

Utilisation de granulats recyclés et d'agents expansifs pour la production de matériaux cimentaires écoresponsables et durables

Luc Courard¹, Benoit Bissonnette²

¹ Université de Liège, Urban and Environmental Engineering, GeMME Building Materials, Allée de la découverte, 9 – 4000 Liège, Belgium

² Université Laval, Département de génie civil et de génie des eaux, 1065, avenue de la Médecine, Québec (Québec), Canada G1V 0A6

RESUME La disponibilité des ressources pour le secteur de la construction devient de plus en plus incertaine, tandis que la quantité de déchets de construction et de démolition augmente. Réconcilier les besoins et les ressources secondaires, tout en contribuant à la réutilisation, comporte d'importants défis scientifiques et techniques. Les obstacles juridiques et réglementaires doivent être surmontés pour permettre une véritable économie circulaire dans le secteur de la construction. Il devient par ailleurs de plus en plus difficile de garantir la disponibilité de sable de bonne qualité pour la production de béton. Le sable de béton recyclé, lorsqu'il est adéquatement produit, peut constituer une alternative valable aux mortiers et bétons de faible et moyenne résistance. Les propriétés techniques des sables recyclés sont analysées et des propositions sont formulées pour augmenter leur taux d'incorporation dans les mortiers. Le processus de carbonatation accélérée semble améliorer les propriétés des sables recyclés (avant et/ou après fabrication du béton). Les agents expansifs peuvent contribuer à minimiser les effets nuisibles du retrait, potentiellement exacerbé dans les mélanges contenant des sables recyclés. À long terme, une utilisation plus large et plus systématique des matériaux recyclés nécessite des réglementations et des spécifications adaptées.

Mots-clefs Absorption, granulats recyclés, mortier, particules fines, retrait.

Modalité de présentation Présentation orale.

I. INTRODUCTION

L'extraction, l'approvisionnement, l'utilisation et la gestion du sable et des granulats restent largement non réglementés dans de nombreuses régions du monde, ce qui entraîne de nombreuses

conséquences environnementales et sociales largement négligées [1,2]. En 2019, la 4^e Assemblée des Nations Unies pour l'environnement (UNEA-4) a adopté la résolution 4/19 de l'UNEA sur la gouvernance des ressources minérales, qui incluait spécifiquement le sable comme sujet de préoccupation. Lors de l'UNEA-5 en 2022, les États membres ont demandé davantage d'informations sur les pratiques durables liées, entre autres, au sable en tant que minéral, comme le reconnaît la résolution 5/12 de l'UNEA sur la gestion des minéraux et des métaux [3]. Les granulats et le sable sont des matériaux très demandés à l'échelle mondiale pour la construction, avec un taux de croissance annuel d'environ 5 %, alors que la disponibilité du sable diminue. La Figure 1 montre la nette augmentation de la demande de sable au cours des années précédentes et à venir. Les États-Unis et la Chine affichent globalement la plus forte demande annuelle de sable.

FIGURE 1. Demande mondiale de sable

(<https://iveybusinessreview.ca/6580/lafargeholcim-the-plastic-solution-to-the-global-sand-wars/graphic-2-world-sand-demand/>)

La consommation mondiale de granulats de construction devrait atteindre 62,9 milliards de tonnes d'ici fin 2024, contre 43,3 milliards de tonnes en 2016 [4]. En Europe, la demande de granulats combinée de l'UE27+RU+AELE a atteint 2,7 milliards de tonnes par an en 2015, générant un chiffre d'affaires annuel estimé à 15 milliards d'euros. Cette demande européenne (UE27+RU+AELE) représente environ 10 % de la demande mondiale annuelle de granulats, soit 6 tonnes par habitant [5].

La Figure 2 présente un résumé des tonnages de production nationale de 2019, classés par pays et par type de granulats. L'Allemagne s'est imposée comme le premier producteur, dépassant les 500 millions de tonnes, suivie par la Russie, la Turquie, la France, le Royaume-Uni et la Pologne. À l'inverse, des pays plus petits comme Malte, le Monténégro, l'Islande, le Luxembourg et Chypre ont affiché des niveaux de production inférieurs à 5 millions de tonnes. Les tonnages nationaux dépendent non seulement de la puissance économique, mais aussi de la disponibilité géologique et de l'accès aux gisements, du climat ambiant national, de la robustesse du terrain et des traditions de construction locales.

