
Capacité des modèles analytiques de carbonatation à appréhender la variabilité spatiale

N. Rakotovao Ravahatra^{1, 2}, E. Bastidas-Arteaga¹, F. Schoefs¹, T. de Larrard², F. Duprat²

¹ Université Bretagne Loire, Université de Nantes, Research Institute in Civil and Mechanical Engineering (GeM), UMR CNRS 6183, Sea and Litoral Research Institute (IUML), FR CNRS 3473, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes cedex 3, France

² LMDC, Université de Toulouse, INSAT, UPS, 135 Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse Cedex 4, France

RÉSUMÉ. Le présent travail vise à étudier la capacité des modèles analytiques de carbonatation du béton à reproduire la corrélation spatiale des sorties de modèles en prenant en compte la variabilité spatiale des paramètres d'entrée. Cette étude se concentre sur les modèles analytiques étant donné qu'ils ont été conçus pour des applications pratiques en ingénierie. Des mesures de propriétés physiques du béton et des profondeurs de carbonatation ont été réalisées par des techniques destructives en plusieurs points sur une portion linéaire d'un mur dans le cadre du projet ANR EVADEOS. Les incertitudes liées aux dispositifs et procédures expérimentaux sont estimées et propagées à travers les modèles puis prises en compte dans l'estimation de la corrélation spatiale. Des indices de correspondance simples sont ensuite proposés pour classer les modèles de carbonatation par rapport à leur capacité à refléter les profils de corrélation des profondeurs réelles de carbonatation. Les résultats mettent évidence les limites des modèles analytiques de carbonatation à appréhender la variabilité spatiale, en particulier en présence d'incertitudes.

ABSTRACT. The aim of this study is to assess the ability of analytical models of concrete carbonation to reproduce the spatial correlation of measured outputs by taking into account the spatial variability of the input parameters. This study focuses on analytical models since they have been designed for practical engineering applications. Measurements of concrete physical properties and carbonation depths were carried out by destructive techniques at several points on a linear portion of a wall within the ANR EVADEOS project. The uncertainties related to the experimental devices and procedures are estimated and propagated through the models and taken into account in the estimation of the spatial correlation. Correspondence indexes are then proposed to classify the carbonation models with respect to their ability to reflect the correlation profiles of the measured carbonation depths. The results highlight the limitations of analytical carbonation models in propagating spatial variability, especially in the presence of uncertainties.

MOTS-CLÉS : *Corrélation spatiale, Incertitudes, Carbonatation, Béton armé, Inspection.*

KEYWORDS : *Spatial correlation, Uncertainty, Carbonation, Reinforced concrete, Inspection.*

1. Introduction

Cette étude a été menée dans le cadre du projet ANR-EVADEOS dont l'objectif global est d'offrir aux gestionnaires d'ouvrage en béton armé une stratégie de maintenance préventive contre la corrosion des aciers. Dans le cas des structures nouvelles, l'inspection et la collecte de données sont cruciales pour renseigner les paramètres des modèles servant à prévoir l'initiation de la corrosion. Dans notre cas, il s'agit des modèles de carbonatation du béton. La variabilité spatiale inhérente aux propriétés physiques du béton et de l'épaisseur d'enrobage est primordiale et doit être correctement caractérisée et modélisée [LI 04]. Par conséquent, les modèles de carbonatation, doivent être capables d'intégrer la variabilité spatiale des paramètres d'entrée et de la propager sur la sortie du modèle. Une façon pratique de caractériser la variabilité spatiale des champs aléatoires stationnaires est d'évaluer la corrélation spatiale des données [KEN 13]. Les données recueillies à partir de structures réelles peuvent être perturbées par : l'inexactitude des dispositifs expérimentaux, la complexité du processus expérimental, etc. L'objectif principal du présent travail est d'étudier la capacité des modèles analytiques de carbonatation à propager la variabilité spatiale des paramètres d'entrée mesurés (porosité, degré de saturation et densité), et cela en tenant compte des incertitudes. La méthode repose sur une comparaison entre

les sorties simulées et mesurées (profondeur de carbonatation) en terme de corrélation spatiale. Une approche statistique est proposée pour étudier la capacité des modèles analytiques à faire face à la variabilité spatiale.

