
Méthode de fenêtrage pour l'identification de la corrélation spatiale de grandeurs de durabilité du béton

N. Rakotovao Ravahatra^{1,2}, E. Bastidas-Arteaga², F. Schoefs², T. de Larrard¹, F. Duprat¹

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, France.

² UBL, Université de Nantes, Research Institute in Civil and Mechanical Engineering (GeM), UMR CNRS 6183, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes cedex 3, France

RÉSUMÉ.

Ce travail s'intéresse à la maintenance préventive contre la corrosion des aciers dans les structures en béton armé. La prise en compte de la variabilité spatiale est nécessaire dans une telle étude. Cela requiert une quantité de données élevée. En réalité, les données disponibles sont limitées. Nous proposons une procédure pour améliorer l'identification de la corrélation spatiale à partir d'une seule trajectoire de mesures. Cela se base sur la méthode de fenêtrage et permet d'obtenir la distribution des valeurs du paramètre de la fonction d'autocorrélation. Les données utilisées ont été collectées dans le cadre du projet ANR-EVADEOS. Les paramètres mesurés sont : la porosité, le degré de saturation, la masse volumique et l'épaisseur carbonatée. En guise d'illustration, les résultats pour la porosité et profondeur de carbonatation sont présentés dans cet article.

ABSTRACT.

This paper concerns preventive maintenance strategy against reinforced concrete corrosion. Describing the spatial variability of concrete degradation is of utter importance in such a study. This requires quite high quantity of data. We propose in this study a method to improve spatial correlation characterization using limited quantity of measurements (only one trajectory). It is based on windowing method. We could obtain the distribution of the autocorrelation function parameter when using the proposed method. The data used in this study were collected within the ANR-EVADEOS project for which one of the objectives is to assess spatial variability of concrete degradations. The parameters measured are: porosity, saturation degree, concrete density and carbonation depth. Examples of results are given for porosity and carbonation depth.

MOTS-CLÉS : béton, modèle, carbonatation, corrélation spatiale, maintenance.

KEY WORDS: concrete, model, carbonation, spatial correlation, maintenance

1. Introduction

La prise en compte de la variabilité spatiale a un impact significatif dans l'évaluation de la durée de vie et dans l'optimisation de la maintenance [STE 04]. La caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés physiques du béton nécessite de nombreuses mesures en différents points de la surface du béton. En pratique, la quantité de mesures est limitée, en raison des coûts d'inspection élevés. L'amélioration des procédures d'exploitation, afin d'obtenir autant d'informations que possible à partir des mesures collectées, constitue un défi important pour la caractérisation de la variabilité spatiale.

D'autre part, l'utilisation de modèles de dégradation est essentielle pour optimiser la formulation des stratégies de maintenance. Les modèles doivent également pouvoir appréhender la variabilité spatiale des paramètres du modèle. Cette question a récemment été abordée par [RAK 17] qui proposaient une méthodologie pour classer les modèles de dégradation en fonction de leurs capacités à propager la variabilité spatiale. Ces résultats peuvent être améliorés en définissant les paramètres d'entrée comme des champs aléatoires ainsi que par la prise en compte de l'incertitude dans l'identification du paramètre de corrélation spatiale.

L'objectif de cet article est de proposer une nouvelle méthode de fenêtrage pour améliorer l'identification de la corrélation spatiale des paramètres du modèle ou des propriétés physiques du béton. La méthodologie proposée est appliquée à une base de données collectée lors d'une des campagnes expérimentales du projet ANR-EVADEOS. Les données concernent des essais destructifs réalisés sur un mur en béton armé. Les paramètres mesurés sont : la porosité, le degré de saturation, la densité du béton et la profondeur de carbonatation. Cette étude se concentrera uniquement sur le phénomène de carbonatation du béton.

L'article est organisé comme suit : la description de la structure étudiée et des données utilisées dans ce travail est présentée dans la section 2 ; la méthode de fenêtrage proposée est présentée dans la section 3.