FIGURE 2. Production de granulats en Europe en 2019 [5]

La composition des types de granulats (Fig. 3) dans les pays de l'UE-27, du Royaume-Uni et de l'AELE en 2019 a révélé que la pierre concassée représentait 46,9 % de la production totale, tandis que le sable et le gravier en constituaient 39,7 %. La production de granulats à partir de matériaux recyclés et réutilisés a contribué à hauteur de 9,3 %, les granulats marins et manufacturés représentant les 4 % restants.

Le marché mondial du sable est constamment affecté par les déséquilibres entre les importations et les exportations à l'échelle mondiale. La Figure 4 présente les 10 premiers pays exportateurs de granulats fins entre 2010 et 2014.

Les initiatives de recyclage dans l'industrie européenne des granulats présentent des variations notables selon les pays. Cinq pays européens – la Belgique, le Royaume-Uni, les Pays-Bas, l'Allemagne et la France – sont les fers de lance de la production de granulats recyclés, contribuant à environ 90 % de tous les granulats recyclés (RA) au sein de l'UE. Cette production réduit considérablement la demande de granulats primaires, favorisant un développement plus durable [7].

Le Tableau 1 présente une évaluation du pourcentage de granulats recyclés par rapport à la production totale de granulats pour les pays considérés. La Figure 5 décrit les tendances de la production de 2006 à 2020 dans les pays de l'UE-27, du RU et de l'AELE. Après sept années de déclin, de 2007 à 2013, la production a repris et s'est stabilisée autour de 3 milliards de tonnes jusqu'à ce que la pandémie de Covid-19 affecte la production.

FIGURE 3. Pourcentages des types de granulats

FIGURE 4. Principaux pays exportateurs de sable au monde entre 2010 et 2014 [6]

TABLEAU 1. Estimation de la production de granulats recyclés (GR) en Europe [8]

FIGURE 5. Évolution de la production mondiale de granulats recyclés de l'UE, du Royaume-Uni et de l'AELE de 2006 à 2020 [5]

Le sable recyclé est cependant un matériau aux propriétés spécifiques qui le rendent difficile à utiliser pour la production de béton [9,10]. Dans des applications en impression 3D utilisant 100 % de sable recyclé [11], elles se sont révélées efficaces et aucune perte de performance significative n'a été observée. Cependant, une telle application, très spécifique, demeure encore peu répandue.

II. SABLES RECYCLÉS POUR LA PRODUCTION DE MORTIERS : PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Les propriétés physiques et chimiques du sable recyclé jouent un rôle clé dans son aptitude à la fabrication du béton. Contrairement aux sables naturels, généralement assez homogènes, les sables recyclés présentent des caractéristiques plus variables selon leur origine et les procédés de récupération. Cette variabilité des propriétés constitue l'un des principaux obstacles à une utilisation plus répandue des sables recyclés [12].

La masse volumique du sable recyclé est généralement inférieure à celle du sable naturel. Les granulats fins et grossiers recyclés ont des masses volumiques comprises respectivement dans les fourchettes 1 970 - 2 140 kg/m³ et 2 120 - 2 430 kg/m³ [13]. Cette masse volumique dépend de la composition du matériau présent dans le produit recyclé : un sable recyclé mixte est susceptible d'avoir une masse volumique plus faible en raison de la forte teneur en particules de céramique ou de briques d'argile. De plus, la porosité accrue des sables recyclés entraîne une absorption d'eau significativement plus élevée, avec des valeurs généralement comprises entre 3 et 10 %, selon la qualité et l'origine du matériau [14]. La taille des particules de granulats recyclés est également très importante : plus la dimension des particules est petite, plus la porosité est élevée [15]. L'absorption d'eau du sable naturel est généralement comprise entre 0,2 et 2 %.

