
Modélisation pour la conception durable des structures en béton armé de classe d'exposition XC4

Van-Loc TA¹, Anne VENTURA^{1,2}, Stéphanie BONNET³, Tristan SENGA KIESSE⁴

¹ Université de Nantes, GeM, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, CNRS UMR 6183, Chaire Génie Civil Eco-construction, France

² Institut Français Transports Aménagement Réseaux (IFSTAR – MAST – GPEM)

³ Université de Nantes, GeM, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, CNRS UMR 6183, France

⁴ UMR SAS, INRA, AGROCAMPUS OUEST, 35000 Rennes, France

RÉSUMÉ. Ce travail présente une nouvelle approche pour concevoir une structure durable en béton armé de classe d'exposition XC4. Cette approche est basée sur l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Elle prend en compte l'impact de la conception de la structure sur le changement climatique incluant l'activité de maintenance pendant une durée de vie de 100 ans. Les interventions de maintenance sont déterminées en fonction d'un modèle de carbonatation. La combinaison de deux méthodes d'analyse de sensibilité est utilisée pour identifier l'influence individuelle des paramètres d'entrée du modèle et les possibles interactions entre eux. Les différentes solutions de conception sont comparées pour maximiser la durabilité tout en minimisant les impacts sur le changement climatique. Une conception optimale béton d'enrobage est obtenue en maximisant sa résistance à la compression à 28 jours du ciment et la période de cure, et minimisant son rapport eau sur ciment, son dosage en ciment, son épaisseur ainsi que de la teneur en clinker utilisé dans ce matériau.

ABSTRACT. This paper presents a new approach to design a sustainable Reinforced Concrete (RC) structure in class exposure XC4. This approach is based on Life Cycle Assessment (LCA). It considers the influence of design parameters on climate change, including maintenance activity of the concrete altered by carbonation for a 100-year service life. The dates of maintenance operation are based on a carbonation model. Two sensitivity analysis methods are used to identify the individual influence of design parameters and their possible interactions. Various possible design solutions are compared to maximize durability and minimize impact on climate change. The sustainable RC structure may be achieved by designing the concrete cover with the highest 28-day compressive strength of cement, longest initial curing period, lowest water-to-cement ratio, smallest amount of cement content, thinnest concrete cover depth, and the cement type with less clinker content.

MOTS-CLÉS : éco-Conception, Béton, Carbonatation, Analyse de sensibilité, Durabilité, Impact changement climatique.

KEY WORDS: Designing for environment, Concrete, Carbonation, Sensitivity analysis, Durability, Impact on climate change.

1. Introduction

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé au monde, avec environ 2,7 milliards m³ produit en 2002 dans le monde entier [NAI 2008]. Dans la plupart des cas, le béton est composé d'environ 15% de ciment Portland dont la production représente actuellement entre 5%-7% des émissions totales de CO₂ anthropique [IEA 2009]. Ainsi, environ 90% des émissions de CO₂ du béton proviennent du ciment [DOU 2014]. Ainsi, pour progresser vers une conception plus durable des ouvrages en béton armé, il est nécessaire de prendre en compte leurs impacts environnementaux et leur durée de vie [NAI 2008]. Dans cette étude, nous proposons une nouvelle approche basée sur l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour la conception d'une structure en béton armé qui pourrait être altérée par la carbonatation. L'objectif est de déterminer les paramètres de conception permettant à la fois à maximiser sa durée de vie et à minimiser son impact sur le changement climatique.

