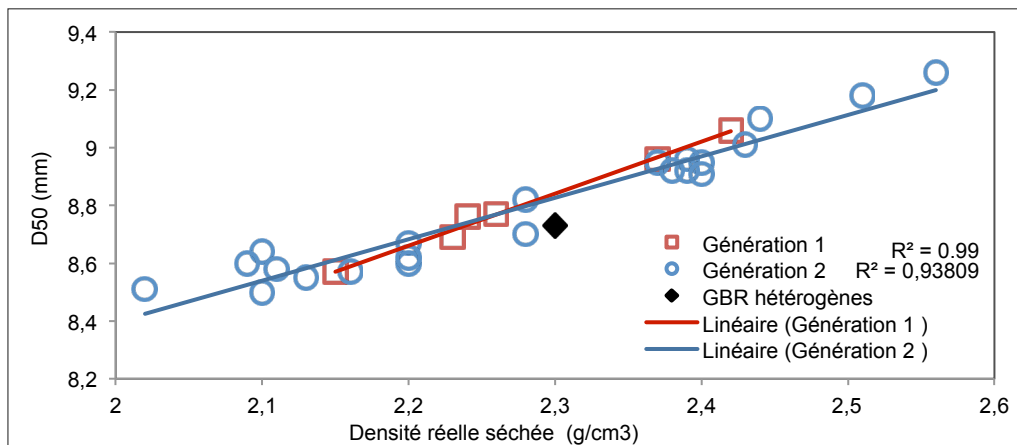


Figure 6. Variation du diamètre D50 des GBR de "Génération 1", "Génération 2" triés et du GBR hétérogène en fonction de leur densité réelle séchée

3.3. Relation entre la teneur en pâte de ciment et la densité réelle séchée des GBR

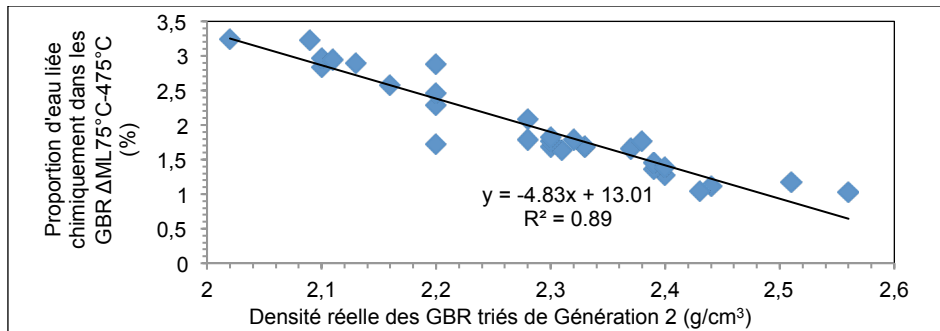


Figure 7. $\Delta ML_{75^{\circ}C-475^{\circ}C}$ en fonction de la densité réelle des GBR triés de la Génération 2

La **Figure 7** montre la corrélation entre la proportion d'eau chimiquement liée ($\Delta ML_{75^{\circ}C-475^{\circ}C}$) et la densité réelle séchée des GBR triés de « Génération 2 » après la séparation au jig à eau. On peut voir que lorsque la valeur de $\Delta ML_{75^{\circ}C-475^{\circ}C}$ diminue, la densité réelle séchée augmente. En outre, la densité réelle sèche varie linéairement avec $\Delta ML_{75^{\circ}C-475^{\circ}C}$ avec un facteur de détermination égal à $R^2 = 0.89$. Les mêmes résultats sont observés dans l'étude de (Zhao et al., 2015) et celle de (LE 2015). Cette perte de masse est proportionnelle à la teneur en pâte de ciment des GBR. La mesure de l'eau liée chimiquement est donc une mesure indirecte de la teneur en pâte de ciment. Ces résultats confirment que la variation

de densité dans une classe granulaire donnée de GBR est principalement due à des teneurs en pâte de ciment différentes.

3.4. Capacité d'absorption d'eau

La **Figure 8** montre la variation de WA_{24h} des GBR de « Génération 1 » des jigs JIG1, JIG2, JIG3 et JIG4. Et la **Figure 9** présente l'évolution de WA_{24h} des GBR de « Génération 2 ».

Le coefficient d'absorption d'eau (WA_{24h}) des GBR de « Génération 1 » varie de 3.1% à 8.3%. Et pour les GBR de « Génération 2 » WA_{24h} varie de 1.8% à 9.1%. Comme cela est montré pour les densités, un cycle supplémentaire de séparation au jig permet une meilleure séparation des GBR hétérogènes.