Dans le cas des granulats de béton recyclés, cette porosité est due à la présence de pâte de ciment et de mortier durcis. Il a également été observé que le coefficient d'absorption d'eau des granulats augmente avec la taille des particules grossières (Fig. 6). Cependant, il convient de noter que la détermination exacte du coefficient d'absorption est très complexe pour les sables recyclés. En effet, les normes actuelles pour la détermination de ce coefficient, telles que la norme NBN EN 1097-6, 2022, sont adaptées aux granulats naturels et ne tiennent pas compte des caractéristiques spécifiques des granulats recyclés.

FIGURE 6. Absorption d'eau des granulats recyclés produits avec le concasseur à mâchoires [15]

Les performances mécaniques des sables recyclés sont un aspect essentiel de leur intégration dans le secteur de la construction. Il a été observé que l'incorporation de granulats fins recyclés à des taux de substitution massique allant jusqu'à 20 % n'entraîne aucune modification significative des performances du béton [16].

Cependant, au-delà de ce seuil, une diminution significative de la résistance est souvent observée. À quantité d'eau et de ciment égale, un béton composé à 100 % de granulats recyclés présente des résistances mécaniques réduites de 10 à 20 % par rapport à un béton ordinaire [17]. Cette diminution est notamment liée à la forte porosité du sable recyclé. En termes de durabilité, les résultats des essais de carbonatation et d'absorption capillaire sur des bétons contenant des granulats fins recyclés jusqu'à une teneur de l'ordre de 30 % restent assez similaires à ceux des bétons de référence [18]. Ceci suggère que pour des taux de substitution modérés, les sables recyclés peuvent offrir des performances durables comparables à celles des sables naturels. Enfin, bien que leur utilisation soit limitée par des défis tels que l'hétérogénéité des matériaux et leur absorption d'eau difficile à quantifier, les sables recyclés présentent des propriétés intéressantes qui peuvent être exploitées pour encourager leur adoption généralisée.

Un projet de recherche récent a montré que le lavage pouvait améliorer la qualité des matériaux [19]. Quatre lots différents ont subi le même processus de tri et de concassage, mais pour évaluer l'effet du lavage et du lavage à la laveuse sur les propriétés du béton recyclé, des matériaux lavés et non lavés ont été considérés :

- granulats de béton recyclé non lavés (U-RCA);
- granulats de béton recyclé lavés (W-RCA);
- granulats mixtes recyclés non lavés (U-RMA);
- granulats mixtes recyclés lavés (W-RMA).

Les résultats d'essais d'absorption réalisés sur ces matériaux sont présentés à la Figure 7. On observe que l'absorption d'eau des granulats recyclés diminue significativement après lavage des particules. L'absorption d'eau des granulats de béton recyclé (RCA) diminue de 6,5 à 5 % après lavage, alors que celles des granulats mixtes recyclés (RMA) se trouve réduite de 7,9 à 7,2 %. La diminution de l'absorption d'eau des granulats RCA est attribuée à la fois à une diminution de la teneur en fines et de la teneur en pâte de ciment, tandis que celle des granulats RMA est uniquement due à l'élimination des particules fines. Cette interprétation résulte de la comparaison de l'absorption d'eau et de la densité des particules. L'absorption d'eau des granulats RMA diminue alors que leur densité reste constante (voire diminue légèrement), ce qui indique que la teneur en pâte de ciment ne varie pas significativement.

III. UTILISATION D'AGENTS COMPENSATEURS DE RETRAIT POUR MORTIERS

La perte d'humidité est inévitable dans les matériaux à base de ciment dès qu'ils sont exposés à une humidité relative inférieure à 100 %. Cette perte d'humidité entraîne un retrait de séchage et des variations de volume au sein du matériau. Outre le retrait dû au séchage, les réactions d'hydratation provoquent inévitablement un retrait chimique. Par conséquent, des efforts importants ont été

déployés pour contrer les phénomènes de retrait et leurs effets indésirables, soit les contraintes de retrait gêné et la fissuration qui peut en résulter.