2. Méthode

Le cas d'étude correspond à 1 m² de surface du béton d'enrobage en contact avec l'air extérieur donc pouvant être altéré par la carbonatation naturelle. La durée de vie prévue de cette structure est de 100 ans. Nous avons supposé que la structure est localisée à Madrid (Espagne) où l'humidité relative extérieure d'environ 0,56 [ENE] est favorable à la carbonatation du béton. La progression du front de carbonatation est modélisée afin de déterminer les interventions de maintenance : si le front de carbonatation atteint les armatures avant 100 ans, le béton subit une opération de décapage et de remplacement par un nouveau béton dont les caractéristiques seront supposées identiques. La démarche intègre : (1) le modèle de carbonatation pour prédire l'intervention de maintenance (durée nécessaire au front de carbonatation pour atteindre l'armature) [TA 2016] ; (2) l'ACV pour estimer l'impact du béton d'enrobage sur le changement climatique pendant la durée de vie prévue ; et (3) deux méthodes d'analyse de sensibilité pour déterminer les paramètres d'entrée du modèle les plus influents sur la durée de vie et l'impact sur le changement climatique. Concernant l'ACV la base de données d'Ecoinvent [ECO] a été utilisée pour calculer les inventaires des flux élémentaires liés à la fabrication du béton et de ses composants (ciment, sable, gravillon, eau, et adjuvant) et à l'opération de décapage et du remplacement par un nouveau béton. L'indicateur pour le changement climatique utilisé est le Global Warming Potential (GWP) sur un horizon temporel de 100 ans, développé par le GIEC [IPCC].

Deux méthodes d'analyse de sensibilité appliquées de manière complémentaire sont celles de Morris et de Sobol. Soit le modèle f de carbonatation utilisé liant la variable réponse y (temps d'initiation de la corrosion et indicateur de changement climatique) aux paramètres d'entrée x_1, \dots, x_n supposés indépendants. La méthode de Morris [MOR 1991] permet rapidement de classer les paramètres x_j selon leur influence et de caractériser une influence de type monotone ou non-monotone sur la sortie du modèle observée. Cette méthode estime les dérivées partielles de premier ordre, appliquées effets élémentaires, par rapport à un paramètre à la fois. Plusieurs répétitions sont effectuées de manière à pouvoir calculer la moyenne des effets élémentaires (μ_j) qui indique le sens de l'influence d'un paramètre x_j sur la sortie y , et la moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires (μ_j^*) et leur écart-type (σ_j) pour identifier les effets de monotonie ou non-monotonie sur y . La méthode de Sobol [SOB 2001], basée sur la décomposition de la variance totale de la sortie y , permet de calculer des indices qui mesurent l'influence individuelle d'un paramètre x_j (indice de sensibilité de premier ordre S_j) et son influence totale qui inclut l'influence en interaction des paramètres de conception (indice de sensibilité totale S_{T_j}). Les indices de sensibilité de Sobol sont calculés par des simulations de Monte Carlo en utilisant les distributions de probabilités des paramètres d'entrée du modèle considéré (Tableau 1).

3. Résultats et discussions

W/C , f_{cem} , C , CEM , T , RH , S_{max} , et d sont, dans l'ordre décroissant, les paramètres d'entrée du modèle les plus influents sur la durée de vie de l'enrobage en béton (Figure 1). f_{cem} , T , W/C , CEM , RH , d , t_c , et C sont, dans l'ordre décroissant, les paramètres d'entrée du modèle les plus influents sur l'indicateur de changement climatique généré par la fabrication et l'entretien du béton d'enrobage (Figure 2). Parmi les paramètres influents, f_{cem} , W/C , CEM , d , S_{max} , t_c , et C , sont des paramètres de conception (voir Tableau 1), c'est-à-dire contrôlables, tandis que T et RH , sont liées aux conditions environnementales incertaines. Pour augmenter la durée de vie, il faut augmenter f_{cem} , C , et d (effet croissant sur la durée de vie car $\mu_j > 0$) et diminuer W/C , CEM , S_{max} (effet décroissant sur la durée de vie car $\mu_j < 0$) dans la phase de conception. Similairement, pour diminuer l'impact sur le changement climatique, il faut augmenter f_{cem} , CEM et t_c (car $\mu_j < 0$) et diminuer W/C , C , et d (car $\mu_j > 0$).

Tableau 1 : Caractérisations de la structure en béton armé de classe d'exposition XC4.