La limite inférieure de WA_{24h} (des GBR triés (1.8%) correspond approximativement à la capacité d'absorption d'eau des granulats naturels et la limite supérieure 9.1% à celle des granulats avec une quantité importante de pâte de ciment adhérente. Les valeurs supérieures de WA_{24h} sont comparables à celles de certains sables recyclés avec une capacité d'absorption d'eau variant entre 8% et 10 % (Le et al., 2016) (Zhao et al., 2015) (Carro-López et al., 2015).

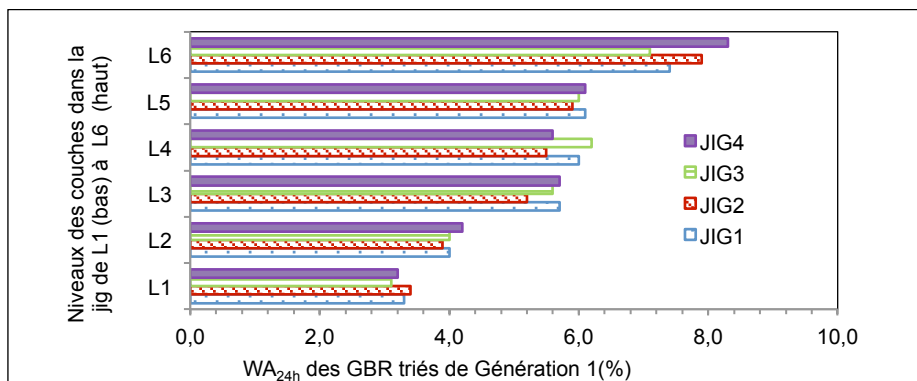


Figure 8. Variation de l'absorption d'eau de GBR triés de "Génération 1" en fonction de la hauteur de la couche dans le JIG

Les coefficients d'absorption d'eau (WA_{24h}) des GBR issus de la « Génération 2 » des couches L3, L4 et L5 des jigs JIG L3 et JIG L5 varient entre 6.2% et 6.8% avec une moyenne d'environ 6.5%. Ces GBR ont été rassemblés dans un autre jig pour former la « Génération 3 ». Les coefficients d'absorption d'eau (WA_{24h}) des GBR triés de « Génération 3 » varient de 4.5% à 8.2% avec une moyenne de WA pour toutes les couches d'environ 6.42%, voir la **Figure 10**.

Ainsi, après deux étapes de séparation par densité au jig à eau, les GBR triés présentent encore une grande hétérogénéité. Les résultats de WA_{24h} après les trois cycles de cette séparation au jig mettent en évidence l'existence d'une variabilité très importante dans un échantillon de 120 kg de GBR 6.3 / 10 mm.

On peut en conclure que le jig à eau permet une séparation efficace de ces granulats qui sont très hétérogènes et donc offre une réelle possibilité de les caractériser très précisément (même si en contrôle de routine il n'est pas envisageable).

Il est également noté que les essais de séparation par densité au jig à eau n'influencent pas (ou très légèrement) la moyenne pondérée des coefficients d'absorption d'eau WA_{24h} des GBR avant la procédure de séparation au jig ($WA_{24h}=5.35\%$) et après la deuxième génération des essais de jig ($WA_{24h}=5.26\%$, moyenne pondérée des résultats des WA_{24h}).

Il est vrai qu'un écart significatif est observé avant et après la première séparation au jig. En effet, le coefficient d'absorption d'eau WA_{24h} déterminé selon la norme NF EN1097-6 utilisant des échantillons représentatifs de GBR hétérogènes avant la séparation au jig est, sur la moyenne de 4 échantillons, de 4.88% de WA_{24h} . Cette différence peut s'expliquer par le haut niveau d'hétérogénéité de densité dans le matériau d'alimentation (GBR hétérogènes). La méthode d'échantillonnage standard, définie pour les granulats naturels, doit probablement être adaptée à cette particularité des GBR.