2. Les données utilisées

Nous étudions un mur en béton armé construit en 1979 clôturant un site de traitement de déchets inertes [3]. La partie du mur étudiée est orientée Est-Ouest et mesure 3,5m de longueur (figure 1). 21 mesures successives ont été effectuées le long d'une seule ligne horizontale située à 1,5 m du sol. Ces mesures sont localisées entre des mailles d'armatures avec une distance constante de 16 cm entre mesures.

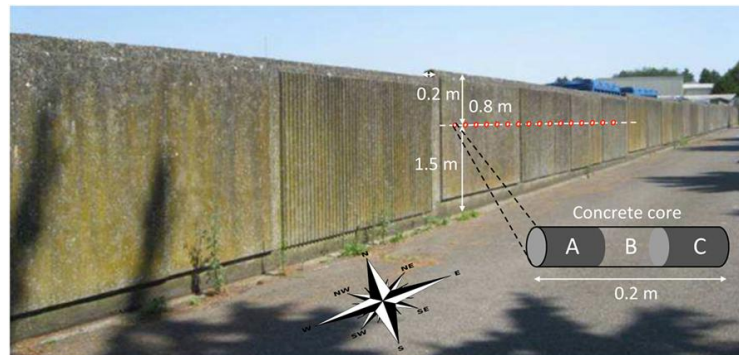


Figure 1 Photo du mur étudié

Les carottes ont été extraites selon la norme [BSE 07], et la porosité, le degré de saturation et la densité du béton ont été déterminés en suivant les procédures décrites dans la norme [NFP 18]. Les distances de la ligne de mesure au sol (1,5 m) et au sommet (0,8 m) ont été sélectionnées de manière à éviter les effets de bord. La profondeur de carbonatation a été mesurée à partir de carottes extraites immédiatement placées dans des sacs en plastique scellés, et les mesures ont été effectuées en laboratoire. Il a été constaté que les conditions d'exposition après 35 ans de chaque côté du mur sont assez différentes : du côté sud, le séchage est plus rapide ce qui pourrait favoriser la carbonatation. La valeur moyenne de la profondeur de carbonatation est de 1,87 cm pour le côté nord (côté A) et de 2,23 cm pour le côté sud (côté C). Compte tenu de ces différences, il a été décidé d'analyser séparément les mesures obtenues sur chaque face. Les **Figure 2** et **Figure 3** montrent les valeurs mesurées de la porosité, et de la profondeur de carbonatation pour les deux côtés exposés de la paroi (côtés A et C). On observe qu'il existe une variabilité spatiale significative et que les valeurs sont différentes d'un côté à l'autre.

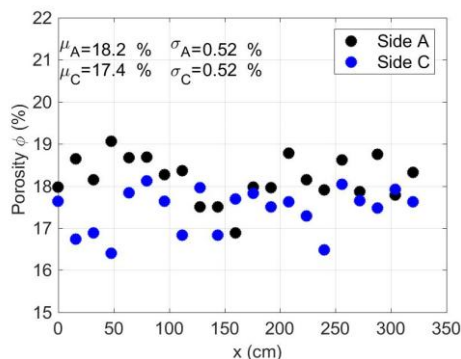


Figure 2 Trajectoire des mesures de porosité

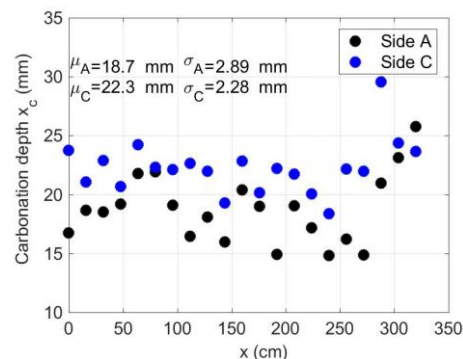


Figure 3 Trajectoire des mesures de carbonatation

3. Caractérisation de la corrélation spatiale

Dans cette section, nous décrivons la méthode de fenêtrage proposée pour identifier la fonction d'autocorrélation.

