

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

IMPACT DE LA PRÉSENCE DE GRANULATS ET DE SABLES RECYCLÉS SUR LE DÉVELOPPEMENT DES PROPRIÉTÉS DU BÉTON DEPUIS LA PRISE

DELSAUTE Brice, STAQUET Stéphanie

Université Libre de Bruxelles (ULB), BATir, Laboratory of Civil Engineering (LGC), Avenue F.D. Roosevelt
50 CP194/02, 1050 Bruxelles, Belgium.

Résumé : Les granulats constituent le squelette des bétons et sont, de ce fait, intensivement utilisés pour la fabrication de béton. Cependant, cette ressource est loin d'être inépuisable et est inégalement réparties à travers le monde. De plus, leur transport est énergivore et il peut être nécessaire de les remplacer par des ressources plus locales selon la situation géographique. Une solution à ce problème est l'utilisation de granulats recyclés au lieu de granulats naturels. Pour des applications structurelles, l'utilisation de ces matériaux «verts» nécessite une caractérisation complète de l'évolution des propriétés physico-chimiques et mécaniques qui sont assez différentes de celles des bétons standards. Les déformations endogènes et le coefficient de dilatation thermique (CDT) sont deux des propriétés les plus importantes responsables du changement de volume des matériaux à base de ciment. L'entrave des déformations endogènes et thermiques peut causer l'apparition de fissures dans des structures en béton durant les premiers jours après le coulage du béton (en particulier pour les structures massives). Pour déterminer ce risque de fissuration, il est aussi nécessaire de déterminer d'autres propriétés des bétons tels que le dégagement de chaleur, la résistance et le module d'élasticité. Cet article vise à identifier l'effet de la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur le développement des déformations libres et des propriétés mécaniques au jeune âge. A cet effet, une nouvelle approche expérimentale de caractérisation des matériaux cimentaires est utilisée. Cette nouvelle approche est basée sur l'application répétée de variation thermique et de chargement au moyen de dispositif de mesure récemment développé. La forte porosité des granulats recyclés induit une forte diminution des déformations endogènes, du module d'élasticité et de la résistance au très jeune âge du béton. Un calcul élastique de l'entrave des déformations libres montrent que l'usage de granulats recyclés diminue le risque de fissuration. Cette étude montre aussi que le CDT peut fortement augmenter (jusqu'à 50%) lorsque les granulats naturels sont remplacés par des granulats recyclés.

Mots-clés : jeune âge, granulats recyclés, déformation libre, module d'élasticité, déformation restreinte

1. INTRODUCTION

Les granulats constituent le squelette des bétons et sont, de ce fait, intensivement utilisés pour la fabrication de béton. Cependant, cette ressource est loin d'être inépuisable et est inégalement réparties à travers le monde. De plus, leur transport est énergivore et il peut donc être nécessaire de les remplacer par des ressources plus locales selon la situation géographique. Une solution à ce problème est l'utilisation de granulats recyclés au lieu de granulats naturels. Pour des applications structurelles, l'utilisation de ces matériaux «verts» nécessite une caractérisation complète de l'évolution des propriétés physico-chimiques et mécaniques qui sont assez différentes de celles des bétons standards. Les déformations endogènes et le coefficient de dilatation thermique (CDT) sont deux des propriétés les plus importantes responsables du changement de volume des matériaux à base de ciment. L'entrave des déformations endogènes et thermique peut causer l'apparition de fissures dans des structures en béton durant les premiers jours après le coulage du béton (en particulier pour les structures massives). Pour déterminer ce risque de fissuration, il est aussi nécessaire de déterminer d'autres propriétés des bétons tels que le dégagement de chaleur, la résistance et le module d'élasticité. Cet article vise à identifier l'effet de la substitution de gravier et sable naturel par des graviers et sable recyclés sur le développement des propriétés mécaniques de béton au jeune âge et à estimer l'impact de ces substitutions sur le risque de fissuration induit par l'entrave des déformations endogènes et thermiques.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Compositions des bétons

