

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
Spécialité : « (Génie Civil) »

Par

« **Hiam DAHANNI** »

« **Modélisation des impacts environnementaux et de la durabilité du béton en milieu marin** »

Thèse présentée et soutenue à Nantes Université, le 07 janvier 2025

Unité de recherche : Université Gustave Eiffel, MAST-GPEM, Campus de Nantes, Bouguenais

Rapporteurs avant soutenance :

Ben Amor Professeur, Université de Sherbrooke-Québec
Nele De Belie Professeur, Université de Gand

Composition du Jury:

Président :

Examineurs : Stéphanie Bonnet
Bernard Yannou
Adélaïde Feraille

Directrice de thèse : Anne Ventura

Codirecteur de thèse : André Orcesi

Codirectrice de thèse : Eva Queheille

Professeur, Nantes Université

Professeur, Centrale Supélec-Paris

Ingénieur Divisionnaire des TPE, École des Ponts-ParisTech

Directrice de Recherche, Université Gustave Eiffel, Nantes

Ingénieur Divisionnaire des TPE, Cerema, Paris

Chargée de Recherche, Université Gustave Eiffel, Nantes

Titre : Modélisation des impacts environnementaux et de la durabilité du béton en milieu marin

Mots clés : pénétration des chlorures, production de béton, Analyse du Cycle de Vie (ACV), performance mécanique, stratégie de sobriété

Résumé : L'industrie de la construction fait face à des défis majeurs pour réduire ses impacts environnementaux, en particulier dans la production de béton, qui continue de voir une demande croissante et reste un contributeur important aux émissions mondiales de CO₂. L'une des stratégies envisagées pour atténuer ces impacts consiste à prolonger la durée de vie du béton, ou à améliorer ses performances mécaniques, pour en diminuer la demande (stratégie dite de « sobriété »). Les performances du béton, qui sont ses fonctionnalités en Analyse du Cycle de Vie (ACV), sont étroitement liées à la qualité et la nature du ciment. Ainsi pour évaluer les stratégies de sobriété il est nécessaire d'avoir une approche intégrée de modélisation des performances mécaniques du ciment et du béton, des performances de durabilité du béton, et de leurs impacts environnementaux. Ce modèle doit faire appel à des facteurs influents à la fois spécifiques à chacun aspect, mais aussi et surtout communs à deux ou trois de ces aspects.

En premier, une revue bibliographique des modèles de durabilité aux chlorures montre qu'il n'existe pas de modèle prenant en compte tous les paramètres. Un méta-modèle semi-empirique est alors développé et validé. Ce modèle prend en compte de nombreux paramètres dont la quantité d'additions aux laitiers dans le ciment et la porosité du béton, elle-même particulièrement liée à la finesse du ciment.

En second, une revue bibliographique des modèles d'ACV pour la production de ciment examine si les principales caractéristiques du ciment et les paramètres opérationnels identifiés par l'industrie cimentière pour réduire ses impacts environnementaux sont efficacement pris en compte dans les modèles existants.

Enfin, un modèle ACV générique pour le ciment est développé afin de paramétrer des stratégies visant à réduire ses impacts environnementaux tout en améliorant les performances du béton. Ce modèle propose des évaluations environnementales paramétrées, basées sur des données techniques réelles. Une analyse de sensibilité réalisée sur ce modèle permet de lister des mesures opérationnelles pour améliorer la performance environnementale du ciment selon son contexte de production. La substitution du clinker par le laitier est le facteur le plus influent, mais cela reste une solution limitée par un gisement insuffisant pour pouvoir la généraliser. L'augmentation de la finesse du ciment entraîne une légère augmentation de la consommation d'énergie de broyage, mais cette augmentation reste négligeable sur la majorité des impacts environnementaux de la production de ciment. Ces résultats sont prometteurs, car ils offrent une perspective simple à mettre en œuvre pour diminuer la consommation de béton tout en conservant ses performances mécaniques et de durabilité : l'amélioration de la finesse du ciment. Cependant le modèle à l'échelle du béton reste à finaliser et à analyser plus finement. D'autre part, un modèle de durabilité plus générique, intégrant d'autres additions serait nécessaire. Enfin, l'ouvrabilité du béton est une performance qui n'a pas été prise en compte, et qui doit être considérée car elle implique une limite aux performances de résistance et de durabilité, et/ou l'ajout d'additifs dont les impacts environnementaux sont mal connus.

Title: Modeling the environmental impact and durability of concrete in a marine environment

Keywords: chloride ingress, concrete production, Life Cycle Assessment, mechanical performance, sobriety strategy

The construction industry faces major challenges in reducing its environmental impacts, particularly in concrete production, which continues to see growing demand and remains a major contributor to global CO₂ emissions. One of the strategies being considered to mitigate these impacts is to extend the life of concrete, or improve its mechanical performance, to reduce demand for it (a strategy known as "sobriety"). The performance of concrete, which is its functionality in Life Cycle Assessment (LCA), is closely linked to the quality and nature of the cement. So, to evaluate sobriety strategies, an integrated approach is needed to model the mechanical performance of cement and concrete, the durability performance of concrete, and their environmental impact. This model needs to draw on influential factors that are both specific to each aspect, but also and above all common to two or three of these aspects. Firstly, a literature review of chloride durability models shows that there is no model that takes all parameters into account. A semi-empirical meta-model was then developed and validated. This model takes into account a number of parameters, including the quantity of ground granulated blast furnace slag in the cement and the porosity of the concrete, which is itself particularly linked to the fineness of the cement.

Secondly, a literature review of LCA models for cement production examines whether the main cement characteristics and operational parameters identified by the

cement industry to reduce its environmental impacts are effectively taken into account in existing models.

Finally, a generic LCA model for cement is developed to parameterize strategies aimed at reducing its environmental impact while improving concrete performance. This model proposes parameterized environmental assessments based on real technical data. A sensitivity analysis carried out on this model enables us to list operational measures to improve the environmental performance of cement according to its production context. The substitution of clinker by ground granulated blast furnace slag is the most influential factor, but remains a solution limited by insufficient deposits to be generalized. Increasing cement fineness leads to a slight increase in grinding energy consumption, but this increase remains negligible in terms of the majority of the environmental impacts of cement production. These results are promising, as they offer an easy-to-implement way of reducing concrete consumption while maintaining its mechanical performance and durability: improving cement fineness. However, the concrete-scale model remains to be finalized and analyzed in greater detail. In addition, a more generic durability model integrating other additions would be necessary. Finally, the workability of concrete is a performance which has not been taken into account, and which needs to be considered as it implies a limit to strength and durability performance, and/or the addition of admixtures whose environmental impact is poorly understood.