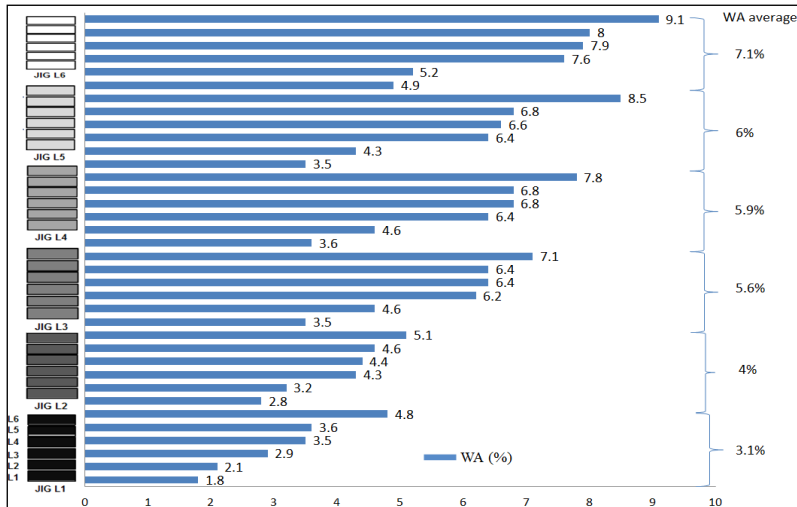


Figure 9. Variation de l'absorption d'eau de GBR triés de "Génération 2" en fonction de la hauteur de la couche dans le JIG

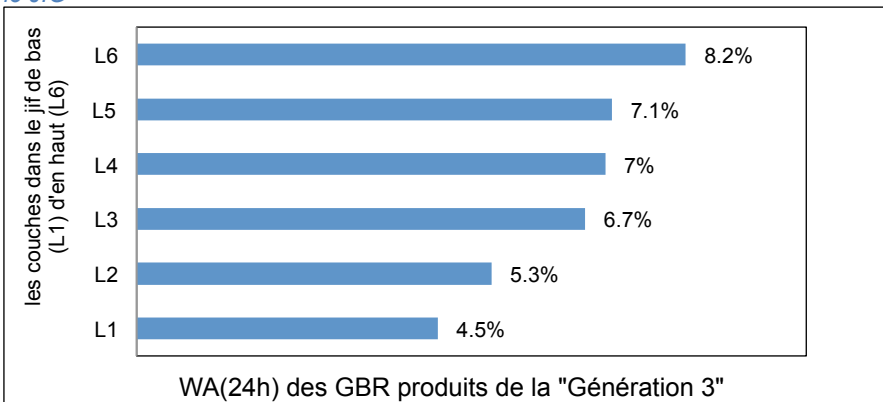


Figure 10. Variation de l'absorption d'eau de GBR triés de "Génération 3" en fonction de la hauteur de la couche dans le JIG

3.5. Porosité accessible et non accessible

La **Figure 11** présente les densités des GBR triés de « Génération 2 » déterminées par différents protocoles expérimentaux en fonction de leurs coefficients d'absorption d'eau WA_{24h} . Ces densités sont : la densité absolue déterminée dans l'Hélium (essai au pycnomètre à Helium), les densités absolue et réelle déterminées dans l'eau (essais réalisés selon la norme européenne NF EN 1097-6), et les densités squelette et enveloppe déterminées dans le porosimètre à Mercure (MIP).

Des variations linéaires sont observées entre les densités et WA_{24h} dans la **Figure 11**. Toutes les courbes se croisent approximativement pour $WA_{24h} = 0\%$ à une valeur moyenne d'environ 2.68 g/cm^3 . Cette valeur peut raisonnablement être considérée proche de la valeur des densités réelles des granulats naturels. En utilisant ces densités, des porosités accessibles et non accessibles peuvent être calculées pour les différents fluides (eau, mercure et hélium) utilisés lors des essais expérimentaux (NF EN 1097-6, MIP, Pycnomètre à Hélium). Par exemple, la différence dans les masses volumiques squelettiques déterminées dans l'eau et dans le mercure est due au fait que l'eau et le mercure ne remplissent pas le même volume de pores pendant l'essai (l'eau peut entrer dans des pores plus petits que le mercure). De plus les deux méthodes de détermination de la porosité avec l'eau et avec le mercure sont différentes, avec le mercure on applique une pression qui force le mercure à remplir d'avantage les pores et il se peut que ces pores se modifient au cours de l'essai.

La proportion de porosité non accessible dans l'eau par rapport à la porosité totale de l'échantillon est égale à 10.3%, alors qu'elle est de 26.4% dans le mercure.

De plus, La **Figure 12** montre la distribution volumique des coefficients d'absorption d'eau WA_{24h} et la distribution du volume cumulé pour le lot de 120 kg de GBR de 6.3/10mm. Les graphes sont établis selon

les résultats des WA_{24h} des GBR triés de « Génération 2 ». La variation de WA_{24h} du lot de GBR suit une distribution log-normale avec une moyenne de 5.2% et un écart-type standardisé de 1.6% tout en montrant une grande hétérogénéité dans un lot de 120kg d'une classe granulaire donnée 6.3/10mm de GBR industriels.