L'impact de la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés est étudié sur 4 compositions pour lesquelles les proportions sont présentées dans le Tableau 1. Chacune des compositions a été définie dans le cadre du Projet National français RECYBETON (Irex 2018). Le rapport eau effective – liant est de 0,65 et la fraction volumique de sable et de granulats est la même pour chaque composition. Un ciment Portland de type CEMII/A-L 42,5 N a été utilisé. La teneur en ciment, filler calcaire et superplastifiant est légèrement adaptée afin d'obtenir une même ouvrabilité pour chacune des compositions. Les compositions sont référencées 'X'SR'Y'GR où 'X' et 'Y' sont les pourcentages en volume de substitution de sable/gravier naturel par des sables recyclés (SR) ou graviers recyclés (GR) respectivement. La première composition, nommée 0SR0GR, est un béton de référence sans sable ou gravier recyclé. Pour la 2^{ème} et 3^{ème} composition, 30% et 100% des graviers naturels sont remplacés par des graviers recyclés. Pour la 4^{ème} composition, 30% de sable naturel est remplacé par du sable recyclé. Les sables et les graviers sont utilisés à l'état saturé-surface-sèche.

	0SR0GR	0SR30GR	0SR100GR	30SR0GR
Gravier naturel 6,3/20	820	462	-	829
Gravier recyclé 10/20	-	296	701	-
Gravier naturel 4/10	267	228	-	190
Gravier recyclé 4/10	-	-	163	-
Sable naturel 0/4	780	813	806	549
Sable recyclé 0/4	-	-	-	235
CEM II/A-L 42,5, C	270	276	282	276
Filler calcaire, F	45	31	31	31
Superplastifiant, SP	0.747	0.861	0.798	0.798

Tableau 1. Compositions en kg/m³ (Bendimerad et al. 2016)

Pour considérer le durcissement des bétons et les principaux effets de la température, les propriétés des bétons sont exprimés en temps équivalent. Le temps équivalent est basé sur la loi d'Arrhenius (Equation 1) et est fonction de l'âge du béton t , de l'évolution de la température du béton T (°C), d'une température de référence T_r (généralement 20°C), de la constante des gaz parfaits R (=8.314 J/mol/K) et de l'énergie d'activation apparente E_a (J/mol). L'énergie d'activation apparente a été définie sur base de résultats de calorimétrie isotherme présentés dans la référence (Kada-Benameur et al. 2000) et vaut 35,15 kJ/mol.

$$t_{eq}(t, T) = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{273 + T(s)} - \frac{1}{273 + T_r}\right)\right) \cdot ds$$

2.2 Méthodes

2.2.1 Suivi de la température en condition quasi-adiabatique

Le dispositif de calorimétrie quasi-adiabatique (QAB) permet de mesurer en continu l'évolution de la température du béton en condition quasi-adiabatique. Cette évolution est représentative des structures massives en béton. Le dispositif QAB a été développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussée (maintenant IFSTTAR) pour le suivi du dégagement de chaleur (Boulay et al. 2010). Durant l'essai, les températures au sein du béton et de l'air ambiant sont enregistrées chaque minute. Les mesures commencent environ 30 minutes après le premier contact entre l'eau et le ciment jusqu'à un âge de 180 heures. Les essais ont été réalisés sur des cylindres de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur avec une masse de $\pm 15,5$ kg.

2.2.2 Suivi du module d'élasticité

Le suivi des propriétés élastiques est réalisé sur des éprouvettes cylindres de 97 mm de diamètre et de 550 mm de hauteur. Afin de déterminer la maturité du béton et les potentiels irréversibilités induites par les chargements répétés, un deuxième échantillon, ayant la même géométrie, est produit pour le suivi simultané de la température et des déformations libres. Deux feuilles autocollantes en aluminium entourent les éprouvettes afin de les garder en condition scellée durant l'essai. Les essais sont réalisés avec une presse électromécanique d'une capacité de ± 100 kN. La mesure des déformations longitudinales est réalisée avec des extensomètres en Invar®. Chaque extensomètre est composé de deux couronnes espacées de 350 mm et de 3 barres placées à 120° sur lesquelles des capteurs de déplacement sont fixés. Trois ancrages à lame élastique sont placés sur chacune des couronnes pour assurer une bonne mesure des déplacements du béton lorsque des chargements répétés sont appliqués. L'entièreté du dispositif se trouve dans une salle climatisée contrôlée en température et en humidité. Une description complète du dispositif, du protocole d'essai et du traitement des données est indiquée dans les références (Boulay et al. 2014; Delsaute, Boulay, Granja, et al. 2016; Delsaute, Torrenti, et al. 2016).

