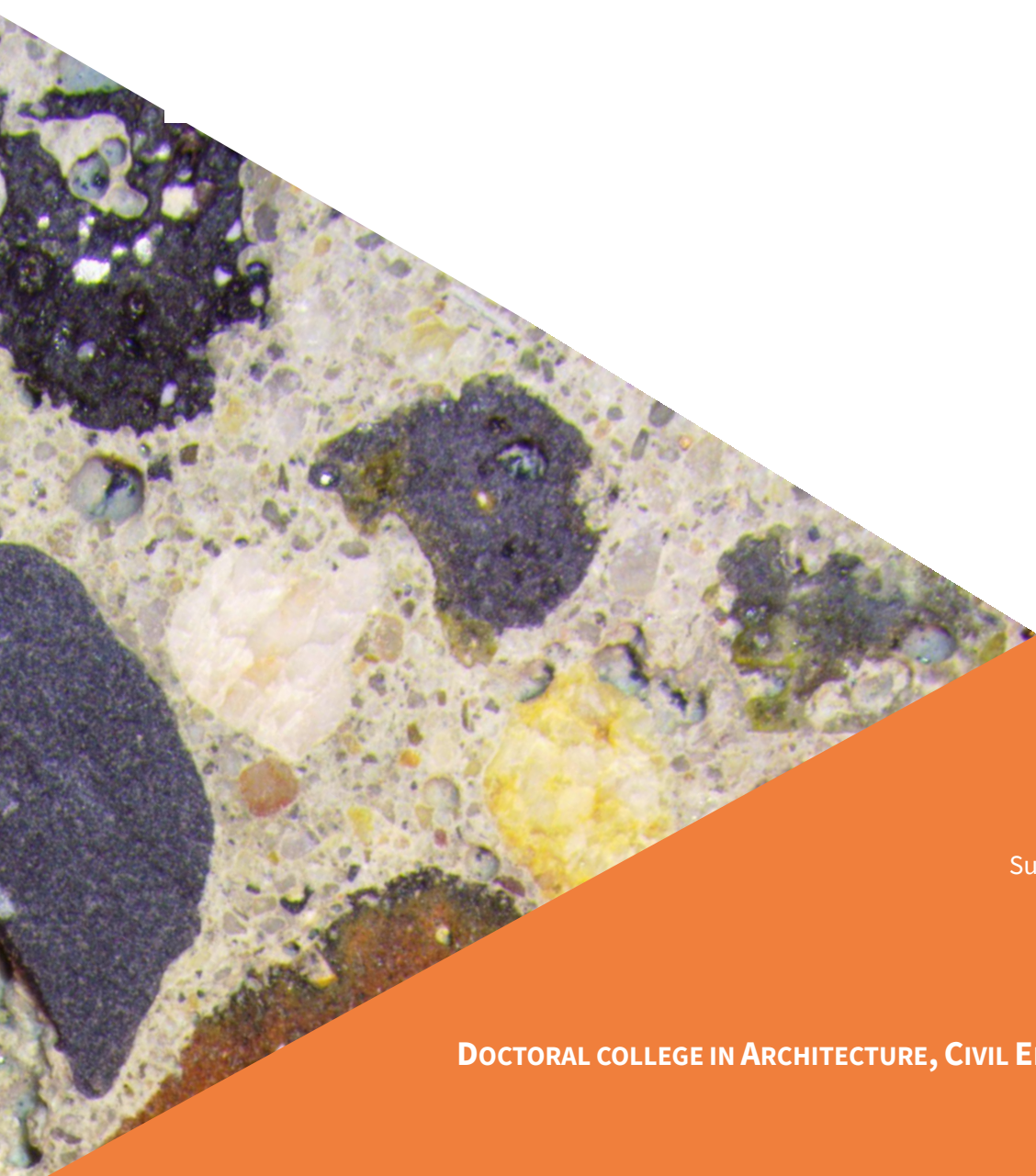


Accelerated carbonation of Municipal Solid Waste Incinerated Bottom Ash (MSWI-BA) for the design of concrete

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy (PhD) in Engineering Science and Technology

by

Imad Eddine KANJO



Supervisor: Luc COURARD

DOCTORAL COLLEGE IN ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEOLOGY

NOVEMBER 2026

Accelerated carbonation of Municipal Solid Waste Incinerated Bottom Ash (MSWI-BA) for the design of concrete

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in **Engineering Science and Technology**

by

Imad Eddine KANJO

Jury Members:

Prof. Shady ATTIA	Université de Liège	President
Prof. Kinda HANNAWI-SALMO	INSA Rennes	Reviewer
Prof. Stéphanie STAQUET	Université Libre de Bruxelles	Reviewer
Prof. Bertrand FRANÇOIS	Université de Liège	Examiner
Prof. Grégoire LEONARD	Université de Liège	Examiner
Prof. Luc COURARD	Université de Liège	Supervisor



Academic year: 2026-2027

Acknowledgements

I would like to express my deepest gratitude to my supervisor, Prof. Luc Courard, for providing me with the opportunity to undertake this doctoral research and for his continuous guidance, support, and encouragement throughout my PhD journey. His extensive knowledge, scientific rigor, and commitment to research have been a constant source of inspiration and have greatly contributed to the completion of this thesis.

