

Étude de la carbonatation des granulats de béton recyclé altéré par la réaction alcali-silice

Thèse soumise en vue de l'obtention du titre
de doctorat en Sciences de l'Ingénieur et technologie

par

Sophie GRIGOLETTO

Jury

Pr. Boyan MIHAYLOV (Président)	Université de Liège
Pr. Luc COURARD (Promoteur)	Université de Liège
Pr. David BULTEEL	IMT Nord Europe
Pr. Frédéric COLLIN	Université de Liège
Pr. Josée DUCHESNE	Université Laval
Pr. Grégoire LÉONARD	Université de Liège
Pr. Zhengfeng ZHAO	Tongji University

Abstract

The growing use of recycled concrete aggregates (RCA) is driven by the need to reduce natural resource consumption and promote a circular economy in the construction sector. However, their wider application may be hindered by durability concerns, particularly alkali–silica reaction (ASR) when RCA originate from concrete containing reactive natural aggregates. In this context, accelerated carbonation has emerged as a promising treatment, offering both CO₂ sequestration and potential durability enhancement.

This thesis investigates accelerated carbonation as a strategy to mitigate ASR susceptibility in RCA through a combined experimental and chemo-mechanical modelling approach.

The experimental results demonstrate that RCA exhibit a significant CO₂ sequestration capacity, as evidenced by mass gain and thermogravimetric analysis, governed by cement paste content, initial conditions and relative humidity. Carbonation induces physico-chemical changes, including portlandite consumption and calcium carbonate formation, leading to microstructural densification, reduced porosity and water absorption, and increased density.

These modifications significantly affect ASR behaviour. Accelerated mortar tests conducted under highly alkaline conditions reveal a substantial reduction in ASR expansion following carbonation, while long-term expansion measurements on concrete specimens indicate nearly negligible expansions under the investigated conditions. Mechanical and microscopic damage assessments, based respectively on Stiffness Damage Tests (SDT) and the Damage Rating Index (DRI), further confirm the reduction of ASR-induced deterioration.

The mitigation mechanisms are attributed to the combined effects of reduced alkalinity, modified transport properties and enhanced alkali binding. To better understand their relative contribution, a chemo-mechanical model was developed to simulate ASR in concrete containing RCA. The model successfully reproduces the observed expansion kinetics and provides insight into the governing processes. In particular, it highlights the central role of portlandite in controlling alkalinity and shows how carbonation affects ASR through coupled changes in phase composition, transport properties and alkali retention. Although the model does not fully reproduce the near-complete inhibition observed experimentally, it identifies the main mechanisms governing the beneficial effects of carbonation.

Overall, the findings demonstrate that accelerated carbonation substantially alters the properties of recycled concrete aggregates and significantly reduces their ASR reactivity. This treatment therefore represents a promising pathway to simultaneously enhance the durability of recycled aggregate concrete and contribute to CO₂ sequestration.

Keywords: recycled concrete aggregates, accelerated carbonation, alkali–silica reaction, CO₂ sequestration, durability, chemo-mechanical modelling, alkali binding.

Résumé

L'utilisation croissante des granulats de béton recyclé (GBR) vise à réduire la consommation de ressources naturelles et à promouvoir une économie circulaire dans la construction. Toutefois, leur emploi à grande échelle reste limité par des enjeux de durabilité, notamment la réaction alcali-silice (RAS) lorsque les GBR proviennent de bétons contenant des granulats réactifs. Dans ce contexte, la carbonatation accélérée apparaît comme un traitement prometteur, associant séquestration du CO_2 et amélioration potentielle de la durabilité.

Cette thèse étudie la carbonatation accélérée comme stratégie de réduction de la sensibilité des GBR à la RAS, en combinant expérimentation et modélisation chemo-mécanique.

Les résultats expérimentaux montrent que les GBR présentent une capacité significative de séquestration du CO_2 , mise en évidence par les gains de masse et l'analyse thermogravimétrique, et gouvernée par la teneur en pâte cimentaire, l'état initial et l'humidité relative. La carbonatation induit des transformations physico-chimiques majeures (consommation de portlandite et formation de carbonates de calcium), conduisant à une densification microstructurale avec une diminution de la porosité et de l'absorption d'eau et une augmentation de la densité.

Ces modifications influencent fortement le comportement vis-à-vis de la RAS. Des essais accélérés sur mortier, réalisés en conditions fortement alcalines, montrent une nette réduction de l'expansion, tandis que des mesures à long terme sur béton indiquent des expansions quasi négligeables dans les conditions étudiées. Des indicateurs de dégradation mécanique issus des essais mécaniques (SDT) ainsi que des observations microscopiques basées sur le Damage Rating Index (DRI) confirment également la réduction de l'endommagement.

Les mécanismes de mitigation sont attribués à des modifications globales de l'environnement physico-chimique du matériau. Afin d'en préciser la contribution respective, un modèle chemo-mécanique a été développé pour simuler la RAS dans des bétons contenant des GBR. Le modèle reproduit correctement les cinétiques d'expansion observées et apporte un éclairage sur les mécanismes dominants. Il met notamment en évidence le rôle central de la portlandite dans le maintien de l'alcalinité et montre comment la carbonatation agit via des effets couplés sur l'alcalinité, les propriétés de transport et la fixation des alcalis. Bien que le modèle ne reproduise pas entièrement l'inhibition quasi totale observée expérimentalement, il permet d'identifier les principaux mécanismes à l'origine des effets bénéfiques de la carbonatation.

Globalement, la carbonatation accélérée modifie significativement les propriétés des GBR et réduit leur réactivité vis-à-vis de la RAS, constituant une voie prometteuse pour améliorer la durabilité des bétons recyclés tout en contribuant à la séquestration du CO_2 .

Mots-clés : granulats de béton recyclé, carbonatation accélérée, réaction alcali-silice, séquestration du CO_2 , durabilité, modélisation chemo-mécanique, fixation des alcalis.