2.2.3 Suivi des déformations endogènes et du coefficient de dilatation thermique

Le suivi des déformations libres est réalisé depuis la mise en place du béton avec le dispositif BTJADE. Le dispositif est composé d'un moule vertical ondulé en PVC disposé sur un bâti métallique. L'entièreté du dispositif est placée dans une cuve contrôlée en température. Durant l'essai, des cycles de température de $\pm 3^\circ\text{C}$ sont appliqués à l'échantillon afin de déterminer le coefficient de dilatation thermique. Une description complète du dispositif ainsi que de la méthodologie d'essai est donnée dans les références (Boulay 2012; Delsaute & Staquet 2017).

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Évolution de la température en condition quasi-adiabatique

L'évolution de la température du béton est présentée à la Figure 1. Après malaxage, une température de 20°C était visée. Cette température a été atteinte pour toutes les compositions à l'exception de la composition 30SR0GR pour laquelle une température de 22°C a été atteinte après malaxage. Pour chaque composition, la température de l'échantillon augmente significativement entre un âge de 5 et 11 heures. Le pic de température est atteint entre un âge de 23 et 26 heures et a une amplitude comprise entre 38 et 40 ° C. L'évolution de la température est très similaire pour chaque composition. Une légère différence est néanmoins observée sur l'amplitude du pic de température. L'effet de cure interne induit par la haute porosité du sable ou des granulats recyclés peut être responsable d'une hydratation

supplémentaire de la pâte de ciment résultant en une augmentation du dégagement de chaleur et du pic de température en condition quasi-adiabatique.

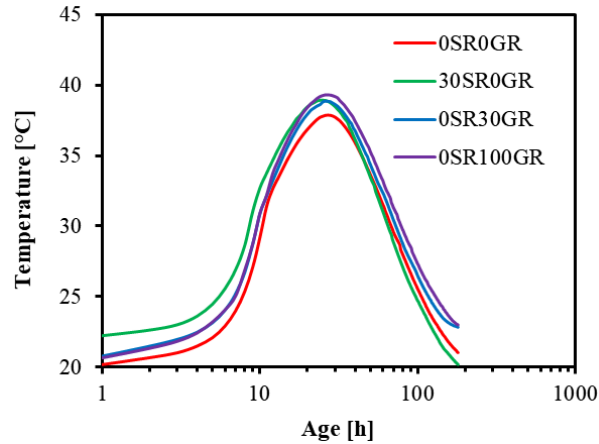


Figure 1. Evolution de la température à l'intérieur des éprouvettes placées en condition quasi-adiabatique.

3.2 Module d'élasticité

Les essais débutent 4 heures après la fin de prise du béton et ont été arrêtés après un âge d'une semaine. La température du béton est enregistrée depuis le coulage du béton. La température de la salle d'essai est maintenue à 20°C durant l'entièreté de l'essai. Chaque 30 minutes, un chargement est appliqué à l'éprouvette. La charge appliquée correspond à 20% de la résistance en compression au moment du chargement afin de ne pas provoquer d'endommagement ou des effets de fatigue à l'éprouvette. Le module d'élasticité E est calculé à partir de l'ensemble des enregistrements (charge et déplacement dans la section centrale) réalisés entre 30% et 80% du chargement (Delsaute, Boulay, Granja, et al. 2016; Delsaute, Boulay & Staquet 2016). Un exemple de courbe contrainte-déformation est indiqué à la Figure 2 pour plusieurs âges au chargement de la composition 0SR0GR.