2. Structure étudiée

Il s'agit d'une partie d'un mur en béton armé construit en 1979 clôturant un site de traitement de déchets inertes du CEA à Saclay. Le mur a une hauteur de 2.3m, plusieurs dizaines de mètres de longueurs et 20cm d'épaisseur. La partie étudiée mesure 3.5m de largeur et est orientée Est-Ouest. 21 carottes traversant toute l'épaisseur du mur ont été extraites le long d'une même ligne horizontale située à 1,5 m au-dessus du sol, avec une distance constante de 16 cm entre les mesures. Les paramètres mesurés et qui ont été traités dans cette étude sont : la porosité, le degré de saturation, la densité et la profondeur de carbonatation. Les conditions d'exposition après 35 ans de chaque face du mur sont assez différentes et par conséquent leur effet sur les quantités mesurées (profondeur de carbonatation ou degré de saturation) n'est pas négligeable. En effet, la valeur moyenne de la profondeur de carbonatation est de 1,96 cm pour la face nord (face A) et de 2,42 cm pour la face sud (face C). Il a donc été décidé d'examiner séparément les mesures obtenues sur chaque face.

3. Estimation de la corrélation spatiale

Pour un champ aléatoire unidimensionnel et stationnaire, le profil de corrélation le long du domaine est déterminé comme étant les valeurs successives du coefficient de corrélation par rapport à la distance Δx entre les points :

$$\rho_D(\Delta x) = \frac{E[(X(x_i) - m_X)(X(x_i + \Delta x) - m_X)]}{s_X^2} \quad [1]$$

Où m_X et s_X sont respectivement la moyenne et l'écart-type de X estimés à partir de valeurs indépendantes de données à une distance Δx les uns des autres.

4. Incertitudes des données et du calcul

Dans cette étude, les incertitudes sont estimées selon la norme européenne [AFN 14]. La porosité, le degré de saturation et la densité sont estimés comme fonction $f(m_k)$ de n_m différentes mesures de masse : en tant que telles, après séchage complet et après saturation complète (masse mesurée dans l'air ou dans l'eau). La balance électronique a une erreur de détermination connue $\pm \Delta m$, et l'incertitude sur la mesure de masse est $u_m = \Delta m / \sqrt{3}$. L'incertitude sur le degré de saturation, la porosité, ou la densité u_f est alors exprimée comme suit :

$$u_f = u_m \sqrt{\sum_{k=1}^{n_m} \left(\frac{\partial f}{\partial m_k} \right)^2} \quad [2]$$

La profondeur de carbonatation a été mesurée visuellement avec une erreur de détermination $\pm \Delta x_c$ de l'opérateur. L'incertitude affectant la profondeur de carbonatation est alors : $u_{x_c} = \Delta x_c / \sqrt{3}$

La précision du calcul de la corrélation spatiale selon l'équation [1] dépend du nombre de couples de mesures distants de Δx . L'incertitude correspondant a été estimée numériquement suivant la procédure décrite dans [RAV 17].

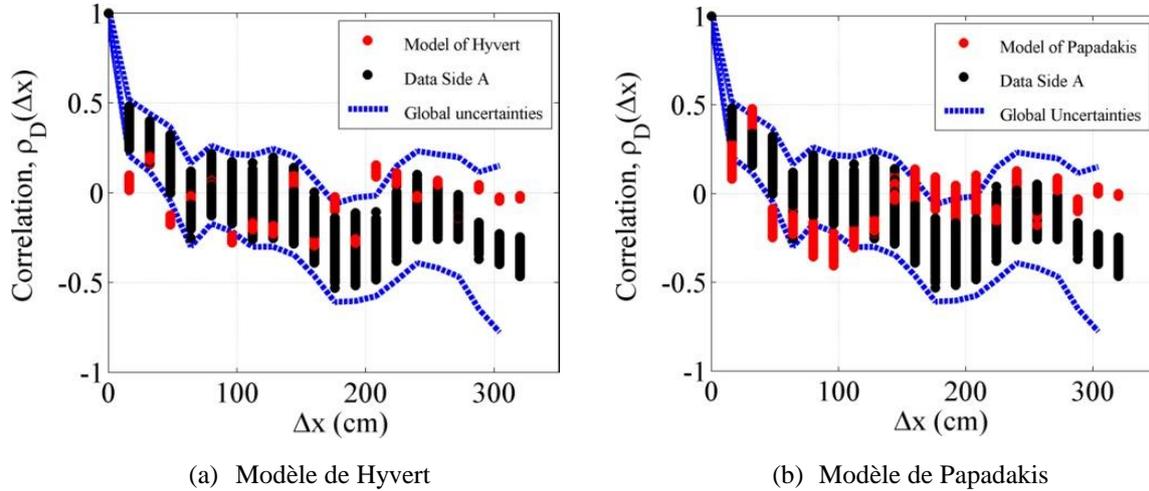
5. Propagation d'incertitudes et comparaison des modèles

