

Quatorzième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Sherbrooke, Québec, Canada
22-23 août 2013

FIXATION DU CO₂ DANS LES BLOCS DE BETON À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS

Véronique PARMENTIER, Frédéric MICHEL et Luc COURARD
GeMMe Matériaux de construction, Département ArgEnCo, Université de Liège, Belgique

RÉSUMÉ : A l'heure où l'industrie cimentière est majoritairement responsable de la production de CO₂ dans le secteur de la construction, il s'avère utile de compenser cette production par un phénomène inverse: la captation du CO₂. Ce processus d'absorption de CO₂, appelé carbonatation, améliore certaines propriétés du béton lors de la conversion du dioxyde de carbone CO₂ en carbonate de calcium CaCO₃. Les préoccupations environnementales actuelles motivent l'étude de la carbonatation dans le but de maximiser l'absorption du dioxyde de carbone.
Les granulats recyclés, produits à base de déchets de béton concassés mécaniquement, peuvent prendre place dans de nouvelles applications en béton. Ils peuvent remplacer les granulats naturels en tout ou en partie, épargnant ainsi l'extraction des matières premières naturelles.
La combinaison des deux approches vise à élaborer un produit dont l'impact environnemental est réduit au minimum.

1. INTRODUCTION

Le secteur de la construction est l'un des secteurs les plus importants et les plus actifs dans toute l'Europe. Sur le plan environnemental, il représente 30% des émissions de dioxyde de carbone (2009). Dans l'industrie de la construction en général, le choix des matériaux et la gestion des déchets sont des domaines demandant une réflexion à part entière, tant en amont (exploitation, transformation des ressources, chimie des matériaux) qu'en aval (recyclage, gestion des déchets). Ceci est d'autant plus vrai que les nouveaux modes de conception dans l'industrie de la construction (bâtiments passifs ou à énergie positive) nécessitent l'emploi de matériaux dont l'impact énergétique doit être minimisé (Courard *et al.*, 2001).

Les produits en béton sont des matériaux de construction durable. Leurs compositions sont à base de matières premières naturelles, abondantes et disponibles localement, en Belgique. Le bloc de béton

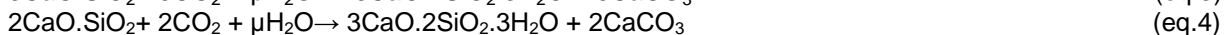
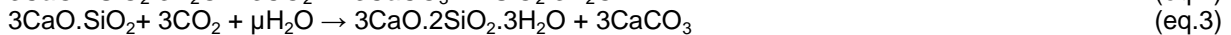
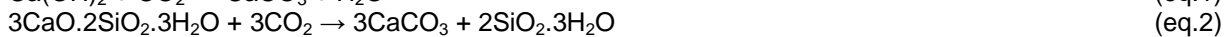
possède une faible teneur en ciment et l'absence d'utilisation d'énergie durant la phase de durcissement, ne nécessitant aucune cuisson, limite très fortement ses émissions de CO₂.

A l'heure où l'industrie cimentière est majoritairement responsable de la production de CO₂ dans le secteur de la construction, il s'avère utile de compenser cette production par un phénomène inverse : la captation du CO₂. Ce processus d'absorption de CO₂, appelé carbonatation, améliore certaines propriétés du béton lors de la conversion du dioxyde de carbone CO₂ en carbonate de calcium CaCO₃. Les préoccupations environnementales actuelles motivent l'étude de la carbonatation dans le but de maximiser l'absorption du dioxyde de carbone.

Les granulats recyclés, produits à base de déchets de béton concassés mécaniquement, peuvent prendre place dans de nouvelles applications en béton (Courard *et al.*, 2010). Ils peuvent remplacer les granulats naturels en tout ou en partie, épargnant ainsi l'extraction des matières premières naturelles (Debiec *et al.*, 2009).

2. PRINCIPES DE L'UTILISATION DU CO₂ DANS LES LIANTS À BASE HYDRAULIQUE

La carbonatation est une réaction chimique entre la pâte de ciment durcie et le dioxyde de carbone [Courard, 2009]. Cette réaction peut se produire dans un béton mature entre les produits hydratés (CSH ou Ca(OH)₂) et le CO₂ (éqs. (1) et (2)). La carbonatation peut également avoir lieu, en présence d'humidité, entre les constituants hydrauliques du clinker (C₂S et C₃S) et le CO₂ (éqs. (3) et (4)). La carbonatation d'un béton mature a pour effet de diminuer le pH de la solution interstitielle du béton ce qui, à terme, peut favoriser la corrosion des armatures en acier ; plusieurs recherches ont été menées afin de ralentir ce mécanisme et de protéger les armatures [Shao *et al.*, 2006]. Au contraire, la proposition qui est faite ici vise à provoquer une carbonatation précoce de la pâte en infusant du CO₂ immédiatement après démoulage. Les produits de la réaction sont un mélange hybride d'hydrates et de carbonates (éqs. (3) et (4)). Dans le cas d'application sans renforcement par barres d'armature en acier – par exemple les blocs de construction en béton -, les produits carbonatés présenteront des performances améliorées en termes de résistance mécanique, de durabilité et de stabilité dimensionnelle, grâce à la disparition aussi complète que possible de Ca(OH)₂.