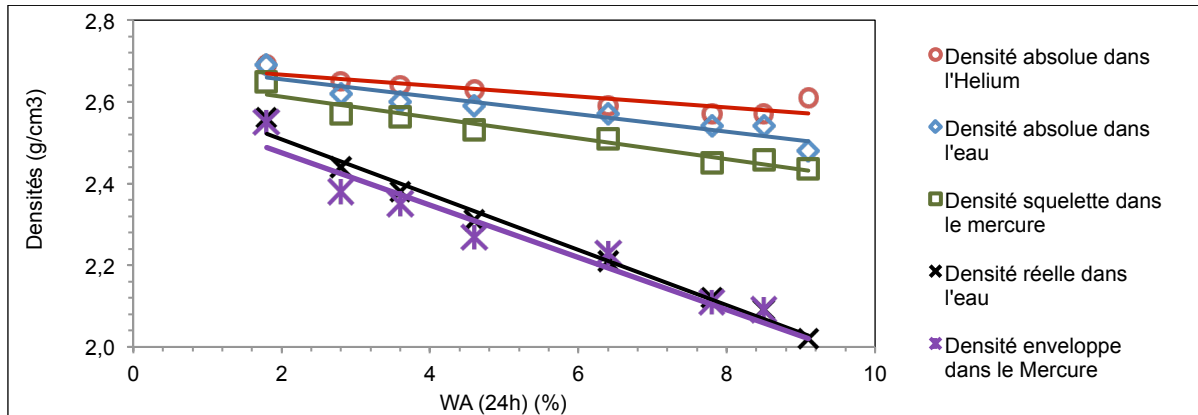


Figure 11. Différentes densités pour les GBR triés de "Génération 2" en fonction de leurs coefficients d'absorption d'eau WA_{24h}

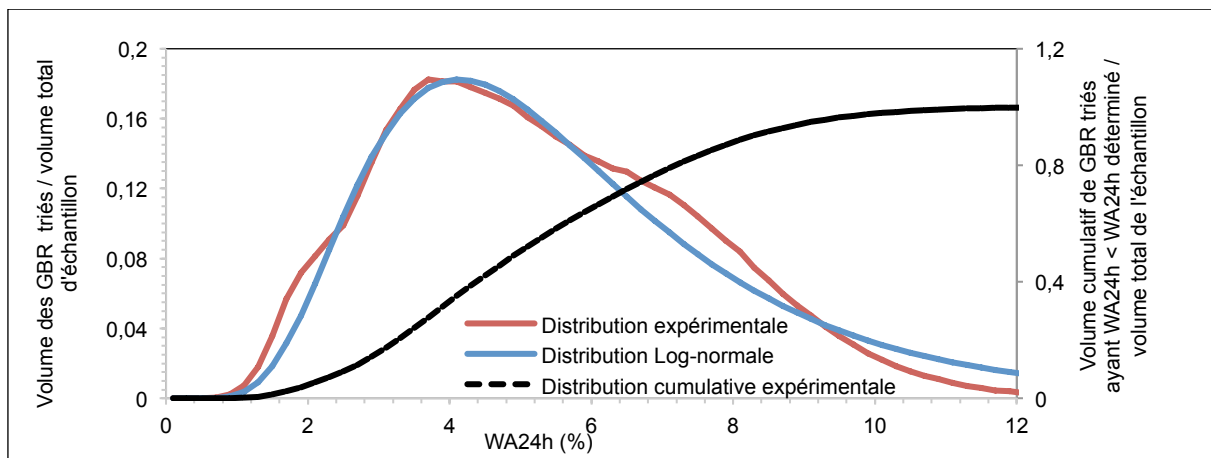


Figure 12. Distribution volumique (axe de gauche) et distribution en volume cumulé (axe de droite) de WA_{24h} pour un échantillon de 120 kg de GBR 6.3 / 10mm

4. CONCLUSION

Les résultats de cette étude mettent en évidence que les GBR industriels d'une classe granulaire donnée (ici 6.3/10mm) peuvent présenter de très grandes hétérogénéités en termes de densité et de coefficient d'absorption d'eau.

Il est généralement admis que les sables recyclés possèdent une plus grande quantité de pâte de ciment adhérente que les gravillons recyclés. Dans cette étude, il est prouvé que pour une classe granulaire donnée, de très grandes disparités (gravillons avec presque 100% de granulats naturels ou grains avec de grandes quantités de pâte de ciment adhérente) peuvent être présentes. La distribution des coefficients d'absorption d'eau (WA_{24h}) d'une classe granulaire donnée de GBR suit une distribution log-normale avec un écart-type élevé. Ces disparités sont en partie à l'origine de la dispersion des résultats des tests de caractérisation des GBR dans la littérature. Compte tenu des résultats présentés ici, il est suggéré que la méthode d'échantillonnage standard, définie pour les granulats naturels, doit être adaptée à la particularité des GBR.

