

Méta-modélisation basée sur le chaos polynomial d'un modèle multi-physique de chloration du béton pour estimer les effets du changement climatique

Phu Tho Nguyen¹, Emilio Bastidas-Arteaga¹, Charbel-Pierre El Soueidy¹, Ouali Amiri¹

¹ Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR CNRS 6183, Université de Nantes

Adresse : 2 Rue de la Houssinière, Nantes Cedex 3, BP 92208, 44322, Nantes, France

Email : emilio.bastidas@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. La corrosion induite par les ions chlorure est l'une des principales causes de la dégradation précoce des constructions en béton armé. L'estimation du temps d'initiation de la corrosion dépend de la modélisation de la chloration qui demeure une tâche complexe. Notre travail consiste donc en une méta-modélisation du mécanisme de chloration pour prendre en compte des incertitudes des paramètres du matériau et climatiques, en vue d'une évaluation du risque de corrosion. Le méta-modèle se repose sur une approximation par polynômes de chaos qui se base sur la méthode de régression. Afin d'étudier l'efficacité du méta-modèle, deux structures exposées à deux types caractéristiques d'exposition et de climat (zone de marnage à Brest et zone continentale à Strasbourg) sont considérées. Les premiers résultats obtenus montrent que le méta-modèle permet de gagner beaucoup de temps de calcul par rapport au calcul classique tout en gardant la précision du modèle déterministe. L'analyse de sensibilité par indices de Sobol permet de relever l'importance de chaque paramètre pour le temps d'amorçage de la corrosion. De plus, différents scénarios climatiques sont également pris en compte afin d'évaluer l'effet du réchauffement climatique sur la probabilité d'initiation de la corrosion des structures en béton armé.

ABSTRACT. Chloride-induced corrosion is a main cause of premature degradation of reinforced concrete (RC) structures. The assessment of the time to corrosion initiation depends on the chlorination modelling that remains a complex task. This research thus aims at using a meta-modeling in order to propagate uncertainties related to material properties and climate, and to assess risk of corrosion initiation over time. The meta-model is a Polynomial chaos expansion approximation based on regression method. In order to study the effectiveness of the meta-model, we study two RC structures, exposed to two different types of exposure and climate (tidal zone in Brest, and continental climate with de-icing salts in Strasbourg). The first results obtained show that the meta-model can lead to a substantial reduction in computational cost with respect to classic computational method, while keeping the accuracy of the deterministic model. Global sensitivity analysis through Sobol indices of time to initiation corrosion is carried out to study the importance of each input parameter on time to corrosion initiation. Furthermore, various climate change scenarios are also taken into account to assess the effect of the global warming on the probability of corrosion initiation of RC structures.

MOTS-CLÉS: Transfert de chlorure, Corrosion, Béton armé, Changement climatique, Propagation d'incertitudes, Polynôme de chaos.

KEY WORDS: Chloride ingress, Corrosion, Reinforced concrete, Climate change, Uncertainty propagation, Polynomial chaos expansion.

1. Introduction

La corrosion induite par la chloration est connue comme une principale cause de dégradation précoce des constructions en béton armé. Selon les résultats obtenus du projet BRIME [BRI 01], il y a 26%, 37%, 39% et 30% de ponts affectés par dégradation au Norvège, en Allemagne, en France et en Grande Bretagne, respectivement. Cela relève une importante conséquence économique due à la réparation et maintenance des constructions en béton armé. La chloration est un processus complexe influencé par différentes sources d'incertitude. Cette étude considère un modèle déterministe multiphysique de transfert de chlorure capable de prendre en compte l'interaction avec des paramètres environnementaux [NGU 17]. Comme ce modèle est coûteux en temps de calcul, nous avons procédé à une méta-modélisation afin de propager des incertitudes et calculer la probabilité d'initiation de la corrosion. Se basant sur une approximation par polynômes de chaos, cette méthode permet de

réduire considérablement le temps de calcul. Dans ce travail, nous avons considéré deux types d'exposition, représentant deux configurations caractéristiques différentes en France (à Brest, les constructions soumises à des cycles de marnage et à Strasbourg, les constructions exposées aux sels de déverglaçage). Une étude de sensibilité basée sur les indices de Sobol est également effectuée.

