

Intégration de la variabilité spatiale pour une meilleure évaluation non-destructive du béton

Wafaa Abdallah^{1,2}, Zoubir Mehdi Sbartai¹, Jacqueline Saliba¹, Sidi Mohammed Elachachi¹, Fadi Hage Chehade², Marwan Sadek².

¹ I2M, UMR 5295, CNRS, Université de Bordeaux, Talence, France.

² EDST, Université Libanaise, Beyrouth, Liban.

RESUME L'étude de la variabilité spatiale des propriétés constitue un grand intérêt pour un meilleur diagnostic des ouvrages en béton armé. Les méthodes de contrôle non destructif (CND) permettent d'évaluer les propriétés du béton en se basant sur des modèles de conversion. Dans ce travail, trois modèles de conversion reliant trois observables CND (la vitesse des ondes ultrasonores, la résistivité électrique et la permittivité) avec deux propriétés physiques du béton (la porosité et le degré de saturation) ont été considérés. Une approche numérique permettant la calibration et l'inversion de ces modèles en prenant en compte la variabilité spatiale a été proposée et validée.

Mots-clefs variabilité spatiale, END, inversion, modèles.

ABSTRACT The study of the spatial variability of properties is of great interest for a better diagnosis of reinforced concrete structures. Non-destructive testing (NDT) methods assess the concrete properties based on conversion models. In this work, three conversion models linking three NDT observables (the ultrasonic pulse velocity, the electrical resistivity, and the dielectric permittivity) with two physical concrete properties (porosity and saturation rate) were considered. A numerical approach allowing the calibration and the inversion of these models by taking into account the spatial variability was proposed and validated.

Keywords Spatial variability, NDE, inversion, models.

I. INTRODUCTION

Un des enjeux majeurs des gestionnaires des ouvrages est la fiabilisation du CND et la détermination de la variabilité spatiale des propriétés du béton [1]. Une des limitations actuelles de l'évaluation des ouvrages par le CND concerne le fait que les mesures sont considérées comme indépendantes. Cependant, la fiabilité des stratégies d'inspection des structures peut être influencée par la structuration spatiale de ces mesures qui peuvent être dépendantes [2]. La quantification de la variabilité spatiale est basée sur l'évaluation de la dépendance des mesures à différentes distances, y-compris une distance spécifique appelée longueur de corrélation. C'est la distance à partir de laquelle les valeurs évaluées ne sont plus corrélées [2].

L'objectif de ce travail est de proposer une méthode d'inversion des modèles de conversion reliant des observables CND avec des propriétés du béton. L'effet des longueurs de corrélation des propriétés du béton avant et par inversion à partir de la variabilité spatiale des observables CND a été également étudié.

II. MODELES DE CONVERSION

Trois modèles de conversion ont été considérés pour évaluer la porosité (Φ) et le degré de saturation (S_r) à partir de la permittivité, la résistivité électrique et la vitesse des ondes ultrasonores.

Un modèle de mélange permettant de calculer la permittivité (ϵ) d'un matériau multiphasique a été considéré. Le modèle volumique d'indice de réfraction complexe (CRIM [3]) est représenté par l'équation (1) :

$$\sqrt{\epsilon_{(\text{béton})}} = (1 - \Phi) * \sqrt{\epsilon_{(\text{solide})}} + \Phi * S_r * \sqrt{\epsilon_{(\text{eau})}} + \Phi * (1 - S_r) * \sqrt{\epsilon_{(\text{air})}} \quad (1)$$

Où $\epsilon_{(\text{béton})}$ est la permittivité du mélange (sans unité) qui peut être mesurée par méthode capacitive ou radar, $\epsilon_{(\text{solide})}$ la permittivité de la phase solide (granulats et pâte), $\epsilon_{(\text{air})}$ la permittivité de la phase gazeuse et $\epsilon_{(\text{eau})}$ la permittivité de la phase liquide. Ces derniers paramètres valent respectivement 5, 1 et 75 [3].

La loi d'Archie reliant la résistivité électrique du béton ρ à la porosité Φ et au degré de saturation S_r [4] a été utilisée :

$$\rho = a * \rho_w * \Phi^{-m} * S_r^{-n} \quad (2)$$

où ρ_w est la résistivité de l'eau interstitielle prise égale à 0,4 $\Omega.m$ [5], a [0,5-2,5], m [1,3-2,5] et $n \approx 2,5$ sont des constantes dépendantes du matériau. Les valeurs retenues pour les calculs sont $a = 1,5$ et $m = 2,2$. Pour illustrer lisiblement ces deux modèles trouvés dans la littérature, les deux figures (1) et (2) montrent respectivement l'évolution de la permittivité (équations (1)) et de la résistivité (équation (2)) en fonction du degré de saturation pour différentes valeurs de porosité [12,5 -18%].