Cette étude a également montré qu'un jig à eau est très efficace pour trier par densité une classe granulaire donnée de GBR. Des fractions beaucoup plus homogènes que le matériau initial (lot de GBR

industriels non triés) sont obtenues. Ces fractions et leurs proportions permettent une meilleure caractérisation des GBR en reconstituant l'échantillon global (utile pour la porosimétrie au mercure par exemple).

Le jig peut être un excellent outil pour séparer les matériaux dans le laboratoire et pour améliorer leur caractérisation, mais son utilisation à l'échelle industrielle engendrerait des surcoûts supplémentaires importants et est difficilement envisageable.

Compte tenu des résultats présentés dans ce papier il est suggéré que la méthode d'échantillonnage standard décrite dans les normes et définie pour les granulats naturels doit être adaptée à la particularité et la variabilité intrinsèque des granulats recyclés (Khoury et al., 2018).

5. RÉFÉRENCES

- Abbas A., Fathifazl G., Fournier B., Isgor O.B., Zavadil R., Razaqpur A.G., et Foo S. (2009), "Quantification of the Residual Mortar Content in Recycled Concrete Aggregates by Image Analysis", *Materials Characterization*, 60 (7):716–728.
- Angulo S. C., Carrijo P. M., Figueiredo a. D., Chaves a. P., et John V. M. (2010), "On the Classification of Mixed Construction and Demolition Waste Aggregate by Porosity and Its Impact on the Mechanical Performance of Concrete", *Materials and Structures*, 43:519–528.
- Belin P., Habert G., Thiery M., et Roussel N. (2013), "Cement Paste Content and Water Absorption of Recycled Concrete Coarse Aggregates", *Materials and Structures*, 47 (9):1451–1465.
- Cardoso R., Rui V. S., de Brito J., et Ravindra D. (2016), "Use of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Geotechnical Applications: A Literature Review", *Waste Management*, 49:131–145.
- Carro-López D., González-Fonteboa B., de Brito J., Martínez-Abella F., González-Taboada I., and Silva P. (2015), "Study of the Rheology of Self-Compacting Concrete with Fine Recycled Concrete Aggregates", *Construction and Building Materials*, 96:491–501.
- Cazacliu B., Hoffmann Sampaio C., Miltzarek G., Petter C., Le Guen L., Paranhos R., Huchet F., et Kirchheim A. P. (2014), "The Potential of Using Air Jigging to Sort Recycled Aggregates", *Journal of Cleaner Production*, 66:46–53.
- Coelho A., et De Brito J. (2013), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier.
- De Brito J., et Rui V. S. (2016), "Current Status on the Use of Recycled Aggregates in Concrete: Where Do We Go from Here?", *RILEM Technical Letters*, 1:1–5.
- De Juan Sánchez M., et Alaejos Gutiérrez 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.
- Duan Z. H., et Chi Sun P. (2014), "Properties of Recycled Aggregate Concrete Made with Recycled Aggregates with Different Amounts of Old Adhered Mortars", *Materials and Design*, 58:19–29.
- Gonzalez A., and Etxeberria M. (2014), "Experimental Analysis of Properties of High Performance Recycled Aggregate Concrete", *Construction and Building Materials*, 52:227–235.
- Joseph M., et Vandewalle L. (2015), "Water Absorption Variability of Recycled Concrete Aggregates", *Magazine of Concrete Research*, 67 (11):592–597.
- Khoury E., Cazacliu B., et Remond S. (2017), "Differences between Laboratory and in-Situ Conditions Leading to Bad Estimation of the Water Absorption Capacity of Recycled Concrete Aggregates Experimental Methods", *HISER, International Conference, Delft, Netherlands, June*:37–41.
- Khoury E., Cazacliu B., et 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.
- Khoury E., Ambrós W., Cazacliu B., Hoffmann C. et Remond S. (2018), "Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability", *Construction and Building Materials*, 175, 705–713.
- Le T., Rémond S., Le Saout G., et Garcia-Diaz E. (2016), "Fresh Behavior of Mortar Based on Recycled Sand – Influence of Moisture Condition", *Construction and Building Materials*, 106:35–42.
- Silva R.V., de Brito J., and 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.
- Webb P.a. (2001), "Volume and Density Determinations for Particle Technologists", *Society*, Feb:1–16.
- Zhao Z., Remond S., Damidot D., et Xu W. (2015), "Influence of Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortars", *Construction and Building Materials*, 81 (2):1163–1167.