2. Temps d'initiation de corrosion induite par chlorures

Afin de calculer le temps d'initiation de corrosion, nous utilisons dans un premier temps le modèle de transfert de chlorures qui a été établi et validé dans un travail précédent [NGU 17]. Il s'agit d'un modèle optimisé en termes de la précision et du temps de calcul en vue d'une étude probabiliste. Le modèle représente le couplage de trois transferts et s'exprime sous la forme de l'équation différentielle partielle suivante :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \text{div}(J_d) + \text{div}(J_c) \quad [1]$$

Les termes dans l'équation [1] sont détaillés dans le tableau 1.

Tableau 1. Détails du modèle couplé du transfert de chlorure

Modèle du transfert	Variable	$\frac{\partial \psi}{\partial t}$	J_d	J_c
Transfert d'humidité	W	$\frac{\partial W}{\partial t}$	$D_W \frac{\partial W}{\partial x}$	0
Transfert thermique	T	$\frac{\partial T}{\partial t}$	$-\lambda \text{ grad} T$	0
Transfert de chlorures	C_{fc}	$\frac{\partial(WC_{fc})}{\partial t} + \frac{\partial C_b}{\partial C_{fc}} \frac{\partial C_{fc}}{\partial t}$	$-D_f W \text{ grad} C_{fc}$	$-C_{fc} D_W \text{ grad} W$

Le modèle de chloration est couplé avec des données climatiques tenant compte du réchauffement climatique [CNR 14]. Trois scénarios climatiques sont étudiés. Le scénario de référence « Ref » ne représente aucun réchauffement climatique alors que les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle, correspondent à deux forçages radiatifs, soit deux scénarios de changement climatique différents.

3. Approximation par polynômes de chaos

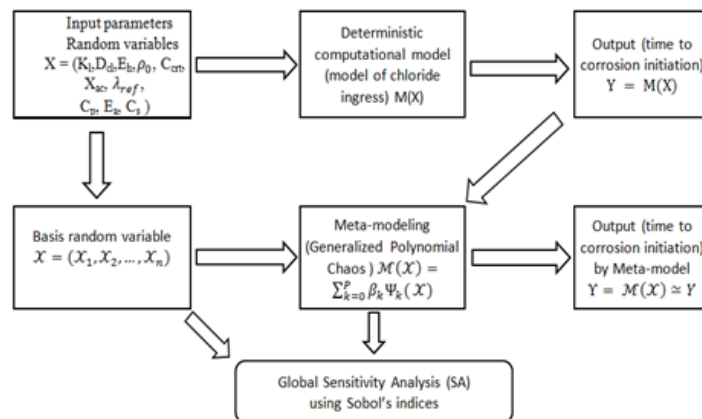


Figure 1. Organigramme du méta-modèle

L'approximation par polynômes de chaos consiste à représenter la réponse d'un modèle par une fonction polynomiale multidimensionnelle, prenant en compte les incertitudes des paramètres d'entrée. Cette approximation peut être établie moyennant la méthode de régression. Elle peut s'écrire sous la forme générale suivante [BLA 10, SUD 08]:

$$\hat{Y} = \mathcal{M}^{PCE}(X) = \sum_{k=0}^p \beta_k \Psi_k(X)$$

où β_k est un paramètre inconnu qui peut être déterminé moyennant la méthode de régression, $\Psi_k(X)$ est un polynôme de base, X est un ensemble des variables aléatoires représentant les paramètres d'entrée. L'évaluation du risque de l'initiation de la corrosion des structures est donc réalisée selon l'organigramme de la Fig. 1. De plus, l'analyse de sensibilité globale de la sortie du méta-modèle permet de caractériser l'importance de chacun des paramètres d'entrée et de tenir compte de l'interaction entre les paramètres [CRE 01, SOB 01].

4. Résultats et discussion

Afin d'étudier la précision du méta-modèle, nous avons comparé les résultats du modèle déterministe et du méta-modèle sur 1000 données de temps d'initiation de la corrosion correspondant au scénario climatique RCP 8.5 (Fig. 2). Nous trouvons une très bonne concordance entre les deux modèles avec les coefficients de détermination de l'ordre 0.99. D'où l'efficacité du méta-modèle pour l'évaluation de la probabilité de corrosion. Sachons qu'une fois que le méta-modèle est établi nous pouvons nous en servir pour une simulation probabiliste lourde telle que la méthode Monte-Carlo avec un gain de temps considérable.