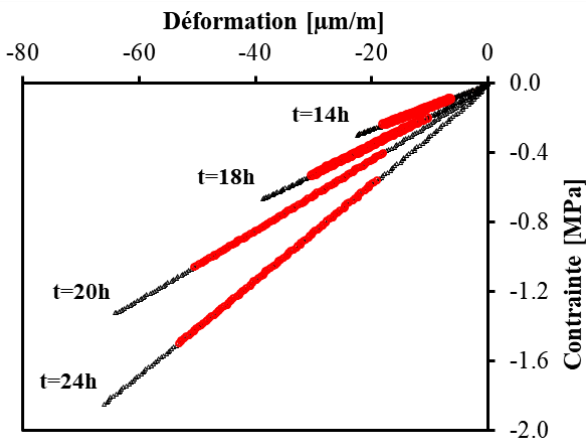


Figure 2. Courbes contrainte-déformation pour plusieurs âges au chargement de la composition 0SR0GR. Les marqueurs rouges représentent les données utilisées pour le calcul du module d'élasticité.

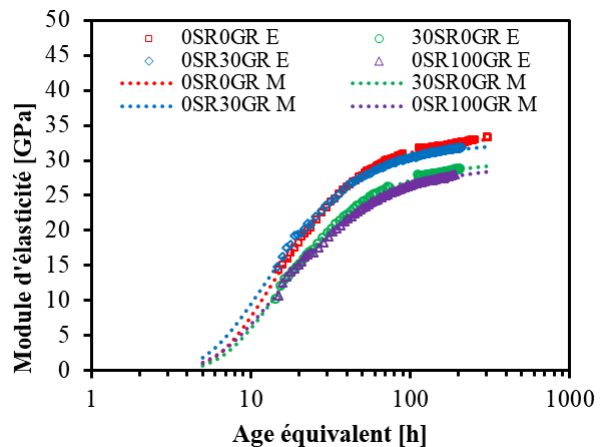


Figure 3. Evolution du module d'élasticité (E – données expérimentales et M – Modèle)

Les résultats de module d'élasticité sont donnés en fonction du temps équivalent sur la Figure 2. La substitution de 30% de graviers naturels par des graviers recyclés ne modifie pas significativement

l'évolution du module d'élasticité alors qu'un taux de substitution de 100% induit une diminution du module d'élasticité de 5 GPa à l'âge de 1 semaine. La substitution de 30% de sable naturel par du sable recyclé induit une diminution du module d'élasticité de 4 GPa à l'âge d'une semaine. Cette diminution du module d'élasticité peut être attribué à la plus faible rigidité des granulats recyclés en comparaison au granulats naturels comme expliqué dans (Königsberger & Staquet 2018). La modélisation du module d'élasticité est réalisée avec l'Equation 2 (Delsaute, Torrenti, et al. 2016). Les valeurs des coefficients de l'Equation 2 sont indiquées dans Tableau 2 pour chacune des compositions

$$E(t_{eq}) = E(t_{eq} = \infty) \cdot \exp\left(-\left(\frac{p_E}{t_{eq}}\right)^{r_E}\right) \quad 2$$

Composition	$E(t_{eq} = \infty)$ [GPa]	p_E [h]	r_E [/]
0SR0GR	33.6	13.6	1.28
30SR0GR	29.9	14.7	1.22
0SR30GR	32.6	11.9	1.21
0SR100GR	29.3	14.4	1.11