FIGURE 7. Absorption d'eau des granulats étudiés après saturation sous vide [19]

Les ciments expansifs ont été introduits il y a plus d'un demi-siècle pour produire des bétons et mortiers dits à *retrait compensé*. Le retrait compensé est défini par l'ACI [20] comme « *une caractéristique des coulis, mortiers ou bétons fabriqués avec un ciment expansif et dont le volume augmente après la prise, induisant s'il sont adéquatement restreints des contraintes de compression destinées à compenser approximativement les contraintes de traction induites par le retrait de séchage* ».

Dans ces matériaux (systèmes ShC), un agent chimique ajouté au ciment réagit pendant le durcissement pour produire un composé expansif, ce qui entraîne une augmentation nette du volume du matériau. Le dosage de l'agent expansif doit être établi de manière à ce que l'expansion initiale compense le retrait ultérieur, comme illustré à la Figure 8. Des informations plus détaillées sur la séquence expansion-retrait, le développement des contraintes de traction et la prévention des fissures sont disponibles dans le guide ACI PRC-223 [21].

FIGURE 8. Évolution comparative de la variation de longueur dans le béton ordinaire et le béton ShC [21]

Si les ciments expansifs incorporant des sulfoaluminates de calcium (CSA) sont utilisés depuis longtemps (par exemple, le ciment ASTM C845 de type K [22]), l'industrie s'est orientée au cours des dernières années vers l'utilisation d'agents expansifs ajoutés aux autres constituants du béton lors du malaxage. Les principaux agents expansifs utilisés aujourd'hui pour produire des matériaux à retrait compensé sont à base de CSA (type K, type M), de chaux (CaO – type G) ou d'oxyde de magnésium (MgO₂). Outre les agents mentionnés ci-dessus, d'autres additifs tels que des agents libérant des gaz (azote, hydrogène et oxygène, par exemple) et des diols (alcools dihydriques) sont également parfois utilisés dans certains produits spéciaux (par exemple, les coulis de ragréage). Certains matériaux à double action contiennent même deux formes d'agents expansifs (par exemple, un agent produit un gaz pour contrer le retrait se produisant lorsque le matériau est encore à l'état plastique, et un autre entraîne la formation d'un composé qui produit une expansion à l'état durci).

Comme l'expansion et le retrait ne sont généralement pas synchrones, l'efficacité d'un système à retrait compensé dépend du bilan déformationnel survenant dans des conditions d'exposition données et du niveau de contrainte pendant le processus d'expansion pour produire une précontrainte de compression qui diminuera avec le retrait subséquent. Dans les nouvelles constructions, une quantité minimale d'armature est utilisée pour assurer cette précontrainte, comme recommandé dans le guide ACI PRC-223 [21]. Dans les réparations et les chapes, la restriction est essentiellement assurée par adhérence avec le substrat. Il a été démontré qu'une préparation de surface adéquate permet de générer efficacement la précontrainte chimique par adhérence à l'interface avec le béton d'origine [22].

Bilan déformationnel des systèmes ShC

Ces dernières années, le CRIB-Université Laval a consacré des efforts à l'évaluation et à l'amélioration de la robustesse des matériaux de réparation à retrait compensé préparés avec des

composants expansifs, notamment en ce qui concerne le bilan déformationnel. Diverses variables ont été étudiées, notamment le type d'agent expansif, le dosage, la composition et le type de liant, le rapport E/L et les conditions de cure.

Dans le cadre de différents programmes d'essais, le bilan déformationnel des bétons de réparation *ShC* a été évalué en conditions libres et restreintes, au moyen des procédures d'essai ASTM C157 [23] et ASTM C878 [24] modifiées. Les échantillons étaient généralement démoulés 6 à 8 heures après le contact eau-ciment et les mesures de déformation initiales étaient réalisées dès lors. Dans la séquence de conditionnement typique, les éprouvettes étaient ensuite mûries jusqu'à l'âge de sept jours dans de l'eau saturée de chaux à 23 °C pendant 7 jours, puis exposées au séchage à 23 °C et 50 % HR. Les graphiques des Figures 9 à 11 présentent les résultats des mesures de déformation linéiques, libre et restreinte, pour trois bétons à retrait compensé préparés avec différents types d'agents expansifs. Le mélange de béton de base avait un rapport E/L de 0,50 et était constitué de ciment Portland CSA type 10 (usage général) et de granulats de calcaire concassé de 14 mm.