Les paramètres d'entrée des modèles (degré de saturation, porosité et densité) sont maintenant simulés selon une distribution uniforme centrée sur les valeurs mesurées (moyenne). 1000 trajectoires sont échantillonnées pour chaque paramètre et sont utilisées pour calculer les trajectoires de la profondeur de carbonatation correspondantes à $t_{exp} = 35$ ans. De même, 1000 trajectoires de profondeur de carbonatation mesurée ont été échantillonnées directement selon une distribution uniforme de x_c . Des profils de corrélation de x_c , $\rho_D(\Delta x)$, ont été estimés à partir de ces trajectoires selon l'équation [1]. Chaque valeur de corrélation est indiquée sur la Figure 1 pour deux modèles de carbonatation à titre d'illustration. L'incertitude liée à l'erreur numérique dans le calcul des profils de corrélation est également ajoutée aux incertitudes sur les mesures. On obtient alors l'incertitude globale représentée par les lignes en tiret bleus. On note que les valeurs correspondant aux profils de corrélation expérimentale (bâtonnets noirs) sont plus dispersées, pour les mêmes distances Δx , que ceux calculés à partir de la sortie du modèle (bâtonnets rouge). Ceci est dû au fait que le coefficient de variation de la profondeur de

carbonatation est plus faible lorsqu'il est calculé à partir de la plage de variation plutôt étroite des paramètres d'entrée que lorsque calculé à partir de la valeur expérimentale.

En comparant la Figure 1 (a) et la Figure 1 (b), on peut voir que cette variation dépend aussi du modèle considéré : la propagation des mêmes incertitudes des paramètres d'entrée conduit à une dispersion plus large pour le modèle de Papadakis.

Figure 1 Profils de corrélation spatiale des données expérimentales et des sorties du modèle de Hyvert (a) et le modèle de Papadakis (b) pour la face A



Sur la base des résultats présentés dans la Figure 1, on peut définir deux indices de correspondance basés désormais sur le chevauchement des profils de corrélation obtenus respectivement par les modèles et l'évaluation directe. Alors que le premier ($I_{CM,mes}$) ne considère que l'incertitude de mesure, le second ($I_{CM,global}$) prend en compte les incertitudes globales. Les deux indices sont estimés selon la procédure suivante :

1. pour chaque distance Δx_i on note $n_{mes,i}$ et $n_{global,i}$ le nombre de valeurs de corrélations spatiales qui satisfont à :

$$\begin{aligned} \min(\rho_{mes,i}) \leq \rho_{mod,i} \leq \max(\rho_{mes,i}) & \quad \text{pour les incertitudes sur les mesures} \\ \min(\rho_{global,i}) \leq \rho_{mod,i} \leq \max(\rho_{global,i}) & \quad \text{pour les incertitudes globales} \end{aligned} \quad [3]$$

2. si N est le nombre total de profils de corrélation spatiale, deux marques de correspondance pourraient être définies pour chaque distance Δx_i :

$$\begin{aligned} T_{mes,i} &= \frac{n_{mes,i}}{N} & \text{pour les incertitudes sur les mesures} \\ T_{global,i} &= \frac{n_{global,i}}{N} & \text{pour les incertitudes globales} \end{aligned} \quad [4]$$

3. les indices de correspondance peuvent être exprimés comme suit, où n est le nombre de points d'évaluation:

$$\begin{aligned} I_{CM,mes} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{mes,i} & \text{pour les incertitudes sur les mesures} \\ I_{CM,global} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{global,i} & \text{pour les incertitudes globales} \end{aligned} \quad [5]$$

Le classement des modèles selon $I_{CM,mes}$ et $I_{CM,globales}$ est indiqué dans le Tableau 1. Il n'est pas surprenant que les valeurs de $I_{CM,globales}$, englobant l'effet de l'inexactitude numérique dans le calcul des coefficients de corrélation, soient supérieures à celles de $I_{CM,mes}$. Cela n'affecte pas le classement des modèles pour la face A. Néanmoins, pour la face C, il a été constaté que la plupart des profils de corrélation obtenus par les modèles sont négatifs alors que ceux déduits de la mesure de la profondeur de carbonatation restent largement positifs. À l'exception du modèle Ying-Yu, toutes les valeurs de $I_{CM,mes}$ et $I_{CM,globales}$ ont été significativement réduites, ce qui signifie que les modèles sont moins appropriés à représenter la variabilité spatiale de la face C. Selon le Tableau 1, parmi les modèles étudiés et pour l'ouvrage en question, le modèle Hyvert semble être le plus approprié pour représenter la variabilité spatiale, à l'exception de la face C lorsque l'imprécision numérique du calcul n'est pas

prise en compte. Le modèle de Miragliotta apparaît également pertinent dans sa capacité à transférer la variabilité spatiale pour la face A, mais il est pénalisé pour la face C. Il apparaît que l'effet des conditions d'exposition (face A ou C) combiné à la variabilité spatiale initiale des propriétés du béton, modifie considérablement la variabilité spatiale des processus de détérioration.