3.1. Autocorrélation observée

Pour un champ aléatoire unidimensionnel et stationnaire X , la fonction d'autocorrélation empirique discrète est définie comme les valeurs successives du coefficient d'autocorrélation par rapport à la distance Δx entre les points :

$$\rho_D(\Delta x) = \frac{\sum_{i=1}^m [(X(x_i) - m_X)(X(x_i + \Delta x) - m_X)]}{ms_X^2} \quad [1]$$

où m_X et S_X sont, respectivement, la moyenne et l'écart-type de X estimés à partir de valeurs indépendantes et m est le nombre de points à une distance Δx l'un de l'autre. Une telle fonction d'autocorrélation discrète empirique peut être modélisée en utilisant une fonction d'autocorrélation continue. Ces fonctions sont caractérisées par l'échelle de fluctuation θ . L'identification de l'autocorrélation d'une propriété physique donnée consiste à déterminer le type de fonction d'autocorrélation approprié et à estimer l'échelle de fluctuation correspondante. À titre d'illustration, nous considérons dans ce travail la fonction d'autocorrélation exponentielle, généralement utilisée pour représenter la variabilité spatiale des propriétés du béton ou des indicateurs de

durabilité [11, 24, 25] : $\rho(\Delta x) = \exp\left(-\frac{|\Delta x|}{b}\right)$. Avec $\theta = 2b$. La méthode MLE sera utilisée pour identifier la valeur du paramètre de corrélation (b) à partir de données expérimentales.

3.2. Méthode de fenêtrage

L'application de la procédure MLE à une seule trajectoire ne fournira qu'une seule valeur de b (de la fonction d'autocorrélation). Par conséquent, la valeur réelle de b pourrait être sur ou sous-estimée. Afin d'améliorer l'évaluation de b et d'estimer l'incertitude correspondante, la méthode proposée discrétise la trajectoire en plusieurs fenêtres où une seule valeur de b est estimée. La méthode de fenêtrage est résumée en trois étapes :

1. définition de la fenêtre : on considère une fenêtre avec un nombre initial de mesures successives n_w à partir de laquelle nous identifions une valeur de b en utilisant la méthode MLE. n_w est donc inférieur au nombre total de mesures N .
2. fenêtrage : on décale la fenêtre le long de la trajectoire, et pour chaque position, nous identifions une nouvelle valeur de b . La Figure 4 montre les positions d'une fenêtre contenant $n_w = 4$ mesures.
3. Augmentation de la taille de la fenêtre : on considère une fenêtre plus grande avec $n_w + 1$ mesures et on répète les étapes 1 et 2. On augmente la longueur de la fenêtre et répétons les étapes 1 et 2 jusqu'à ce que toutes les mesures soient prises en compte ($n_w = N$)