I would like to warmly thank the members of the CARBOC project, particularly Séverine Marquis, Pablo de la Reta, Cédric Calberg, Johnny Zschau, Filip Covemaeker and Laurent Dupont for their collaboration, insightful discussions, and contributions throughout the project. Their interdisciplinary perspectives have greatly enhanced this work. My sincere appreciation also goes to the members of the jury and thesis committee for dedicating their time to evaluating this thesis and for their valuable comments and constructive suggestions, which have helped improve the quality of the manuscript.

I am grateful to my colleagues, laboratory members, and friends at the University of Liège for creating a stimulating and supportive research environment. In particular, I would like to thank Amaury Daras, Arthur Fanara, Bao Minh Phuong Ta, Céline Van Puyvelde, Eliot Thomas, Fatih Bülbül, Frédéric Michel, Jimmy Magien, Julien Hubert, Julien Troquay, Mostafa Kazemi, Moussa Ka, Romain Libert, Simon-Pierre Joy Salassi, Sophie Grigoletto, Sophie Lanckohr, Yeakleang Muy and Yoan Van Puyvelde for their support, assistance, and friendship throughout these years.

Above all, I would like to express my profound gratitude to my parents, Ibrahim and Mona, whose unconditional love, sacrifices, encouragement, and unwavering belief in me have made this achievement possible. I would also like to thank my brothers and sisters, Dina, Dalia, Mohamad Dib, and Hassan, for their constant support and encouragement. Their love and support have been a fundamental source of strength throughout my academic and personal journey.

I would also like to thank my friends in Belgium, particularly Abdo, Ali, Anna Maria, Jamil, Jawdat, Lara and Nour, for their friendship, support, and the many memorable moments we shared throughout my PhD. Their companionship made my time away from home both enjoyable and meaningful.

Finally, I would like to extend my gratitude to all the people I have met during this doctoral journey. Each interaction, whether academic or personal, has contributed to my growth as a researcher and as an individual. To everyone who has supported, encouraged, and inspired me along the way, I offer my sincere thanks.

This thesis is dedicated to all those who have contributed, directly or indirectly, to making this journey possible.

Résumé

La demande croissante en matériaux de construction durables et la nécessité urgente de réduire les émissions de gaz à effet de serre ont orienté la recherche vers des solutions innovantes favorisant à la fois l'efficacité dans l'utilisation des ressources et l'atténuation des émissions de carbone. Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagers (MIOM), sous-produit généré par les unités de valorisation énergétique des déchets, constituent une alternative prometteuse aux granulats naturels dans le béton et d'autres applications de construction. Toutefois, leur utilisation directe est souvent limitée par leur forte alcalinité, la présence de phases minérales réactives, leur instabilité volumique ainsi que les inquiétudes liées à la libération de contaminants.

Cette thèse de doctorat étudie la carbonatation accélérée comme stratégie de traitement des MIOM et évalue la faisabilité de l'utilisation du matériau traité comme granulats secondaires dans le béton. Ce travail examine les caractéristiques des MIOM, les mécanismes régissant la carbonatation ainsi que les principaux paramètres opératoires influençant l'efficacité du procédé, tout en évaluant les implications techniques, environnementales et pratiques de leur valorisation dans les matériaux de construction.

La recherche a été menée selon une approche expérimentale multi-échelle. Dans un premier temps, les caractéristiques physiques, chimiques et environnementales des MIOM ont été étudiées afin d'identifier les facteurs déterminant leur aptitude à être utilisés dans la production de béton. La carbonatation accélérée a ensuite été étudiée dans des conditions contrôlées afin d'évaluer l'influence de la granulométrie, de la teneur en eau, de la concentration en CO_2 , de la durée du traitement et du débit de gaz. Les essais de carbonatation statique ont montré que la disponibilité en eau constitue un paramètre déterminant pour l'efficacité de la carbonatation, les taux de captage du CO_2 les plus élevés étant obtenus en conditions humides. Des essais de carbonatation dynamique réalisés dans une colonne de percolation ont permis d'approfondir l'étude de l'influence du débit de gaz et de l'épaisseur du lit de mâchefers, tout en fournissant des informations sur les possibilités de mise à l'échelle du procédé.