Tableau 1 Hiérarchisation des modèles selon $I_{CM,mes}$ et $I_{CM,globales}$

	$I_{CM,mes}$	Classement	$I_{CM,global}$	Classement	$I_{CM,mes}$	Classement	$I_{CM,global}$	Classement
Hyvert [HYV 10]	0.5	1	0.74	1	0.25	3	0.67	1
Papadakis [PAP 91]	0.36	3	0.69	3	0.26	2	0.49	4
Ying-Yu [YIN 87]	0.25	4	0.6	4	0.3	1	0.62	2
Miragliotta [MIR 00]	0.5	2	0.72	2	0.23	4	0.57	3

6. Conclusions

Ce travail s'est centré sur l'évaluation de la capacité des modèles analytiques de carbonatation à faire face à la variabilité spatiale. Les données utilisées sont des mesures de paramètres d'entrée et de sortie des modèles sur un ouvrage réel. Les profils de corrélation de la profondeur de carbonatation obtenus à partir des mesures ou calculés avec les modèles grâce aux données expérimentales ont été établis. Un indice de correspondance incorporant les incertitudes révèle clairement les diverses capacités des modèles à transférer la variabilité spatiale de l'entrée vers la sortie du modèle, par rapport aux mesures expérimentales. Il a été constaté que certains modèles sont plus ou moins appropriés à propager la variabilité spatiale en fonction des conditions d'exposition. Il n'était pas possible d'établir un classement unique à partir des données expérimentales parce que le processus de carbonatation est influencé par des conditions environnementales différentes pour chaque face du mur. La méthodologie proposée a cependant permis de déterminer la capacité des modèles de carbonatation à faire face aux incertitudes et à la variabilité spatiale en fonction de la zone d'exposition. Des données expérimentales plus riches sont nécessaires à des fins de généralisation.

7. Remerciements

Nous tenons vivement à remercier les partenaires du projet ANR-EVADEOS grâce à qui les données utilisées dans cette étude ont été acquises (CEA Saclay, IFSTTAR Nantes, LMA Univ. Aix-en-Provence, I2M Univ. Bordeaux, EDF Chatou, LMDC Univ. Toulouse, GeM Univ. Nantes).

8. Bibliographie

- [LI 04] Y. LI, Effect of spatial variability on maintenance and repair decisions for concrete structures. *Delft, Netherlands: Delft University Press*, 2004.
- [KEN 13] O. KENSHEL AND A. J. O'CONNOR, "Experimental Evaluation of the Scale of Fluctuation for Spatial Variability Modeling of Chloride-Induced Reinforced Concrete Corrosion," Jan. 2013.
- [AFN 14] X.-040-3 AFNOR, "Uncertainty of measurement - Part 3 : guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM : 1995)," Standard NF ISO/CEI GUIDE 98-3, 11 2014.
- [RAV 17] N. R. RAVAHATRA, F. DUPRAT, F. SCHOEFS, T. DE LARRARD, AND E. BASTIDAS-ARTEAGA, "Assessing the Capability of Analytical Carbonation Models to Propagate Uncertainties and Spatial Variability of Reinforced Concrete Structures," *Front. Built Environ.*, vol. 3, 2017.
- [HYV 10] N. HYVERT, A. SELLIER, F. DUPRAT, P. ROUGEAU, AND P. FRANCISCO, "Dependency of C–S–H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 11, pp. 1582–1589, Nov. 2010.
- [PAP 91] V. G. PAPADAKIS, C. G. VAYENAS, AND M. N. FARDIS, "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation," *Mater. J.*, vol. 88, no. 4, pp. 363–373, Jul. 1991.
- [YIN 87] L. YING-UP AND W. QIU-DONG, "Mechanism of Carbonation of Mortars and the Dependence of Carbonation on Pore Structure," *Spec. Publ.*, vol. 100, pp. 1915–1944, Apr. 1987.
- [MIR 00] R. MIRAGLIOTTA, "Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués : prise en compte des effets de paroi," La Rochelle, 2000.