Le processus de carbonatation a été étudié dans le but d'améliorer la stabilité dimensionnelle des blocs de construction en béton. En effet, la pâte de ciment durcie réagit avec le CO₂ atmosphérique, ce qui peut conduire à des problèmes de retrait. Aux U.S.A., la NCMA (*National Concrete Masonry Association*) et le PCA (*Portland Cement Association*) ont mené une recherche en ce sens en 1963 : les blocs de béton étaient d'abord soumis à de l'air humide entre 80 et 100°C pendant 5 à 18h. Ensuite, après 24h ou 4 mois, ils étaient soumis à une atmosphère riche en CO₂ [Toennies *et al.*, 1963]. Cela a permis de réduire le retrait de l'ordre de 30%. Mais la consommation d'énergie d'un tel process est énorme.

Durant les années septante, les mécanismes de carbonatation ont été étudiés en relation avec la réactivité et la résistance de silicates de calcium activés par le CO₂ [Young *et al.*, 1974]. Cette technique a été introduite pour la fabrication de panneaux à base de fibro-ciment, dans le but de réduire le temps de fabrication ; la première usine fonctionnant sur ce principe a été construite en Hongrie en 1985, mais a été fermée pour des questions de coût du CO₂.

Une étude de faisabilité de séquestration du CO₂ au travers d'une technique de cure accélérée a été menée à l'Université McGill (Montréal, Canada) entre 2004 et 2006 [Shao *et al.*, 2006]. Elle a consisté à étudier la possibilité de fixer le CO₂ dans des matrices cimentaires et de vérifier les performances à court et à long terme de ces produits. Elle a montré les opportunités offertes par cette technique, sur base de la maîtrise parfaite du processus de carbonatation accélérée.

Actuellement, les blocs de béton sont réalisés sur base d'une cure humide (vapeur d'eau). On estime que, pour 1 m³ de béton sous forme de blocs, la cure humide à pression atmosphérique consomme une énergie de 0.59GJ tandis que la cure en autoclave en consomme 0.71GJ [Shao *et al.*, 2006]. Si un processus d'injection de CO₂ est mis en place, pour le même volume de béton, l'énergie nécessaire la

récupération et à la compression du CO₂ est estimée à 0.02-0.10GJ/m³, pour une valeur minimale de fixation du CO₂ par le ciment de respectivement 10 et 50%. Il apparaît donc que l'énergie totale, hors transport du CO₂, nécessaire au processus de carbonatation, est significativement inférieure à celle nécessaire à une cure humide traditionnelle.

Les blocs de construction en béton se prêtent particulièrement bien au processus de carbonatation, à cause de leur production de masse, de leur grande porosité et de la nécessité de pratiquer une cure humide. La réaction entre la pâte de ciment au jeune âge et le dioxyde de carbone constitue donc bien une forme de séquestration du CO₂. Si on considère un bloc creux de 39x19x19cm et 18kg, qui contient environ 10% en masse de ciment, on peut considérer qu'il est capable de fixer au moins 0.18kg de CO₂ [Shao *et al.*, 2006]. Si le ciment est remplacé par du laitier, le taux de captation restera sensiblement le même [Monkman *et al.*, 2006]. Bien plus, si les granulats (86% en masse) sont aussi utilisés pour fixer le CO₂, la quantité fixée augmente considérablement. Des scories d'aciérie carbonatées pourraient en fixer encore 6% en masse. Par conséquent, si on considère que chaque granulats est capable de fixer environ 5% de sa masse en CO₂, on arrive à une séquestration de 0.77kg, par les granulats et pour un bloc. Un bloc de construction en béton serait donc potentiellement capable de fixer 0.95kg de CO₂ : sachant que la production de blocs de béton en Belgique par année est de 3.360.000 tonnes (*source www.febe.be*), on estime que la quantité de CO₂ fixé pourrait être de 16.800 tonnes, si seulement 5% du marché belge est concerné, dans un premier temps, par la fabrication de blocs de béton carbonaté en phase humide. D'autre part, considérant qu'un m² de mur, constitué de blocs de 39x19x19cm, en consomme 12,5, on peut estimer que chaque m² de mur séquestre 2,25kg de CO₂. A titre de comparaison, au Canada et aux USA, on évalue la séquestration potentielle annuelle à 3,2 millions de tonnes [Shao *et al.*, 2006]. Ce concept pourra conduire à terme et sur base du choix judicieux de matériaux recyclés pour la partie « granulats, à une situation « zero-émission ». Bien plus, la carbonatation accélérée des blocs devrait conduire à de meilleures performances mécaniques, une porosité plus faible et un risque d'efflorescences réduit : la microstructure du béton se densifie, ce qui améliore la durabilité du produit et, par conséquent, sa durée de vie. Enfin, le procédé industriel développé ne change en rien les possibilités de recyclage en fin de vie, notamment dans la fabrication de nouveaux blocs.