FIGURE 9. Comparaison des mesures de déformation libre (ASTM C157 mod.) et restreinte (ASTM C878) d'un mélange de béton de réparation *ShC* préparé avec un agent de type K (dosage massique : 15 % du liant; E/L = 0,50; calcaire concassé de 14 mm) [25]

FIGURE 10. Comparaison des mesures de déformation libre (ASTM C157 mod.) et restreinte (ASTM C878) d'un mélange de béton de réparation *ShC* préparé avec un agent de type G (dosage massique liant : 10 % du liant; E/L = 0,50; calcaire concassé de 14 mm) [25]

FIGURE 11. Comparaison des mesures de déformation libre (ASTM C157 mod.) et restreinte (ASTM C878) d'un mélange de béton de réparation *ShC* préparé avec un agent à base de MgO_2 (dosage massique : 7 % du liant; E/L = 0,50; Calcaire concassé de 14 mm) [25]

On constate que les trois types d'agents expansifs comparés génèrent des cinétiques et des amplitudes d'expansion très différentes, tant en conditions de mouvement libre qu'en conditions restreintes. Avec le type G, la majeure partie de l'expansion sur 7 jours (90 %) se produit en 24 heures environ, tandis que dans le cas des mélanges incorporant les agents à base de CSA et de MgO_2 , elle se développe beaucoup plus progressivement et, dans les conditions d'essais considérées, ne semble être complètement épuisée à la fin de la période de durcissement de 7 jours. De plus, le retrait ultérieur enregistré à partir du moment où le matériau est exposé à 50 % H.R. varie considérablement selon l'agent utilisé. Sur une période de 21 jours à compter du début du séchage, la déformation due au retrait libre varie de 150 $\mu m/m$ dans le mélange *ShC* à base de MgO_2 à 450 $\mu m/m$ dans le mélange à base d'agent de type K. Les différences de comportement au fil du temps entre les trois mélanges de béton à retrait compensé comparés peuvent être appréciées dans le Tableau 2, où sont présentées les déformations libres et restreintes enregistrées à la fin de la cure humide, à 28 jours et à 500 jours. Les données confirment que la nature de l'agent expansif influence l'amplitude de l'expansion libre générée, en conditions de retrait libre comme en conditions de mouvement restreint. Ceci souligne la nécessité d'une caractérisation dimensionnelle plus cohérente et mieux définie, notamment dans les fiches techniques de matériaux *ShC* commerciaux. Les deux figures suivantes (Figs. 12-13) présentent les résultats de déformation libre et contrainte obtenus pour deux mélanges de béton à retrait compensé préparés avec des agents expansifs de

types K et G, respectivement, et soumis à des conditions de durcissement différentes. Les mélanges de base étaient similaires à ceux décrits précédemment, à l'exception du rapport E/L, égal à 0,40. Dans chaque cas, un jeu d'éprouvettes a été soumis à des conditions de durcissement similaires à celles des essais décrits précédents (éprouvettes mûries dans l'eau à 23 °C pendant 7 jours, puis exposées à 23 °C / 50 % H.R.) et l'autre a été exposé à l'air à 23 °C / 50 % H.R. immédiatement après le démoulage. L'influence considérable du durcissement à l'eau sur la réaction d'expansion est clairement démontrée pour les deux systèmes expansifs. Un apport d'eau soutenu pendant la période de durcissement se révèle plus critique pour le matériau *ShC* à base de K, car l'expansion nette générée à 50 % H.R. dépasse à peine 100 µm/m et représente moins de 10 % de l'expansion obtenue en conditions humides (Fig. 12). Dans les éprouvettes exposées à 50 % H.R., une faible expansion est enregistrée pendant les deux premiers jours, après quoi la déformation nette varie peu dans les jours suivants, reflétant la compétition entre les processus d'expansion et de retrait. Ce dernier devient prédominant après environ 5 jours, une fraction significative du potentiel d'expansion restant probablement inexploitée. Par conséquent, le bilan de déformation devient négatif avant la fin de la période de durcissement.