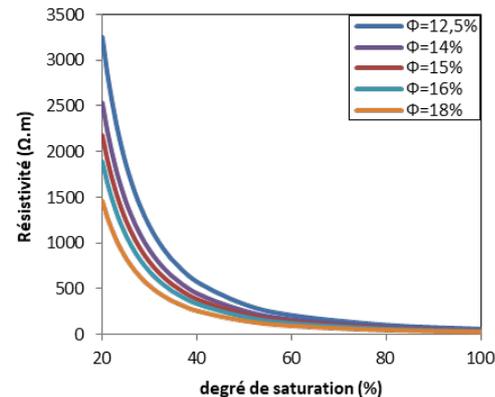
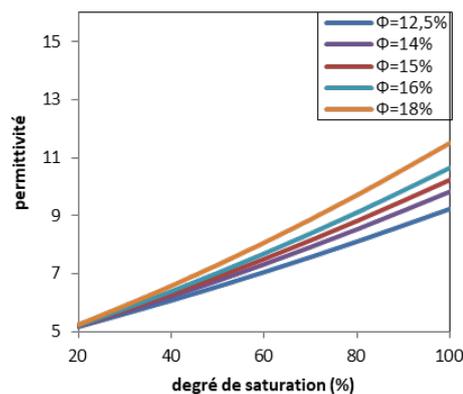


FIGURE 1. Evolution la permittivité (équation (1)) en fonction du degré de saturation

FIGURE 2. Evolution de la résistivité (équation (2)) en fonction du degré de saturation

Le troisième modèle permet de prendre en compte l'influence de la nature des composantes du béton (granulats et pâte) sur la vitesse des ondes ultrasonores US :

$$\sqrt{V_{(\text{béton})}} = f_{\text{granulats}} * \sqrt{V_{(\text{granulats})}} + (1 - f_{\text{granulats}} - \Phi) * \sqrt{V_{(s)}} + \Phi * S_r * \sqrt{V_{(\text{eau})}} + \Phi * (1 - S_r) * \sqrt{V_{(\text{air})}} \quad (3)$$

où $V_{(\text{béton})}$, $V_{(\text{granulats})}$, $V_{(s)}$, $V_{(\text{eau})}$ et $V_{(\text{air})}$ sont les vitesses des ondes ultrasonores du béton, des granulats, de la phase solide de la pâte, de l'eau et de l'air respectivement. $f_{\text{granulats}}$ est la fraction

volumique des granulats dans le mélange considérée ici égale à 75%. Les valeurs de $V_{(eau)}$ et $V_{(air)}$ sont respectivement égales à 1500 et 350 m/s . La vitesse des ondes ultrasonores dans les granulats $V_{(granulats)}$ est calculée en minimisant l'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs modales (en utilisant le modèle proposé dans le cadre du projet C2D2 – ACDC [3]) de la vitesse des ondes ultrasonores dans la pâte contenant de l'eau et de l'air $V_{(pâtetotale)}$. Les valeurs modales de cette vitesse sont en fonction de $V_{(granulats)}$ et suite à cette minimisation, la valeur identifiée de $V_{(granulats)}$ est de l'ordre de 5200 m/s. La comparaison entre l'évolution de la vitesse ultrasonore dans la pâte $V_{(pâtetotale)}$ obtenue expérimentalement et par le modèle [3] en fonction de la porosité [12,5 - 18%] présente une corrélation acceptable dans les deux cas de degré de saturation : sec et saturé (figure (3)).

La minimisation de l'erreur quadratique moyenne EQM par rapport à la vitesse ultrasonore dans la phase solide de la pâte $V_{(s)}$ permet d'identifier la meilleure valeur de cette vitesse. L'équation (6) regroupe les valeurs expérimentales et empiriques (équation (3)) de la vitesse ultrasonore dans le béton. Dans cette équation, la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton $V_{(bétonexp)}$ a été mesurée expérimentalement dans le cadre du projet SENSO pour une porosité entre 12,5 et 18% [6].

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{(bétonexp)} - V_{(bétonmodèle)})^2}{n}} \quad (6)$$

Comme résultat, $V_{(s)}$ est de l'ordre de 5779 m/s avec une erreur quadratique moyenne de 271 m/s. Ce qui est attendu est que cette valeur est proche de celle de la vitesse dans les granulats. La surface de réponse de la vitesse ultrasonore du béton obtenu par le modèle proposé (équation (3)) est représentée en fonction du degré de saturation [20 -100%] et de la porosité [12,5 - 18%] sur la figure (4).