2. MATERIAUX ET ESSAIS

Les granulats recyclés sont des granulats obtenus par concassage d'un ancien béton. Ils sont utilisés pour la fabrication des blocs de béton. Trois types de tests sont envisagés:

- carbonatation de **granulats recyclés**,
- carbonatation du **bloc de béton** composé de **granulats naturels**,
- carbonatation du **bloc de béton** composé de **granulats recyclés** (soumis préalablement au flux CO₂ – et donc carbonatés – ou non).

Le but est d'observer les effets de cette cure de carbonatation forcée sur le comportement des blocs en compression à très court terme, correspondant aux opérations de manipulation des blocs sur le site de fabrication.

2.1 Granulats recyclés

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois en Allemagne et en Grande-Bretagne, après la seconde guerre mondiale. Depuis lors, beaucoup de pays essayent de développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton.

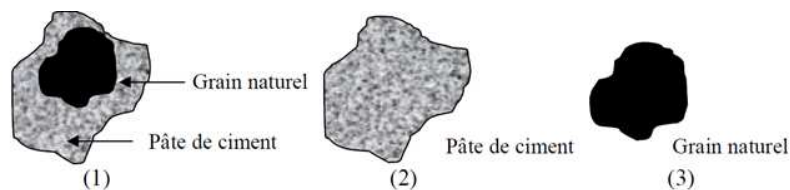


Figure 1: Formes de granulats recyclés (Douara *et al.*, 2009)

Les granulats fabriqués par ces déchets sont appelés granulats recyclés et le béton fabriqué à base de ces granulats est dit béton recyclé (Douara et al., 2009). Les granulats fabriqués à partir des déchets de laboratoire peuvent avoir plusieurs formes (Fig. 1) : (1) un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment, (2) une pâte de ciment seule, (3) un grain de gravier naturel (Douara et al., 2009). Les granulats utilisés dans le cadre de ce travail de recherche ont été fabriqués précédemment (Debieb, 2010). Les principales caractéristiques du matériau sont données au Tableau 1.

Tableau 1 : caractéristiques physiques et mécaniques des granulats recyclés carbonatés ou non

Essai	Essai Micro-Deval (-)	
	Granulats recyclés	Granulats recyclés carbonatés
1	4.96	5.23
2	4.86	6.11
3	5.12	5.46
Moyenne	4.98	5.60

Les granulats recyclés non carbonatés utilisés lors des expériences sont des granulats ayant une bonne résistance à l'usure puisque, en toute généralité, une valeur de 5-10 correspond à des gravillons résistants. Les granulats recyclés carbonatés sont également de bonne qualité (même ordre de grandeur de résistance à l'usure).

2.2 Fabrication des blocs de béton

Les bétons sont fabriqués à partir de CEM I 52,5 N dans les proportions données au Tableau 2. Ce sont des compositions tout à fait habituelles pour ce genre de matériau.

Tableau 2 : composition des blocs de béton à base de granulats recyclés et naturels

Composants	Quantités (%)	Quantités (kg/m ³)
Eau	5.2	105.0
Ciment CEM I 52.5 N	6.6	132.6
Sable de porphyre 0/2		814.8
Granulats recyclés (2/14)	88.2	966.4

La procédure de mélange de l'échantillon est décrite ci-après et s'inspire de la procédure de malaxage réalisée par Pascal Delhez. (Courard *et al.*, 2010):

- Introduction des agrégats et du sable dans le malaxeur et malaxage pendant 120 secondes ;
- Attendre 60 secondes ;
- Ajouter le ciment et malaxer pendant 2 minutes;
- Ajouter l'eau et malaxer pendant 2 minutes ;

Les étapes de vibration sous pression sont les suivantes (Fig. 2):

- Placer le moule sur la table vibrante (50 Hz) (Fig. 3);
- Placer, dans le moule métallique cubique, la moitié du béton frais;
- Placer un poids (\pm 8 Kilos) dans le moule, sur le béton frais ;
- Mettre la table vibrante en marche pendant une durée de 30 secondes ;
- Retirer le poids ;
- Placer l'autre moitié du béton frais dans le moule métallique ;
- Placer le poids de 8 kilos dans le moule, sur le béton frais ;
- Mettre la table vibrante en marche pendant 30 secondes ;
- Démoulage des blocs ;
- Mise en place des blocs dans les différentes cures.