Les MIOM carbonatés ont ensuite été évalués comme substitut partiel aux granulats naturels dans le béton. Différents taux de substitution et fractions granulométriques ont été étudiés afin d'analyser leur influence sur les propriétés à l'état frais, les performances mécaniques, la durabilité et le comportement environnemental du béton. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec des MIOM maturés de manière conventionnelle. Une attention particulière a été portée à l'influence du taux de substitution, de la fraction granulaire et de la qualité des mâchefers sur les performances du béton. En outre, le potentiel de taux de substitution plus

élevés a été étudié à l'aide de la fraction grossière 6/20 mm. Les résultats ont permis d'identifier les critères de qualité du matériau ainsi que les conditions d'utilisation nécessaires à l'incorporation fiable des MIOM carbonatés dans la production de béton.

Enfin, une analyse du cycle de vie a démontré que la carbonatation accélérée nécessite un apport énergétique limité tout en permettant la séquestration permanente du CO₂. L'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par des MIOM carbonatés a entraîné une réduction progressive des impacts environnementaux du béton, en particulier pour les catégories liées au changement climatique, à la formation de particules fines, à l'acidification et à la formation photochimique d'ozone. Ces bénéfices sont principalement attribués au remplacement des granulats vierges, à la valorisation d'un matériau issu d'un déchet et à l'absorption du CO₂ lors de la carbonatation. Dans l'ensemble, les résultats démontrent que la carbonatation accélérée constitue une stratégie efficace pour transformer les MIOM en une ressource secondaire à forte valeur ajoutée pour la production de béton, contribuant ainsi aux objectifs de l'économie circulaire et à la décarbonation du secteur de la construction.

Mots-clés : Mâchefers d'incinération des déchets ménagers (MIOM), Carbonatation accélérée, Sable, Granulats, Construction durable, Valorisation des déchets, Analyse du cycle de vie (ACV), Economie circulaire.

Abstract

The increasing demand for sustainable construction materials and the urgent need to reduce greenhouse gas emissions have driven research toward innovative solutions that promote both resource efficiency and carbon mitigation. Municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI-BA), a by-product generated by waste-to-energy facilities, represents a promising alternative to natural aggregates in concrete and other construction applications. However, its direct utilization is often limited by high alkalinity, the presence of reactive mineral phases, volumetric instability, and concerns regarding the release of contaminants.

This PhD thesis investigates accelerated carbonation as a treatment strategy for MSWI-BA and evaluates the feasibility of incorporating the treated material as a secondary aggregate in concrete. The work examines the characteristics of MSWI-BA, the mechanisms governing carbonation, and the key operational parameters influencing carbonation efficiency, while assessing the technical, environmental, and practical implications of its valorisation in construction materials.

The research was conducted through a multi-scale experimental approach. First, the physical, chemical, and environmental characteristics of MSWI-BA were investigated to identify the factors governing its suitability for concrete production. Accelerated carbonation was subsequently studied under controlled conditions to evaluate the effects of particle size, moisture content, CO₂ concentration, treatment duration, and gas flow rate. Static carbonation experiments identified moisture availability as a critical parameter controlling carbonation efficiency, with the highest CO₂ uptake achieved under wet carbonation conditions. Dynamic carbonation tests performed in a percolation column further examined the influence of gas flow rate and ash-bed thickness and provided insights into the potential scale-up of the carbonation process.

The carbonated MSWI-BA was then evaluated as a partial replacement of natural aggregates in concrete. Different replacement levels and particle size fractions were investigated to assess their effects on fresh-state properties, mechanical performance, durability, and environmental behaviour. The results were compared with those obtained using conventionally matured bottom ash. Particular attention was given to the influence of replacement rate, aggregate fraction, and bottom ash quality on concrete performance. In addition, the potential for higher substitution rates was explored using the coarse 6/20 mm fraction. The findings identified key material quality requirements and application conditions necessary for the reliable use of carbonated MSWI-BA in concrete production.

Finally, a life cycle assessment demonstrated that accelerated carbonation requires limited energy input while simultaneously enabling permanent CO₂ sequestration. Increasing the replacement of natural aggregates with carbonated MSWI-BA progressively reduced the environmental impacts of concrete, particularly with respect to climate change, particulate matter formation, acidification, and photochemical ozone formation. These benefits were primarily attributed to the substitution of virgin aggregates, the valorisation of a waste-derived material, and the uptake of CO₂ during carbonation. Overall, the results demonstrate that accelerated carbonation is an effective strategy for transforming MSWI-BA into a valuable secondary resource for concrete production, contributing to both circular economy objectives and the decarbonisation of the construction sector.

Keywords: Municipal solid waste incineration bottom ash, Accelerated carbonation, Sand, Aggregates, Sustainable construction, Waste valorisation, Life cycle assessment, Circular economy.