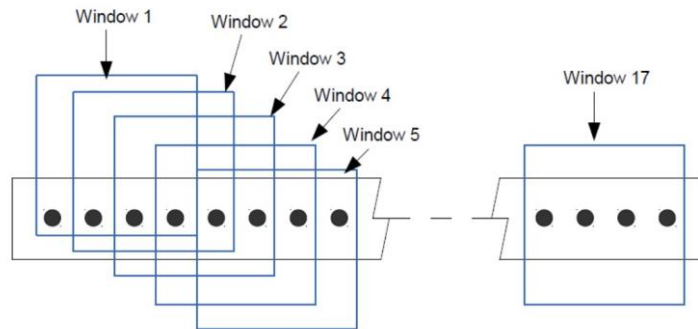


Figure 4 Différentes positions d'une fenêtre à 4 mesures

3.3. Résultats et discussions

Les **Figure 5** et **Figure 6** représentent les résultats de l'identification de b pour la porosité et la carbonatation pour les deux côtés (A et C) du mur. Des différences peuvent être observées pour les deux côtés du mur. Une des raisons est que les valeurs mesurées sont déjà différentes pour les deux côtés (**Figure 2** et **Figure 3**). En particulier, les valeurs moyennes pour la porosité sont plus faibles, et la profondeur de carbonatation est plus élevée pour le côté C. Ceci est en accord avec le processus de carbonatation. En effet, la porosité diminue lorsque la profondeur de carbonatation avance. En conséquence, les valeurs identifiées de b pour la porosité sont assez faibles pour le côté C, tandis que celles pour la profondeur de carbonatation sont plus élevées. En effet, il est plus difficile de détecter de la corrélation spatiale lorsque les valeurs sont faibles et dispersées. La valeur de b évolue donc en fonction de la carbonatation. On pourrait ainsi supposer que cela évolue aussi en fonction du temps. Néanmoins, il faudrait davantage de données pour confirmer cette hypothèse.

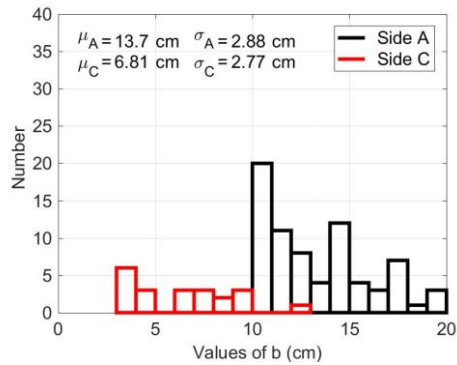


Figure 5 Distribution de b pour la porosité

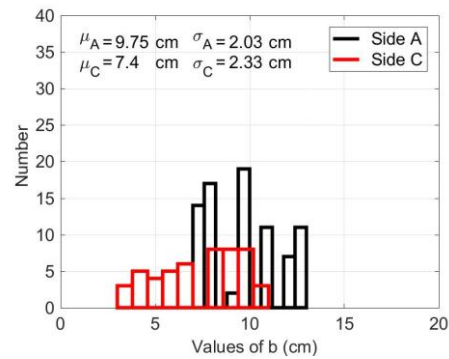


Figure 6 Distribution de b pour la carbonatation

4. Conclusions

Ce travail a proposé une méthodologie améliorée pour exploiter les données collectées. Plus précisément, nous avons proposé une méthode de fenêtrage pour l'identification de la corrélation spatiale des propriétés physiques du béton. En guise d'illustration, les plages de valeurs, ainsi que leur distribution, du paramètre b de la fonction d'autocorrélation exponentielle sont présentées pour la porosité et la profondeur de carbonatation. Les résultats laissent supposer que le paramètre b , et donc la variabilité spatiale, est fonction du temps pour les grandeurs liées à la carbonatation du béton. Néanmoins, pour confirmer cette hypothèse, davantage de données sont nécessaires.

La méthode de fenêtrage proposée pourrait être un outil supplémentaire pertinent pour les professionnels du diagnostic dans les structures en béton. Les résultats de cet article pourraient être utiles dans l'exploitation des données.

5. Bibliographie

[BSE 07] BS EN 13791. Assessment of in-Situ Compressive Strength in Structures and Pre-Cast Concrete Components 2017. <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030018199>, accessed February 6, 2017.

[NFP 18] NFP 18 459. Concrete - Testing Hardened Concrete. SAI Global N.d. <https://infostore.saiglobal.com/en-gb/standards/nfp-18-459-2008-1026155/>, accessed April 20, 2018.

[RAK 17] Rakotovo Ravahatra, Ndriana, Frédéric Duprat, Franck Schoefs, Thomas de Larrard, and Emilio Bastidas-Arteaga. Assessing the Capability of Analytical Carbonation Models to Propagate Uncertainties and Spatial Variability of Reinforced Concrete Structures. *Frontiers in Built Environment* 3. <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fbuil.2017.00001/abstract>, accessed February 6, 2017.

[STE 04] Stewart, Mark G. Spatial Variability of Pitting Corrosion and Its Influence on Structural Fragility and Reliability of RC Beams in Flexure. *Structural Safety* 26(4): 453–470, 2004.