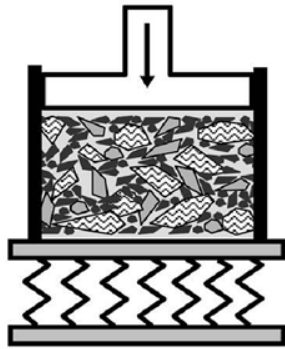


Figure 2: principe de vibration et de chargement



Figure 3: moules métalliques pour blocs de béton

2.3 Techniques d'injection du CO₂

L'objectif poursuivi par la mise en place de cette technique d'injection de CO₂ est la mise au point d'un système de carbonatation forcée. Une chambre climatisée appelée incubateur, régulée en humidité et en température, sera utilisée. Cet incubateur permet également d'injecter du CO₂ automatiquement. Les trois paramètres suivants peuvent être pris en compte par ce dernier : la température, l'humidité relative et le pourcentage de CO₂ injecté. La température est régulée à l'aide d'un bain thermostaté, l'humidité relative est assurée grâce à une solution saline de type Ca(NO₃)₂.4H₂O.

D'après M. Thiery (Thiery, 2005), les essais de carbonatation accélérée suggèrent qu'il est assez peu judicieux d'effectuer des essais avec une teneur en CO₂ faible (inférieure à 5%) car, à ce niveau, la vitesse de carbonatation est très sensible à de petites évolutions de la teneur en CO₂. Pour la raison qu'il évoque, le taux de CO₂ retenu dans cette étude est de 50%. Les études faites par Monkman et Shao (Monkman *et al.*, 2010) suggèrent la même teneur en CO₂ en insistant sur le fait que, dans l'air, la concentration de CO₂ est comprise entre 0.03% et 0.05%. Cette deuxième étude suggère l'utilisation d'un incubateur dont l'humidité relative est d'environ 60%, cette dernière étant celle à laquelle on travaille la plupart du temps.

Les incubateurs disponibles permettent de travailler à des taux de 20%, avec du CO₂ commercial. Le principe de fonctionnement de l'incubateur est schématisé ci-dessous (Fig. 4).

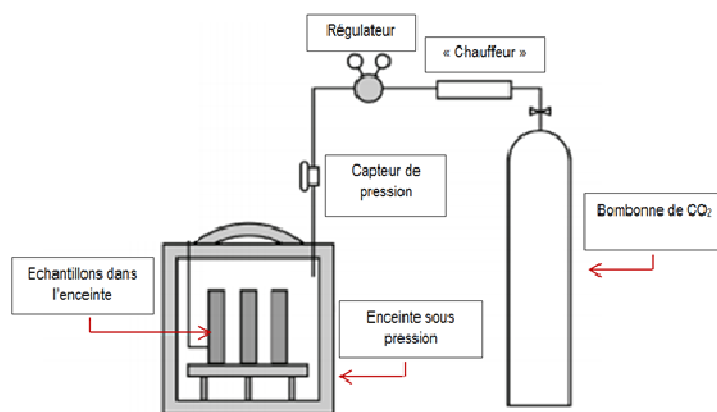


Figure 4: schéma de l'incubateur (Parmentier, 2012)

Le principe de fonctionnement de l'incubateur est le suivant : le récipient à pression dont le volume est de 0.04 m³ et la pression disponible de 5 MPa servent de source de CO₂. Le mélange de dioxyde de carbone

avec l'air est effectué dans un autre récipient accumulateur de pression pour un volume de 0.3 m³ et une pression allant jusqu'à 1 MPa. Le mélange de gaz est transporté par des tuyaux à travers le plafond des chambres hermétiques et le gaz se répand à travers des trous dans le plafond et le plancher. Cette opération est activée par un système de vannes. La surpression constante dans la plage comprise entre 150 et 200 Pa est maintenue dans la chambre hermétique par l'équipement de régulation automatique. Les ventilateurs sont placés à l'intérieur de la cuve et dans les chambres, pour garantir une concentration constante de dioxyde de carbone, qui est plus lourd que l'air. La concentration de CO₂ est enregistrée par les tubes de détection avec une précision de 0.5% (Jerga J., 2004).