Tableau 2. Coefficient de l'Equation 2

3.3 Déformation endogène et coefficient de dilatation thermique (CDT)

Les déformations endogènes sont mises à zéro à la fin de prise des bétons. Les mesures des déformations endogènes sont présentées sur la Figure 3. Entre la fin de prise (entre 10 et 12 heures) et un âge de 24h00, un retrait d'une amplitude de $\pm 13 \mu\text{m/m}$ est observé pour chacune des compositions et est associé au phénomène d'auto-dessiccation du liant. Ensuite une divergence est remarquée entre les compositions. Les fortes porosités du gravier et du sable recyclés sont à l'origine de ces différences entre les quatre compositions. Lorsque le phénomène d'auto-dessiccation prend place, l'humidité relative diminue à l'intérieur de la pâte de ciment. Dans un tel cas, le granulats recyclés joue le rôle de réservoir d'eau qui reemplis les pores capillaires durant le processus de durcissement. Ceci évite ou réduit le mécanisme d'auto-dessiccation avec le transfert continue de l'eau des granulats recyclés vers la pâte de ciment. Les résultats du CDT sont donnés à la Figure 4. Pendant la prise et pour chaque composition, une diminution importante et quasi instantanée du CDT a lieu pendant un même intervalle de temps (entre un âge équivalent de 6 et 8 heures). Ensuite une faible diminution ou augmentation du CDT est observée jusqu'à un âge équivalent de 24 heures. Après, le CDT n'évolue plus de manière significative. Pour la composition 0SR100GR, la valeur du CDT est globalement plus élevée et augmente de manière limitée après plusieurs jours. Ceci s'explique par la forte porosité et par la nature différente des graviers recyclés. La présence de sable ou gravier recyclé réduit la diminution de l'humidité relative du béton et réduit ainsi l'augmentation du CDT après la prise (Sellevold & Bjøntegaard 2006). Il est à noter que ce phénomène est plus visible lors de la substitution de graviers naturels par des graviers recyclés que lors de la substitution de sable naturel par du sable recyclé.

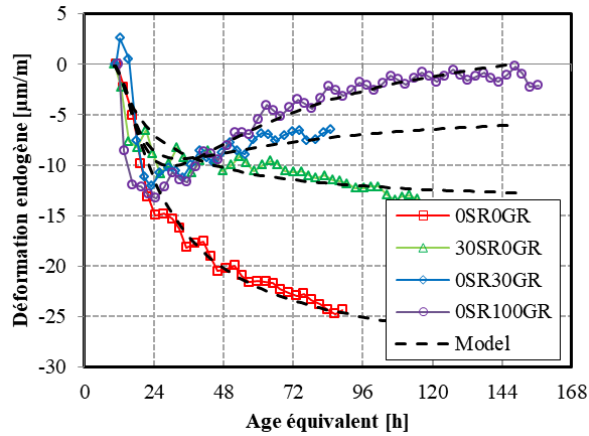


Figure 4. Evolution des déformations endogènes

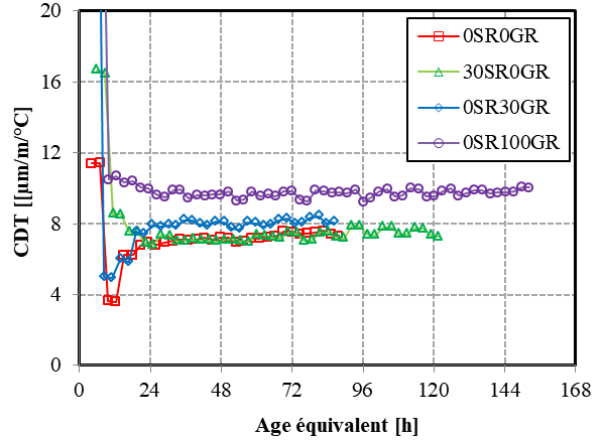


Figure 5. Evolution du coefficient de dilatation thermique

4. ÉVALUATION DES CONTRAINTES LORS DE L'ENTRAVE DES DÉFORMATIONS

Afin d'évaluer l'influence de gravier recyclé et de sable recyclé sur le risque de fissuration de structure en béton, un calcul élastique a été réalisé pour déterminer l'évolution des contraintes lorsque les déformations libres des bétons sont totalement entravées. Pour ce faire, l'Equation 3 a été utilisée où ε_r est la déformation restreinte

$$\sigma = - \sum_{t'=t_0}^t \Delta \varepsilon_r \cdot E(t')$$

3

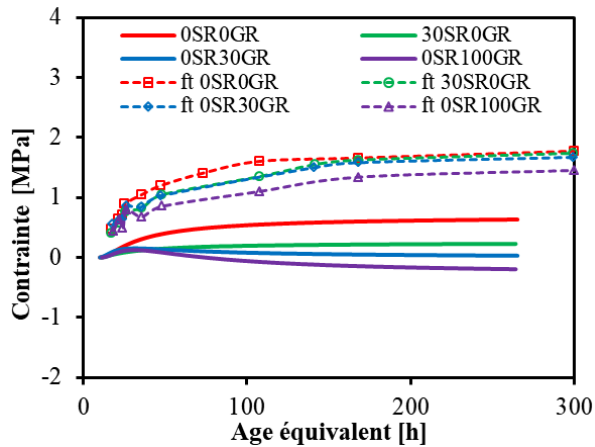


Figure 6. Evolution des contraintes lors de l'entrave des déformations endogènes et évolution de la résistance à la traction