III. EVALUATION DE L'EFFET DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PROPRIETES DU BETON

A. Approche numérique

L'inversion des relations empiriques (équation (1), (2) et (3)) avec comme entrées les mesures CND pour identifier Φ et S_r peut permettre d'intégrer l'effet de la variabilité du béton. Dans le cas de cette étude nous présentons l'effet de la variabilité spatiale sur le processus d'inversion. Les étapes de l'approche adoptée pour vérifier la méthode d'inversion sont présentées dans la figure (5). Dans la dernière étape, le calcul d'erreur signifie le calcul des écarts entre les moyennes, les écart-types et les longueurs de corrélations de (Φ et S_r) obtenues avant la réduction du nombre des éléments de maillage et après inversion avec un nombre réduit (NR). Par exemple, l'erreur sur la moyenne de la porosité est égale à $\frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\mu_1}$ où μ_1 est la moyenne avant inversion et μ_2 la moyenne après inversion. L'approche consiste aussi à étudier l'effet de la réduction du nombre des éléments de maillage (effet du nombre de mesures). Deux cas sont étudiés, ils représentent la réduction à moitié et au quart du nombre initial des points de maillage (respectivement NR=250 et NR=125 parmi 500 points générés avec le maillage initial).

B. Analyse des résultats numériques

La figure 6a présente la distribution cumulative de la porosité avant la réduction du nombre des points de maillage et après inversion avec un nombre réduit (cas où NR=250 et NR=125 parmi 500 points du maillage initial). Les résultats montrent une bonne concordance entre les distributions avant et après inversion avec un nombre plus réduit concernant l'évaluation de la porosité. La corrélation spatiale de la porosité a été aussi évaluée avant et après inversion à l'aide du variogramme, ajusté par

un modèle gaussien (figure 6b). La même analyse a été réalisée pour le degré de saturation. Le tableau (1) présente les erreurs sur les valeurs de la moyenne, de l'écart-type et de la longueur de corrélation de Φ et S_r obtenues avant la réduction des points de maillage et après inversion sur ce nombre réduit (NR=250 ou NR=125). Les erreurs calculées sont acceptables. Une légère différence dans les deux cas de réduction du nombre des éléments de maillage est remarquée alors que selon les valeurs des erreurs (tableau (1)), ces résultats indiquent que la méthodologie adaptée peut être utilisée comme un simulateur pour évaluer les propriétés du béton ainsi que leurs variabilités et doit être validée sur une étude plus large pour une utilisation in situ.

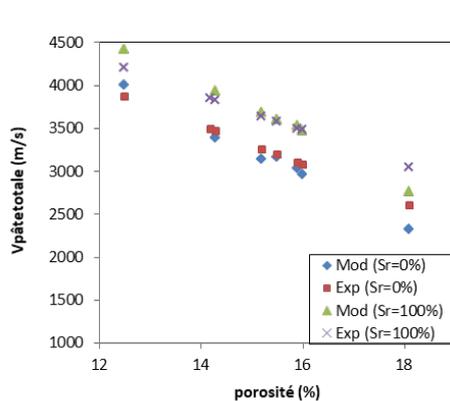


FIGURE 3. Evolution de la vitesse US dans la pâte totale en fonction de la porosité dans deux cas: sec et saturé
Modèle [3] Vs Expérience [3]

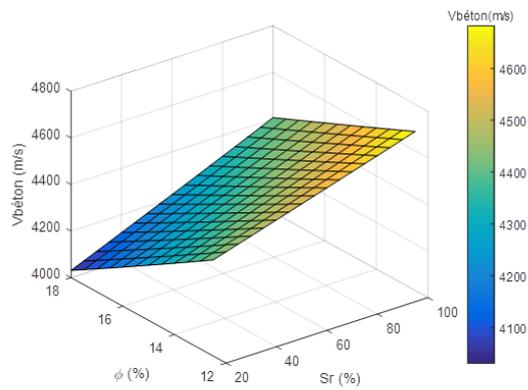


FIGURE 4. Evolution de la vitesse US dans le béton (Modèle d'équation (3)) en fonction du degré de saturation