Paramètre (unité) / Symbole / Loi de probabilité (min-max) / Référence
La teneur en ciment (kg/m^3) / C / Uniforme (300-509) / [NF E 2004]
Le rapport eau/ciment (-) / W/C / Uniforme (0,4-0,5) / [NF E 2004]
Le rapport sable/gravillon (-) / S/G / Uniforme (0,5-2,1)
La taille maximale de granulats (mm) / S_{max} / Uniforme (20-32) / [NF E 2004]
Type du ciment (-) / CEM / Uniforme discrète (10 types de ciment : CEM I, CEM II/A, CEM IV/A, CEM II/B, CEM IV/B, CEM V/A, CEM III/A, CEM V/B, CEM III/B, CEM III/C) / [NF E 2004]
La résistance à la compression à 28 jours du ciment (MPa) / f_{cem} / Uniforme discrète (3 classes : 32,5 MPa, 42,5 MPa, 52,5 MPa) / [NF E 2004]
L'épaisseur du béton d'enrobage (m) / d / Uniforme (0,05-0,08) / [LNE 2007]
La période de cure (jours) / t_c / Uniforme (1-3) / [MAR 2010]
La distance de transport des matériaux au site (km) / $Trans.$ / Uniforme (1-50)
La température ambiante (K) / T / Normale tronquée ($\mu = 287,4$, $\sigma = 8,6$, $a = 272,4$, $b = 309,1$) / [ENE]
L'humidité relative extérieure (-) / RH / Normale tronquée ($\mu = 0,56$, $\sigma = 0,18$, $a = 0,13$, $b = 1$) / [ENE]
La concentration en CO_2 dans l'air (ppm) / CO_2 / Normale tronquée ($\mu = 380$, $\sigma = 19$, $a = 304,6$, $b = 456,8$) / [IPCC 2013]

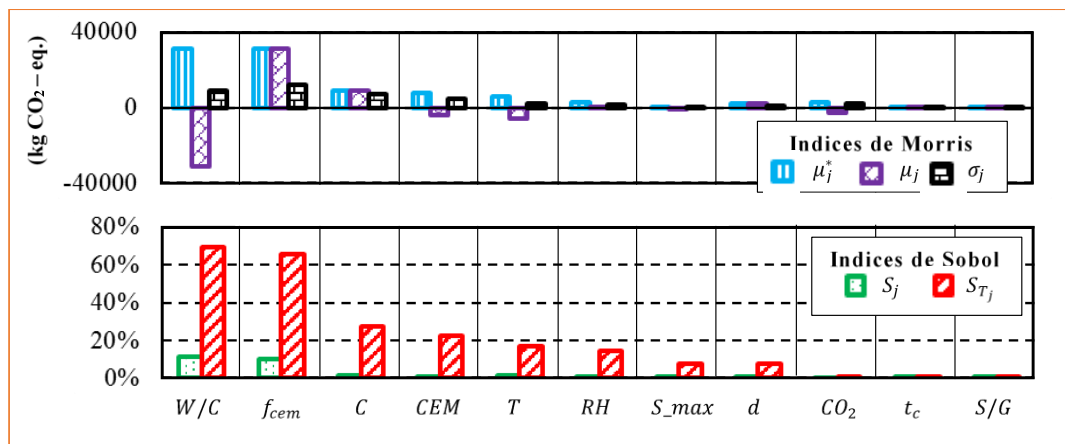


Figure 1. Résultats d'analyse de sensibilité de la durée de vie de l'enrobage en béton.

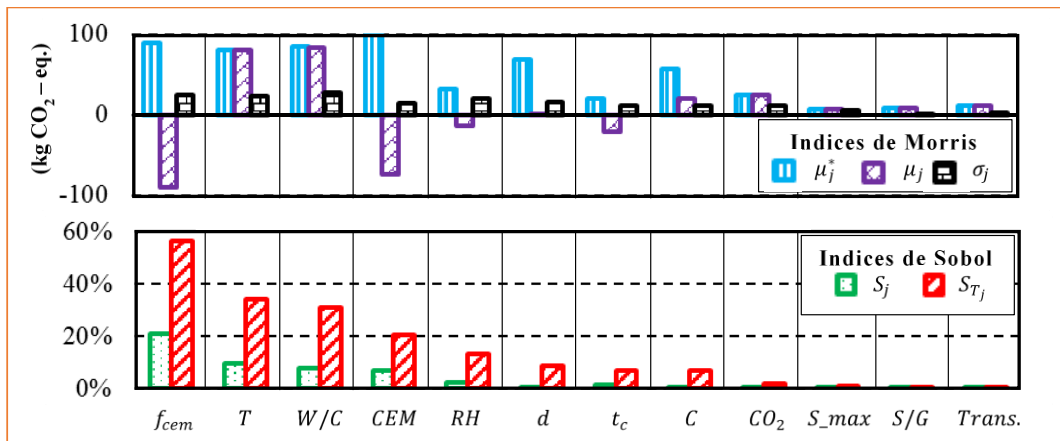


Figure 2. Résultats d'analyse de sensibilité de l'impact sur le changement climatique de l'enrobage en béton.