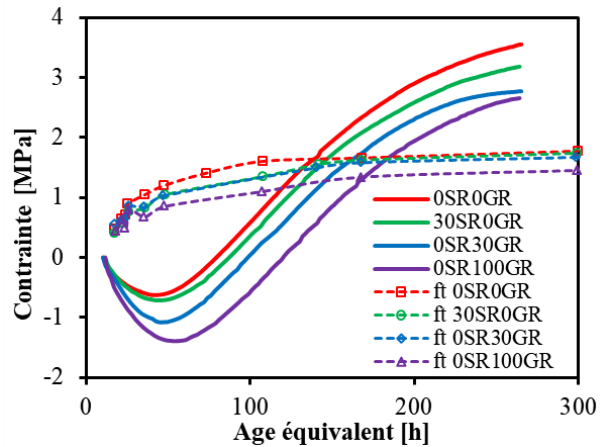


Figure 7. Evolution des contraintes lors de l'entrave des déformations endogènes et thermiques et évolution de la résistance à la traction

Deux scénarios ont été étudiés. Premièrement, seule l'entrave totale des déformations endogènes a été considérée (Figure 5). Dans ce scénario, la réduction de l'amplitude du module d'élasticité et des déformations endogènes induit par la présence de graviers/sables recyclés entraîne une diminution

significative des contraintes induites. A un âge équivalent de 260 heures, les contraintes élastiques calculées pour la composition sans granulats recyclés sont égales à 0,6 MPa tandis que des contraintes de compression de -0,2 MPa ont été calculées pour la composition 0SR100GR. Pour les compositions 30SR0GR et 0SR30GR, les contraintes élastiques sont de 0.2 et 0 MPa à un âge de 260 heures. Deuxièmement, les contraintes élastiques induites par l'entrave totale des déformations endogènes et thermiques a été calculée (Figure 6). Les déformations thermiques ont été déterminées sur base de l'évolution du CDT et de l'évolution de la température enregistrée dans le dispositif QAB. Comme dans le premier scénario, la substitution de graviers / sables naturels par des graviers / sables recyclés entraîne une diminution des contraintes induites par l'entrave des déformations. Durant les 48 premières heures après coulage (en temps équivalent), des contraintes de compression sont observées pour chacune des compositions et sont principalement générées par l'entrave des déformations thermiques. Comme les variations de température sont très similaires pour chacune des compositions, les différences de contraintes observées entre chacune des compositions proviennent principalement des différences dans l'évolution du module d'élasticité et du CDT. A un âge équivalent de 48 heures, les contraintes élastiques calculées pour la composition sans granulats recyclés sont égales à -0,62 MPa tandis que des contraintes de -0,7, -1.1 et -1.4 MPa ont été calculées pour les compositions 30SR0GR, 0SR30GR et 0SR100GR respectivement. Ensuite les contraintes évoluent dans le sens opposé et passent en traction. A un âge équivalent de 260 heures, les contraintes élastiques calculées pour la composition sans granulats recyclés sont égales à 3.8 MPa tandis que des contraintes de 3.2, 2.8 et 2.6 MPa ont été calculées pour les compositions 30SR0GR, 0SR30GR et 0SR100GR respectivement. Ces différentes évolutions sont expliquées par le module d'élasticité plus faible et l'augmentation plus faible du CDT des compositions avec des granulats recyclés. Finalement, les contraintes élastiques sont comparées à la résistance en traction des bétons. Pour chacune des compositions, la contrainte calculée dépasse la résistance en traction. Cependant l'âge de fissuration est différent. Pour la composition sans granulats recyclés, un âge de fissuration de 140 heures est calculé tandis des âges de fissuration de 143, 158 et 170 heures ont été calculés pour les compositions 30SR0GR, 0SR30GR et 0SR100GR respectivement. Il est donc observé que la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés retarde l'âge de fissuration des matériaux et plus globalement réduit le risque de fissuration. De plus, il est à noter que le phénomène de fluage et de relaxation n'a pas été considéré pour le calcul des contraintes. La considération de ces phénomènes aurait globalement réduit l'amplitude des contraintes.