TABLEAU 2. Données comparatives de variation de volume d'un mélange de base de béton de réparation *ShC* (E/L = 0,50; calcaire concassé de 14 mm) préparé avec différents composants – éprouvettes soumises à une cure humide pendant 7 jours puis exposées à 50 % H.R. [25]

Dans le mélange à base de type G, bien que l'amplitude de l'expansion à 50 % H.R. soit trois fois inférieure à celle atteinte dans l'eau, l'expansion reste significative (Fig. 13). La cinétique de réaction beaucoup plus rapide de l'agent type G permet le développement d'une fraction plus importante de l'expansion totale au cours des premiers jours, malgré la compétition hydrique entre l'hydratation du ciment et le composant de type G. Ainsi, à 56 jours, le bilan déformationnel est toujours positif (+ 150 µm/m).

Ces résultats démontrent la forte influence de la cure humide et de sa durée sur l'efficacité des systèmes *ShC* impliquant une consommation d'eau dans la réaction chimique produisant des composés expansifs. La durée de durcissement affecte à la fois l'amplitude de l'expansion générée et le bilan déformationnel. Par conséquent, son incidence est accrue dans les systèmes à vitesse de réaction plus lente.

FIGURE 12. Influence de la cure sur les mesures de déformation libre (ASTM C157 mod.) d'un mélange de béton à retrait compensé préparé avec un composant de type K (dosage massique : 16 % du liant; E/L = 0,40; calcaire concassé de 14 mm) [26]

FIGURE 13. Influence de la cure sur les mesures de déformation libre (ASTM C157 mod.) d'un mélange de béton à retrait compensé préparé avec un composant de type G (dosage massique : 8 % du liant; E/L = 0,40; calcaire concassé de 14 mm) [26]

Durabilité des matériaux cimentaires à retrait compensé

Les bétons et mortiers à retrait compensé offrent des caractéristiques de durabilité importantes exploitables dans un large éventail d'applications, contribuant ainsi à en réduire l'empreinte écologique. Une durée de vie plus longue et une fréquence de réparation plus faible se traduisent par une réduction de la demande de matériaux et des travaux de construction énergivores. Cela

profite également à la société en réduisant les fermetures de voies, l'immobilisation des véhicules, le contrôle de la circulation et les déviations, ainsi que la fréquence des travaux de réparation, autant d'éléments qui entraînent une augmentation de la consommation de carburant et une perte de productivité.

Les exemples d'applications dans lesquelles les matériaux peuvent être avantageusement utilisés sont nombreux. Le béton à retrait compensé permet de prolonger la durée de vie des chaussées, des sols industriels, des dalles surélevées, des tabliers de pont et des pistes d'atterrissage, tout en réduisant significativement les besoins d'entretien. Les ouvrages hydrauliques, les stations d'épuration et les structures de confinement bénéficient tous de la minimisation des fissures, réduisant ainsi les fuites et les contaminations potentielles. La réduction du retrait restreint et des fissures ultérieures confère à ces structures une plus grande stabilité et une plus grande durabilité. Les dalles posées au sol, comme celles des grands bâtiments industriels, bénéficient grandement d'une maintenance réduite grâce à la réduction des joints de contraction et au gauchissement, généralement évité. La réduction des mouvements structurels atténue les charges latérales sur les murs et les poteaux. Les ponts et les stationnements présentent moins de fissures, ce qui réduit la pénétration de l'eau et des ions agressifs.

La fabrication de ciments sulfoalumineux de calcium utilise moins de calcaire pour la production du clinker et génère environ 30 à 50 % de CO₂ en moins par unité de matière première que le ciment Portland [27]. De plus, la calcination s'effectue à des températures nettement plus basses (1 160 à 1 200 °C contre 1 450 °C). Il en résulte un ciment dont l'empreinte carbone, la consommation d'énergie grise et la consommation de ressources naturelles sont inférieures à celles du ciment Portland [28-29].