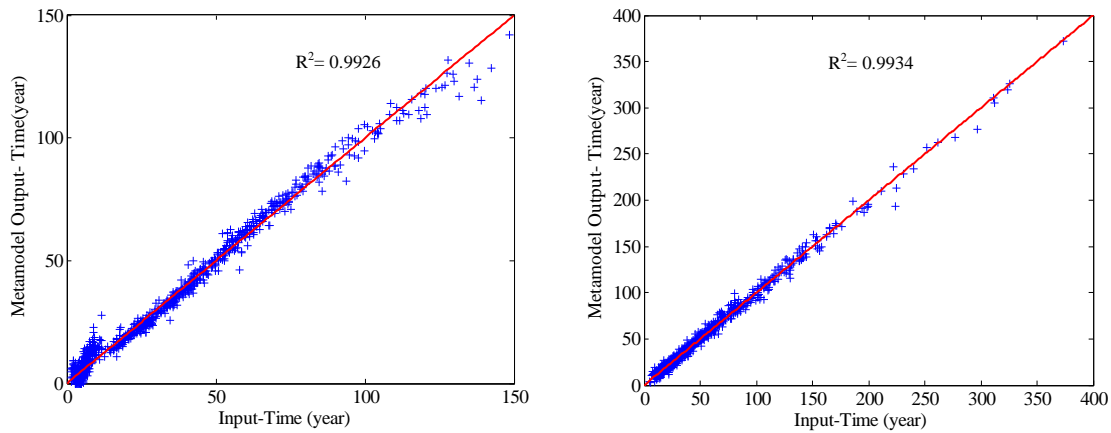


Figure 2. Comparaison préalable entre les résultats donnés par le modèle déterministe et le méta-modèle : a) Zone de marnage RCP8.5(Brest) ; b) Sels de déverglaçage RCP8.5(Strasbourg)

A travers l'analyse de sensibilité (Fig. 3), nous pouvons établir que l'ordre d'importance (décroissant) des paramètres d'entrée vis à vis du temps d'initiation de la corrosion est le suivant : la concentration de chlorure à la surface C_s , la concentration critique C_{crit} , l'enrobage X_{ac} , le coefficient de diffusion de chlorure D_{cl} et le facteur d'âge m . Ce classement permet de prioriser des moyens de caractérisation des incertitudes des paramètres les plus influents pour l'estimation de la durée de vie. Les paramètres relatifs aux transferts hydriques et thermiques (k_l , E_h , ρ_0 , λ_{ref} , C_p et E_a) ont une faible influence sur le temps d'initiation de la corrosion.

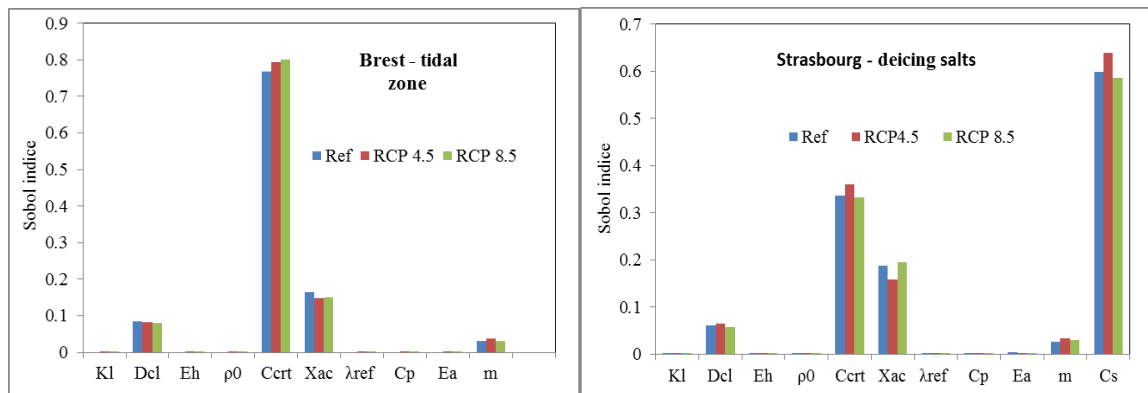


Figure 3. Analyse de sensibilité du temps d'initiation de la corrosion aux paramètres : a) Zone de marnage (Brest) ; b) Sel de déverglaçage (Strasbourg)

Nous avons étudié trois différents scénarios climatiques (2017-2047) à l'aide d'un modèle (Fig. 4). Nous trouvons que les scénarios RCP 4.5 et 8.5 augmentent la probabilité d'initiation de corrosion par rapport au scénario de référence. En effet, les deux premiers représentent une augmentation de température moyenne qui accélère le transfert de chlorures dans les structures et ensuite réduit le temps d'initiation de corrosion. Cependant les résultats relèvent une similarité apparente entre l'effet des RCP 4.5 et 8.5 sur la probabilité d'initiation de corrosion pour les deux structures considérées.