5. CONCLUSION

Une nouvelle méthodologie expérimentale basée sur des méthodes d'essai de type répété est présentée pour la caractérisation du comportement des bétons dès le très jeune âge composés de granulats recyclés en condition scellée. La présence de granulats ou sable recyclés induit une forte réduction des déformations endogènes, du module d'élasticité et de la résistance durant le durcissement des bétons. Un calcul élastique de l'entrave des déformations libres montre que l'utilisation de gravier et de sable recyclés diminue le risque de fissuration de structure en béton (et plus particulièrement avec des graviers recyclés) ce qui souligne l'intérêt de l'utilisation des granulats recyclés pour les bétons de masse. En complément à cette étude, l'effet de cure, induit par la forte porosité des granulats recyclés, devrait être étudié sur des bétons avec un rapport eau-liant plus faible (compositions pour lesquelles le phénomène d'auto-dessiccation est très important).

Remerciements

Des remerciements sont adressés à Ahmed Zakarya Bendimerad, de l'Ecole Centrale de Nantes, Département GeM, pour son aide sur les essais de suivi des déformations libres lors de son séjour scientifique au laboratoire BATir à l'ULB.

RÉFÉRENCES

- Bendimerad, A.Z., Rozière, E. & Loukili, A., 2016. Plastic shrinkage and cracking risk of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, 121, pp.733–745. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816309850>.
- Boulay, C. et al., 2014. How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the

earliest age? *Materials and Structures*, 47(1–2), pp.141–155. Available at: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0051-3> [Accessed December 17, 2013].

Boulay, C. et al., 2010. Quasi-adiabatic calorimetry for concretes: Influential factors. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (december), pp.19–36. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00562100%5Cn>.

Boulay, C., 2012. Test rig for early age measurements of the autogenous shrinkage of a concrete. In *Proceedings of the RILEM-JCJ International Workshop ConCrack 3*. pp. 111–122.

Delsaute, B., Boulay, C., Granja, J., et al., 2016. Testing Concrete E-modulus at Very Early Ages Through Several Techniques: An Inter-laboratory Comparison. *Strain*, 52(2), pp.91–109. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/str.12172>.

Delsaute, B., Boulay, C. & Staquet, S., 2016. Creep testing of concrete since setting time by means of permanent and repeated minute-long loadings. *Cement and Concrete Composites*, 73, pp.75–88. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516303584>.

Delsaute, B. & Staquet, S., 2017. Decoupling Thermal and Autogenous Strain of Concretes with different water/cement ratios during the hardening process. *Advances in civil engineering materials*, 6(2), p.22.

Delsaute, B., Torrenti, J.-M. & Staquet, S., 2016. Monitoring and modeling of the early age properties of the Vercors Concrete. In *TINCE 2016*. Paris, p. 12.

Irex, 2018. RECYBETON. , p.1. Available at: <https://www.pnrecybeton.fr/> [Accessed September 20, 2018].

Kada-Benameur, H., Wirquin, E. & Duthoit, B., 2000. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Research*, 30(2), pp.301–305. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884699002501>.

Königsberger, M. & Staquet, S., 2018. Micromechanical Multiscale Modeling of ITZ-Driven Failure of Recycled Concrete: Effects of Composition and Maturity on the Material Strength. *Applied Sciences*, 8(6), p.976. Available at: <http://www.mdpi.com/2076-3417/8/6/976>.

Sellevoid, E.J. & Bjøntegaard, Ø, 2006. Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction. *Materials and Structures*, 39, pp.809–815.