2.4 Techniques de quantification de l'absorption de CO₂

Il est possible de quantifier l'absorption de CO₂ par la variation de la masse de l'échantillon suivant la formule donnée par (Monkman *et al.*, 2010):

$$\begin{aligned} \text{Gain en masse (\%)} &= (\text{masse}_{\text{finale}} + \text{masse}_{\text{eau perdue}} - \text{masse}_{\text{initiale}}) / \text{masse}_{\text{liant sec}} \\ &= \Delta \text{masse}_{\text{CO}_2} / \text{masse}_{\text{liant sec}} \end{aligned}$$

La masse d'eau est prise en compte car le test s'effectue en système fermé : un dispositif est mis en place pour capter l'eau perdue par les blocs de béton. Nous supposons que les granulats sont inertes vis-à-vis de la captation de CO₂. La masse de l'échantillon est mesurée après 1 heure, 3 heures, 7 heures pour les premiers tests afin de ne pas ouvrir l'incubateur trop souvent. La mesure sera effectuée après 16 heures, 24 heures, 32 heures, 48 heures pour les tests suivants.

Lors de l'introduction des blocs de béton dans l'incubateur, ces derniers vont rejeter l'eau: cette eau rejetée est évaluée au moyen de gel de silice, dont la propriété principale est de capter l'eau dans un environnement humide. Ce gel de silice va capter l'eau des blocs de béton mais également l'eau de la solution saline. Cette absorption est évaluée sur base de la variation de masse du gel de silice laissé un jour dans l'incubateur, sans blocs de béton, dans les conditions de cure de carbonatation accélérée (60% d'humidité relative et 20% de CO₂ injecté).

Une autre technique utilisée est l'analyse thermogravimétrique (TG-DSC) : elle est le résultat de l'application simultanée de la Thermogravimétrie (TG) et de la Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) dont la principale qualité est d'apporter plus d'informations que l'application séparée des deux machines. L'analyse thermogravimétrique est un essai primordial permettant de quantifier la carbonatation (Thiery, 2005).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Granulats recyclés carbonatés

Les granulats recyclés ont été placés dans l'incubateur à CO₂ pendant une durée de 7 heures. Nous constatons (Tableau 1) que les granulats recyclés non carbonatés ont une « meilleure » résistance à l'usure que les granulats recyclés carbonatés, ce qui peut paraître surprenant. On aurait pu imaginer que la gangue de mortier restante, attachée aux granulats recyclés, puisse se carbonater et fournir une meilleure résistance à l'usure grâce à l'injection de CO₂. Deux options sont possibles pour expliciter ce phénomène:

- la gangue de mortier restante était déjà complètement carbonatée avant d'être placée dans l'incubateur et les échantillons prélevés parmi les granulats carbonatés sont justes un peu moins résistants à l'usure que ceux des granulats recyclés non carbonatés ;
- l'échantillon n'est pas resté suffisamment longtemps dans l'incubateur pour que la gangue de mortier soit modifiée significativement et apporte une meilleure résistance à l'usure.

Finalement, les granulats recyclés ne sont pas aussi friables que l'image qu'ils pourraient renvoyer.

3.2 Effet de la carbonatation sur blocs à base de granulats naturels

Les blocs de béton ont subi deux cures différentes pendant 7 heures:

- chambre humide (100% H.R.),
- incubateur à 20% de CO₂.

Tableau 3 : résistance en compression sur blocs à base de granulats naturels

Essai	Résistance en compression (N/mm ²)	
	Cure humide	Cure CO ₂
1	1.06	1.55
2	1.11	1.44
3	0.92	1.41
Moyenne	1.04	1.47

Il existe une nette différence entre les échantillons placés à l'incubateur pour lesquels la résistance en compression moyenne est de l'ordre de 1.46 MPa et ceux placés en chambre humide qui atteignent une résistance de l'ordre de 1.04 MPa, ce qui correspond à une augmentation de 40.38% pour les échantillons placés en incubateur. L'évolution de la quantité de CO₂ absorbé est donnée à la Fig. 5.

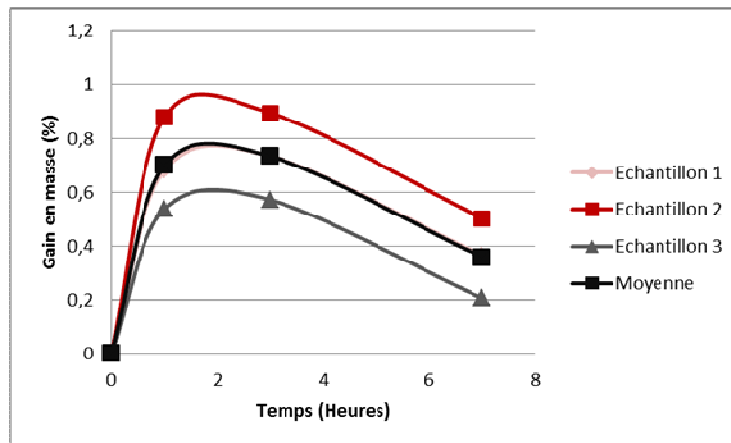


Figure 5 : évolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats naturels

Les trois échantillons suivent la même allure et nous remarquons assez facilement que l'absorption de CO₂, suivant les calculs établis par la formule de Monkman et Shao, atteint un palier maximum entre 1 heure et 3 heures, puis décroît. Ce relargage est dû à la perte d'eau qui est plus importante que l'absorption de CO₂. Nous constatons donc que l'absorption de CO₂ est très peu présente au sein de ces blocs de béton. Espérons, par la suite, obtenir une absorption de CO₂ plus convaincante avec les blocs à base de granulats recyclés.