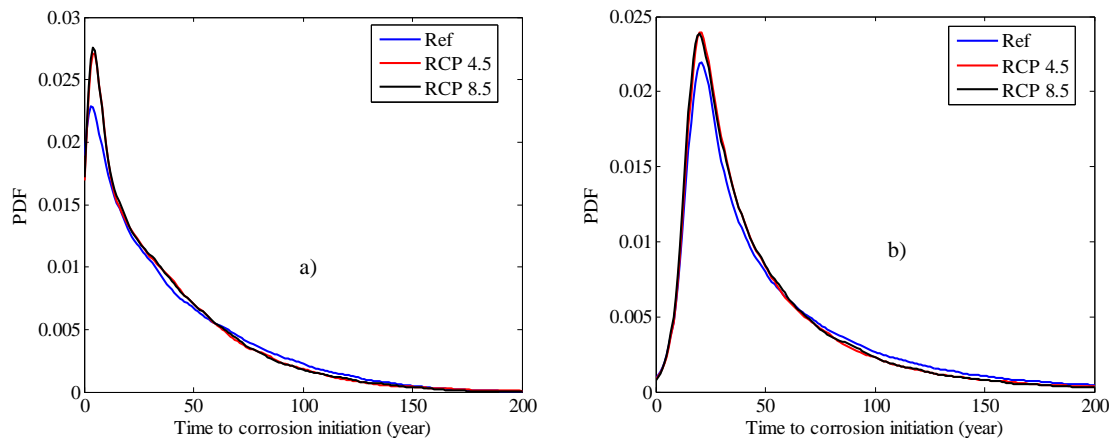


Figure 4. Fonction de densité de probabilité d'initiation de corrosion pour chaque scénario climatique : a) Zone de marnage (Brest) ; b) Sel de déverglaçage (Strasbourg)

5. Conclusion

En vue d'une approche probabiliste d'initiation de corrosion, nous avons utilisé l'approximation par polynômes de chaos qui se montre efficace en termes du temps de calcul et de la précision. Cela permet de faire une analyse de sensibilité globale du temps d'initiation de corrosion. Des augmentations de la probabilité d'initiation de corrosion des structures sous l'effet de changement climatique sont constatées.

6. Remerciements

Les auteurs remercient la Région Pays de la Loire pour le soutien de cette étude à travers le projet RI-ADAPTCLIM (Réseau international sur l'évaluation des risques et l'adaptation climatique d'ouvrages en génie civil et bâtiments)

7. Bibliographie

- [BLA 10] BLATMAN, G., & SUDRET, B. Efficient computation of global sensitivity indices using sparse polynomial chaos expansions. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11), 2010, 1216–1229. doi:10.1016/j.res.2010.06.015
- [BRI 01] BRIME., Bridge management in Europe. The European union: transport research and technological development, final report, 2001;
- [CRE 09] CRESTAUX, T., LE MAITRE, O., & MARTINEZ, J.-M. Polynomial chaos expansion for sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(7), 2009, 1161–1172. doi:10.1016/j.res.2008.10.008
- [CRN 14] CNRM2014., modèle Aladin. <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/179>, 2014
- [MET 16] METEO FRANCE. Données Publiques de Météo-France. https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=95&id_rubrique=32, 2016
- [NGU 17] NGUYEN, P.T., BASTIDAS-ARTEAGA, E., AMIRI, O., EL-SOUEIDY, C., An efficient chloride ingress model for long-term lifetime assessment of reinforced concrete structures under realistic climate and exposure conditions, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2017, doi: 10.1007/s40069-017-0185-8
- [SOB 01] SOBOL', I. M., Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1–3), 2001, 271–280. doi:10.1016/S0378-4754(00)00270-6
- [SUD 08] SUDRET, B., Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(7), 2008, 964–979. doi:10.1016/j.res.2007.04.002