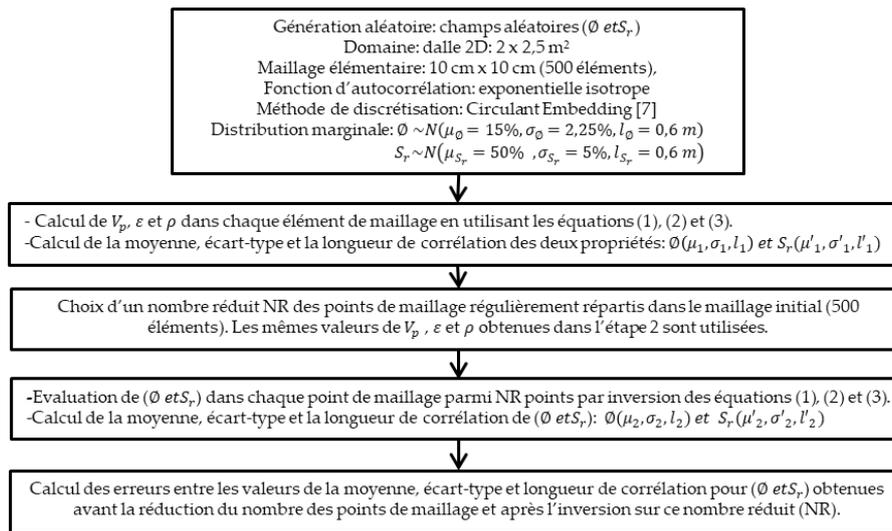


FIGURE 5. Diagramme des étapes adaptées dans l'approche numérique

TABLEAU 1. Erreur sur la moyenne, l'écart-type et la longueur de corrélation de la porosité et du degré de saturation

Erreur (%)	μ		σ		l	
	250	125	250	125	250	125
NR	250	125	250	125	250	125
Φ	0,76	1,07	0,56	2,98	14,73	1,29
S_r	0,33	1,73	6,21	5,89	2,66	27,28

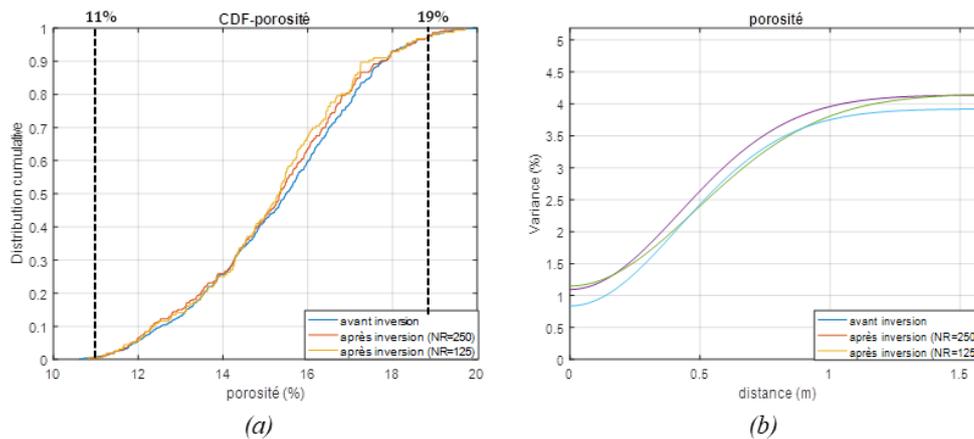


FIGURE 6. Distribution cumulative (a) et Variogramme (b) de la porosité avant et après inversion

IV. CONCLUSION

Trois modèles de conversion multiphasiques reliant les observables CND (vitesse ultrasonore, permittivité et résistivité électrique)   la porosité et au degré de saturation du béton ont été proposés dans cette étude. L'inversion de ces modèles a été proposée en prenant en compte la variabilité spatiale des propriétés du béton. Les longueurs de corrélation des propriétés du béton identifiées peuvent être utilisées pour fiabiliser les stratégies d'inspection, de manière à choisir les emplacements des mesures CND statistiquement indépendants. Cette même démarche sera adoptée dans une prochaine étude pour étudier l'effet du bruit des mesures CND sur l'évaluation de ces deux propriétés du béton avec leurs variabilités et étendue sur d'autres propriétés.

REFERENCES

- [1] D. Breyse. (2013). Evaluation non-destructive en place du béton : un problème usuellement mal posé, *21st French Congress of Mechanics*.
- [2] N. T. Nguyen, Z.M. Sbart i, J.-F. Lataste, D. Breyse, & F. Bos. (2013). Non-destructive evaluation of the spatial variability of reinforced concrete structure, *21 me Congrès Français de Mécanique*,6(1),6p.<https://doi.org/10.1051/meca/2014064>
- [3] Analyse et Capitalisation pour le Diagnostic des Constructions, Rapport final, projet C2D2 – ACDC, Mai 2012
- [4] G. Archie. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir Characteristics, *Transaction of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*,146(1),54–62.<https://doi.org/10.2118/942054-G>
- [5] P. Glover. Resistivity Theory, *Petrophysics MSc Course Notes, chapter 17*, 198-217
- [6] J.P.Balayssac, S.Laurens, G.Arliguie, D.Breyse, V.Garnier, X.D robert, B.Piwakowski. (2012). Description of the general outlines of the French project SENSO – Quality assessment and limits of different NDT methods. *Construction and Building Materials*,35, 131-138
- [7] H.X. Dang, B. Sudret, B. Berveiller. (2011). Benchmark of random fields simulation methods and links with identification methods. In: M. Faber, J. K hler, et K. Nishijima (Eds.), *Proc. 11th. Int. Conf. on Applications of Stat. and Prob. in Civil Engineering (ICASP11)*.