3.3 Effet de la carbonatation sur blocs à base de granulats recyclés

Les mêmes essais sont réalisés sur des blocs fabriqués à partir de granulats recyclés. L'utilisation de granulats recyclés est tout aussi intéressante que l'utilisation des granulats naturels en termes de résistance en compression. L'évolution de la quantité de CO₂ absorbé est donnée à la Fig. 6.

Tableau 4 : résistance en compression sur blocs à base de granulats recyclés

Essai	Résistance en compression (N/mm ²)	
	Cure humide	Cure CO ₂
1	1.12	1.62
2	1.07	1.47
3	1.02	1.49
Moyenne	1.06	1.53

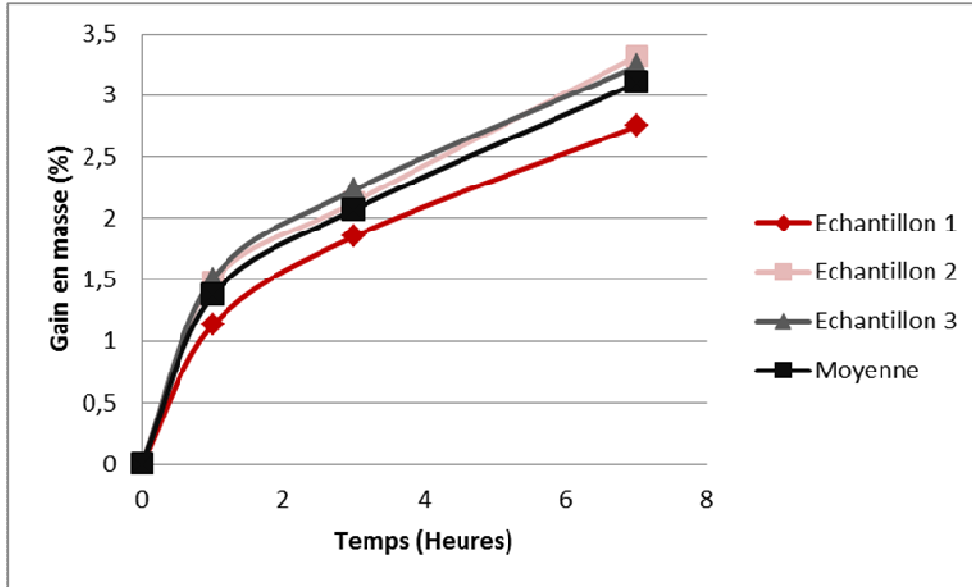


Figure 6 : évolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats recyclés

Autant pour les blocs placés en chambre humide que pour les blocs placés à l'incubateur, les résistances moyennes en compression des blocs à base de granulats recyclés sont légèrement meilleures que celles des blocs à base de granulats naturels. Il s'avère intéressant, ne fut-ce que pour la résistance en compression obtenue, d'utiliser des granulats recyclés.

3.4 Effet de la carbonatation sur blocs à base de granulats recyclés carbonatés

Les mêmes essais sont réalisés sur des blocs fabriqués à partir de granulats recyclés carbonatés.

Tableau 5 : résistance en compression sur blocs à base de granulats recyclés carbonatés.

Essai	Résistance en compression (N/mm ²)	
	Cure humide	Cure CO ₂
1	0.46	1.14
2	0.68	0.80
3	0.46	1.09
Moyenne	0.53	1.01

Nous constatons que, même si les blocs de béton placés à l'incubateur donnent de meilleures résistances en compression que ceux placés en chambre humide, les résultats ne sont pas ceux que l'on aurait pu espérer. Les résistances obtenues dans cette section sont de l'ordre de 1MPa alors que, pour des blocs de béton à base de granulats recyclés carbonatés, nous obtenons des résistances de l'ordre de 1.5 MPa, soit une augmentation de 50%.

3.5 Effet du temps de cure

Des essais ont été réalisés en conservant les blocs de béton à base de granulats recyclés (ce sont ceux qui donnaient les meilleures résistances) pendant 24 et 48 heures, dans les mêmes conditions de cure que précédemment (Tableau 6)

Tableau 6: résistance en compression sur blocs à base de granulats recyclés

Heures	Résistance en compression (N/mm ²)	
	Cure humide	Cure CO ₂
7	1.06	1.59
24	3.61	4.56
48	8.25	6.05

L'évolution de la quantité de CO₂ absorbé est donnée à la Fig. 7.