Le béton à retrait compensé présentent ainsi divers avantages sur le plan environnemental et, à ce titre, peut contribuer à l'obtention de points ou de crédits dans le cadre de diverses initiatives de construction durable, telles que Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), la National Green Building Standard [30], les Green Globes de la Green Building Initiative [31] et d'autres initiatives de construction durable à travers le monde.

IV. CONCLUSIONS

L'utilisation de granulats fins recyclés (GFR) dans le béton contribue directement à l'économie circulaire. Les mesures visant à promouvoir l'utilisation de béton de granulats recyclés (BCR) s'inscrivent pleinement dans les objectifs stratégiques de l'Union européenne (UE). Des différences existent avec le sable naturel et doivent être prises en compte lors de la conception des mortiers et du béton :

- la qualité du sable recyclé dépend peu de la qualité du béton d'origine et de son mode de production;
- la densité du sable recyclé est généralement inférieure à celle du sable naturel;
- la porosité accrue des sables recyclés entraîne une absorption d'eau nettement supérieure, avec des valeurs généralement comprises entre 3 et 10 % : plus la granulométrie est basse, plus la porosité est élevée;

- la porosité et la demande en eau plus importantes entraînent un retrait plus important et une sensibilité accrue à la fissuration;
- pour accroître leur durabilité pour un large éventail d'applications, le concept de compensation du retrait peut être exploité dans le développement des mortiers à retrait auto-compensé;
- divers types d'agents expansifs peuvent être utilisés pour produire des mortiers à retrait auto-compensé présentant un bilan de variation de volume proche de zéro et une sensibilité minimale à la fissuration.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Wallonie Bruxelles International et le gouvernement du Québec pour leur soutien à la coopération scientifique entre l'Université de Liège et l'Université Laval dans le cadre du projet MORE² – Développement de mortiers à retrait auto-compensé avec des sables de REcyclage (2025-2027). Ils remercient également l'organisation MITACS pour son soutien aux échanges étudiants.

REFERENCES

1. Peduzzi, P. (2014). Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development* 11, 208-218. (<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.04.001>)
2. UNEP 2019. (<https://www.unep.org/resources/unep-annual-report-2019>)
3. UNEP 2022. (<https://www.unep.org/resources/unep-annual-report-2022>)
4. Wiedenhofer, D., Steinberger, J.K., Eisenmenger, N. and Haas, W. (2015), Maintenance and Expansion: Modeling Material Stocks and Flows for Residential Buildings and Transportation Networks in the EU25. *Journal of Industrial Ecology*, 19: 538-551. (<https://doi.org/10.1111/jiec.12216>)
5. UEPG, 2021. European Aggregates Association – Annual Review 2020-2021, Brussels, 30 p.
6. Gavriltea, M.D. (2017) Environmental Impacts of Sand Exploitation. Analysis of Sand Market. *Sustainability* 9(7), 1118. (<https://doi.org/10.3390/su9071118>)
7. Deloitte, 2015. Screening template for Construction and Demolition Waste management in France. Version 2, September 2015, 55 p.
8. UEPG 2025 (<https://www.aggregates-europe.eu/facts-figures/figures/>)
9. Colman, C., Bulteel, D., Rémond, S., Zhao, Z., Courard, L. (2020) Valorization of fine recycled aggregates contaminated with gypsum residues: characterization and evaluation of the risk for secondary ettringite formation. *Materials* (ed. MDPI) 13, 4866 (12 p.) (<http://dx.doi.org/10.3390/ma13214866>) (<http://hdl.handle.net/2268/252190>)