La variation du paramètre CEM provoque des effets non-monotones sur la durée de vie, et les variations des paramètres d et RH provoquent des effets non-monotones sur l'indicateur de changement climatique (car $\sigma_j > |\mu_j|$). On a trouvé que les deux paramètres W/C et f_{cem} les plus importants et efficaces pour la conception durable. Les résultats obtenus peuvent être expliqués par le fait que la durée de vie est plus sensible aux paramètres f_{cem} et W/C [WAS 2001] [JIA 2012]. Ainsi, une augmentation considérable de la durée de vie est obtenue en maximisant f_{cem} et minimisant W/C . Si ces paramètres sont choisis de manière à éviter une maintenance pendant la durée de vie prévue, l'impact sur le changement climatique est fortement diminué car aucun béton de remplacement n'est produit.

4. Conclusions

Ce travail a présenté une nouvelle approche pour concevoir une structure durable en béton armé de classe d'exposition XC4. L'intégration d'un modèle de carbonatation et de l'ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux de la structure étudiée sur l'ensemble de la durée de vie prévue. De plus, la combinaison de l'ACV avec l'étude de sensibilité du modèle a permis de déterminer les paramètres sur lesquels peut agir l'acteur pour concevoir une structure durable et qui impacte peu le changement climatique. Les résultats montrent que, dans le cas étudié, maximiser la durabilité va de pair avec minimiser le changement climatique. Cependant, d'autres scénarios doivent être testés avant de tirer des conclusions plus générales, notamment l'utilisation d'une maintenance préventive avec des vernis protecteurs. Enfin, seul le changement climatique a été considéré, et il faudrait inclure les autres effets sur l'environnement dans la méthode afin de voir si ces résultats le concernent également.

5. Bibliographie

- [DOU 2014] DOUG HOOTON R., BICKLEY J. A., « Design for durability: The key to improving concrete sustainability », *Construction and Building Materials*, vol. 67, 2014, p. 422-430.
- [ECO] www.ecoinvent.org
- [ENE] <https://energyplus.net/weather>
- [IEA 2009] IEA et WBCSD, *Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emissions reductions up to 2050*, Paris, France, 2009.
- [IPCC] <https://www.ipcc.ch>
- [IPCC2013] IPCC, *Fifth Assessment Report – Climate change 2013*, Paris, France, 2013.
- [JIA2012] JIA Y. A., YAN P., « Natural and accelerated carbonation of concrete containing fly ash and GGBS after different initial curing period », *Magazine of Concrete Research*, vol. 64, n° 2, 2012, p. 143-150.
- [NAI 2008] NAIK T. R., ASCE F., « Sustainability of concrete construction », *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 13, n° 2, 2008, p. 98-103.
- [NF E 2004] NF EN 206-1, « Béton – Partie 1: spécification, performances, production et conformité », 2004.
- [MAR 2010] MARQUES P. F., COSTA A., « Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies », *Construction and Building Materials*, vol. 24, 2010, p. 258-265.
- [MOR 1991] MORRIS M. D., « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments », *Technometrics*, vol. 33, 1991, n° 2 p. 161-174.
- [SOB 2001] SOBOL I. M., « Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates », *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 55, 2001, n° 1, p. 271-280.
- [TA 2016] TA V.-L., BONNET S., SENG KIESSE T., VENTURA A., « A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures », *Construction and Building Materials*, vol. 129, 2016, p. 172-181.
- [WAS 2001] WASSERMANN R., KATZ A., BENTUR A., « Minimum cement content requirements: a must or a myth », *Materials and Structures*, vol. 42, 2009, p. 973-982.
- [LNE 2007] LNEC E465, « Concrete. Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS », Lisbon: LNEC 2007.