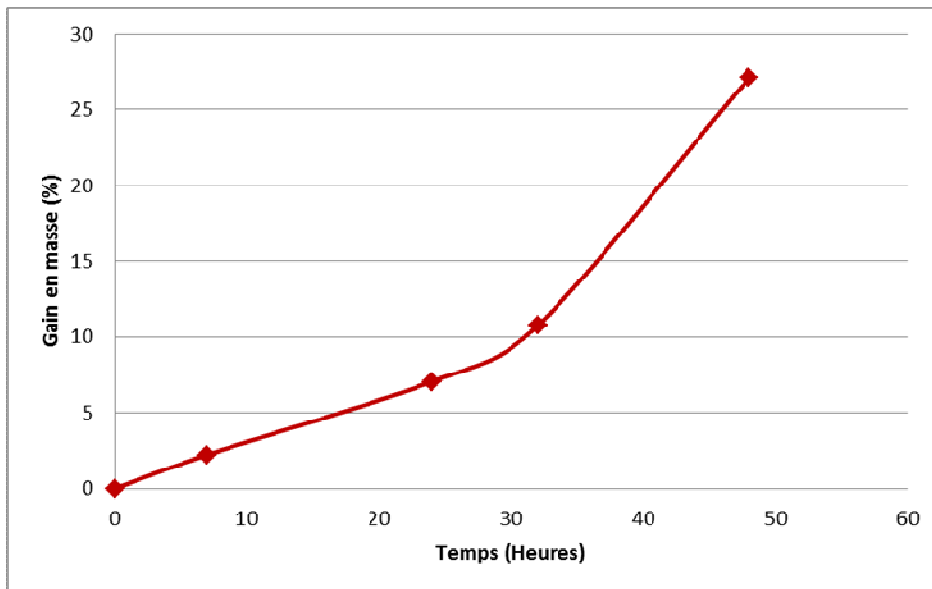


Figure 7 : évolution du pourcentage de CO₂ cumulé capté en fonction du temps pour les bétons à base de granulats recyclés

L'absorption de CO₂ est linéaire dans les premières 24 heures ; la pente devient plus marquée par la suite. Notons que, d'après Monkman et Shao, après 2 heures de carbonatation accélérée à 50% de teneur en CO₂, il y a 10% d'absorption de CO₂ par le béton. Après 24 heures, nous sommes à 30% d'absorption de CO₂ avec une teneur en CO₂ de 20% dans la chambre d'incubation.

4. BILAN ENVIRONNEMENTAL

Le bilan environnemental des blocs de béton placés en incubateur est positif vis-à-vis des blocs de béton placés en chambre humide. Il convient donc de faire une balance d'intérêts, toute considération économique mise à part, entre davantage de résistance et la préservation de l'environnement.