10. Courard, L., Rondeux, M., Zhao, Z., Michel, F. (2020) Use of recycled fine aggregates from C&DW for unbound road sub-base. *Materials* 2020 (ed. MDPI) 13(13) 2994, 26 p. (<http://dx.doi.org/10.3390/ma13132994>) (<http://hdl.handle.net/2268/249723>)
11. Courard, L., Grigoletto, S., Muy, Y., Michel, F., Hubert, J. New developments in the recycling of construction and demolition wastes for the concrete industry. 30. Slovenski Kolokvij o Betonih, Ljubljana (7 November 2023). (<https://hdl.handle.net/2268/308562>)
12. Tam, V.W.Y., Soomro, M., Evangelista, A.C.J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272-292, (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>)
13. Etxeberria, M., Gonzalez, A., Valero, I. (2012). Application of low grade recycled aggregates for non-structural concrete production in the city of Barcelona. Third international conference on sustainable construction materials and technologies, Kyoto, Japan.
14. Kosmatka, S.H., Panarese, W.C., Kerkhoff, B. (2002). Design and control of concrete mixtures. Portland Cement Association.
15. Hubert, J., Zhao, Z., Michel, F., Courard, L. (2023). Effects of crushing method on the properties of produced recycled concrete aggregates. *Buildings* 13(9), 2217. (<https://doi.org/10.3390/buildings13092217>)
16. Yaprak H., Aruntas, H.Y., Demir, I., Simsek, O., Durmus, G. (2011). Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *International Journal of the Physical Sciences* 6(10), 2455-2461. (<https://doi.org/10.5897/IJPS11.253>)
17. Silva, R.V., de Brito, J., Dhir, R. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and building materials* 65, 201-217. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>)
18. Hubert, J., Muy, Y., Courard, L. Use of recycled fine aggregates in high added value applications. International Conference on Advances in Engineering and Technology for Sustainable Development. Hanoi University of Civil Engineering, Hanoi, Vietnam, Nov 2-3, 2023 (<https://hdl.handle.net/2268/308792>)
19. Washing process for enhancing performances of coarse recycled aggregates. L. Courard, S. Delvoie, Z. Zhao, F. Michel, J. Hubert. *Journal of Materials in Civil Engineering* (under revision).
20. ACI CT-21 — Concrete terminology. American Concrete Institute, 80 p. (2022)
21. ACI PRC-223-21 — Shrinkage-compensating concrete – Guide. American Concrete Institute, 37 p. (2021)
22. Bissonnette, B., Essalik, S.J., Lamothe, C., Jolin, M., Courard, L., Gagné, R., Morin, R. (2018) Characterization tools for shrinkage-compensating repair materials. *Proceedings of ICCRRR 2018, MATEC*, 199, pp. 522-528.

23. ASTM C157/C157M-17 — Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. ASTM International, 7 p. (2017)
24. ASTM C878/C878M-14a — Standard test method for restrained expansion of shrinkage-compensating concrete. ASTM International, 5 p. (2016)
25. Bissonnette, B., Molez, L., Certain, P.-V.*; Lamothe, C.*; Jolin, M., Gagné, R. (2022). Volume change behavior of cement-based repair materials labelled as shrinkage-compensating, shrinkage-compensated or nonshrink. MATEC Web of Conferences Volume 364. ICCRRR 2022 - 6th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, Afrique du Sud (04015), Date de la conférence: 2022/10
26. Certain, P.-V., Bissonnette, B., Bastien, J., Marchand, J., Jolin, M. (2012) Robustness of shrinkage-compensating repair concretes. Proceedings of ACES Workshop on Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction, pp. 291-301 (2012)
27. Thomas, R.J., Maguire, M., Sorensen, A.D., Quezada, I. (2018) Calcium Sulfoaluminate Cement, Concrete International 40(4), pp. 65-69.
28. Bescher, E., Kim, J., Ramseyer, C., Vallens, J.K. (2018) Low carbon footprint pavement: history of use, performance and new opportunities for belitic calcium sulfoaluminate, Proceedings of the 13th International Symposium on Concrete Roads, June.
29. Hanein, T., Galvez-Martos, J.L., Bannerman, M.N. (2018) Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production, Journal of Cleaner Production 172, pp. 2278-2287.
30. LEED v4 for Building design and construction. (2019) U.S. Green Building Council.
31. Green Globes, 2020, Standard criteria and indicators. (<https://greenglobe.com/standard/>)