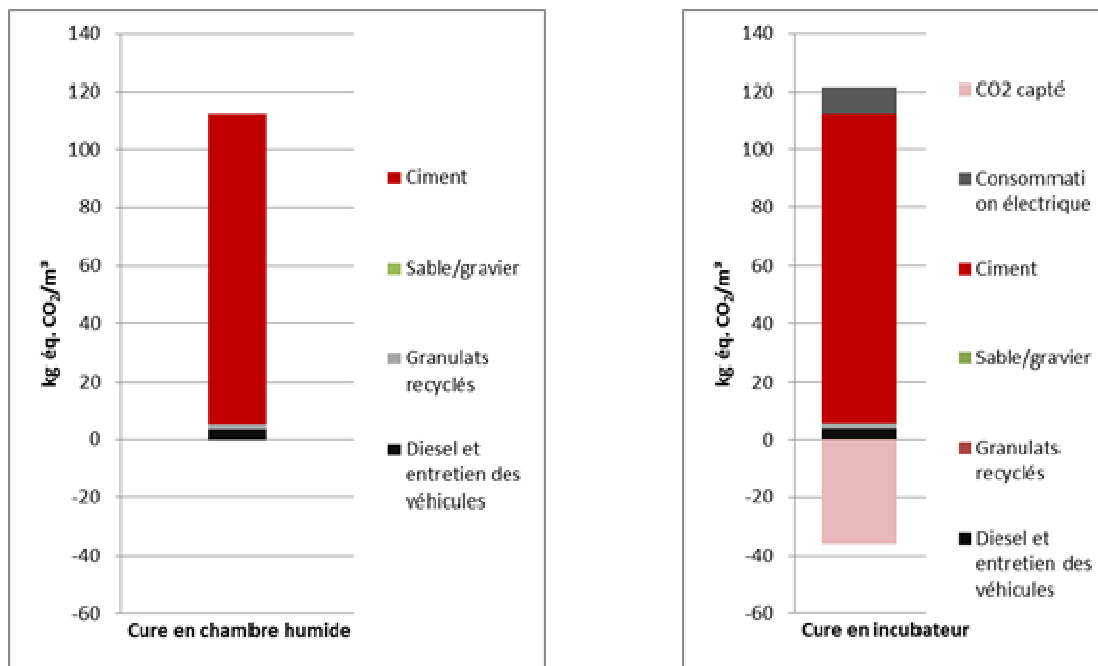


Figure 8: Potentiel de réchauffement global - Comparaison entre deux blocs de béton à base de granulats recyclés - cures différentes

5. CONCLUSIONS

Capter du CO₂ dans des blocs de béton se révèle être une bonne alternative pour l'environnement et, plus précisément, dans la lutte contre le réchauffement climatique via la limitation des gaz à effet de serre. De plus, l'évolution de la résistance mécanique des blocs de béton ayant subi une cure de carbonatation accélérée offre des perspectives intéressantes.

La quantification de l'absorption de CO₂ par variation de la masse de l'échantillon est efficace et assez précise. Elle permet de mettre en évidence l'évaluation de la captation du CO₂ avec le temps : en effet, pour des échantillons subissant une cure de carbonatation accélérée pendant une durée de huit heures, cette quantification est de l'ordre de quelques pourcents tandis qu'elle avoisine la trentaine de pourcents pour les échantillons subissant une cure de carbonatation de quarante-huit heures.

Toutefois, après huit heures de carbonatation accélérée dans un environnement avec une teneur en CO₂ de 20%, les blocs de béton à base de granulats recyclés non carbonatés offrent des résistances en compression plus élevées que celles des mêmes blocs placés en chambre humide. Cet effet est inversé avec le temps puisque, au terme de quarante-huit heures de cure de carbonatation accélérée, les blocs de béton placés en chambre humide possèdent des résistances plus importantes que les blocs placés en incubateur avec une teneur en CO₂ de 20%.

Cependant, même si la tendance s'inverse, la résistance du bloc de béton à base de granulats recyclés non carbonatés reste correcte puisqu'elle est, à 14 jours, de l'ordre des résistances obtenues traditionnellement pour des blocs de béton fabriqués en industrie.

Afin de compléter cette étude, il serait intéressant d'analyser la vitesse d'avancement du front de carbonatation, le pH dans les bétons ainsi que la modification de la microstructure interne des pâtes avec la carbonatation tout en quantifiant l'absorption de CO₂. Une teneur en CO₂ plus élevée dans l'incubateur serait peut-être également intéressante à exploiter.

6. REFERENCES

- Courard, L. et Teller, Ph. (2001) Evaluation environnementale des matériaux et des procédés de construction : application de l'analyse de cycle de vie à la construction d'un hall industriel. *Mater. Struct.*, 34 : 404-412.
- Courard, L. (2009) Cours « Entretien et réparation des constructions en béton » (165 pages) à destination des étudiants de 2MST CO et AR, 1 et 2MST GEOM. Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées.
- Courard, L., Michel, F. and Delhez, P. (2010) Use of Concrete Road Recycled Aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction Building Materials* 24(3): 390-395.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S. and Degeimbre, R. (2009) Roller Compacted Concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction Building Materials* 23(11): 3382-87.
- Debieb F., Courard, L., Kenai, S. and Degeimbre, R. (2010) Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites* 32 (6): 421-426.
- Douara, T.H., Benhouna, M. et Nezergui, B. (2009) Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels. SBEIDCO 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), Oct. 12-14.
- Jerga, J. (2004) Physico-mechanical properties of carbonated concrete. Institute of Construction and Architecture of the Slovak Academy of Sciences.
- Monkman, S. and Shao, Y. (2006) Assessing behaviour of cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18: 768-776.
- Parmentier, V. (2012) Tentative de fixation du CO₂ dans les blocs de béton à base de fibres végétales et granulats recyclés. Mst thesis, Université de Liège: 136p.
- Shao, Y., Mirza, M.S. and Wu, X. (2006). CO₂ sequestration using calcium silicate concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33: 776-784.
- Thiery, M. (2005) Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques. Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, France.
- Toennies, H. and Shideler, J.J. (1963) Plant drying and carbonation concrete block – NCMA-PCA cooperative program. *J. of the American Concrete Institute*: 617-632.
- Wong H.H.C., Kwan A.K.H., 2008, Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method, *Mater. Struct.* 41: 689–701. Young, J.F., Berger, R.L. and Bresse, J. (1974) Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂. *J. of the American Ceramic Society*, 57: 394-397.