

Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

DÉTERMINATION DU PROFIL DE TENEUR EN EAU DANS LE BÉTON D'ENROBAGE PAR INVERSION DE MESURES DE PERMITTIVITÉ AU MOYEN DE SONDES CAPACITIVES

DETERMINATION OF WATER CONTENT PROFILES IN CONCRETE USING THE INVERSION OF PERMITTIVITY MEASUREMENTS BY CAPACITIVE PROBE

Milia FARES^(a*), Yannick FARGIER^(b), Géraldine VILLAIN^(a), Xavier DÉROBERT^(a), Odile COFFEC^(a),
Sérgio PALMA LOPES^(a)

a. IFSTTAR Nantes LUNAM Université, 44344 Bouguenais

b. CEREMA, DTer NC, Laboratoire Régional de Blois, 41029 Blois

* auteur correspondant : milia.fares@ifsttar.fr

RÉSUMÉ

Les indicateurs de durabilité du béton constituent un outil très important pour les maîtres d'ouvrages. Ils permettent le suivi dans le temps de l'état d'une structure et aident à la planification de sa maintenance. Parmi ces indicateurs, nous allons nous intéresser à la teneur en eau, paramètre qui conditionne la pénétration des agents agressifs dans le béton d'enrobage et la corrosion des armatures, pour les structures en béton armé. Notre but est de déterminer la teneur en eau du béton en fonction de la profondeur. Pour ce faire, nous utilisons des sondes capacitatives sensibles à la permittivité diélectrique du matériau ausculté. Elles comprennent notamment des plaques métalliques qui forment, avec le matériau ausculté, un condensateur. Nous disposons de trois types de patins d'électrodes qui, suivant la taille et l'espacement des plaques métalliques utilisées, sont sensibles à des profondeurs d'investigation différentes. Toutefois, ces mesures étant intégrantes, une inversion est nécessaire pour obtenir un profil de permittivité en

fonction de la profondeur. Ainsi, après avoir présenté la méthodologie d'inversion, nous l'appliquerons à une campagne expérimentale d'imbibition d'eau sur deux bétons différents. Ces résultats tendent à montrer la grande sensibilité et la pertinence de la méthode capacitive à la détection de la teneur en eau dans les bétons.

ABSTRACT

The assessment of durability indicators is an important task for civil engineers. The indicators are used to monitor the health condition of reinforced concrete structures and to plan the maintenance. When it comes to the penetration of aggressive chemicals in cover concrete, the water content plays an important role. Therefore, in this study, we present a methodology to obtain the water content profiles versus the depth in the concrete structure. To this aim, capacitive probes are used, known for their sensitivity to the dielectric permittivity of the tested material. The

capacitive probes are composed of metallic plates forming a capacitor with the tested material. Three different types of plates are applied for different investigation depths depending on the spacing between the plates and their size. Since each measurement integrates a certain volume of the material, an inversion procedure is needed in order to obtain the profiles of permittivity. First, the inversion methodology that we have developed is presented, and then it is applied to an experimental campaign of water imbibition on two different concrete formulations. The results show high sensitivity and accuracy of the capacitive technique to detect water content in concrete.

Mots-clés : durabilité, CND, béton armé, gradient, profil, permittivité diélectrique.

* * *

1. INTRODUCTION

Lors de la conception des ouvrages en béton armé, il est important de considérer la durabilité du matériau pour des raisons économiques et environnementales. Un des principaux rôles du béton est de protéger les armatures de la corrosion, grâce à son pH élevé (≈ 13). Cette fonction protectrice peut être perturbée par la pénétration des agents agressifs dans le béton (comme les chlorures ou le dioxyde de carbone), phénomènes conditionnés par la teneur en eau [1]. C'est pour cette raison qu'on s'intéresse à ce paramètre. Notre but est d'obtenir un profil de teneur en eau en fonction de la profondeur. Pour ce faire, nous étudions une méthode d'auscultation non-destructive, des sondes capacitatives qui s'appliquent à la surface du matériau [2]. L'avantage des méthodes non-destructives est qu'elles permettent d'ausculter une grande surface, nous renseignant ainsi sur sa variabilité et qu'elles permettent un suivi dans le temps de l'état de l'ouvrage. L'avantage des sondes capacitatives est qu'on ausculte différentes profondeurs d'investigation grâce à différents patins. L'inconvénient est que les mesures sont intégrantes de la surface jusqu'à une certaine profondeur [3]. Une inversion est donc nécessaire : elle est développée dans cet article. Nous présentons tout d'abord en détail le dispositif de mesure et les relations théoriques qui gouvernent les phénomènes phy-

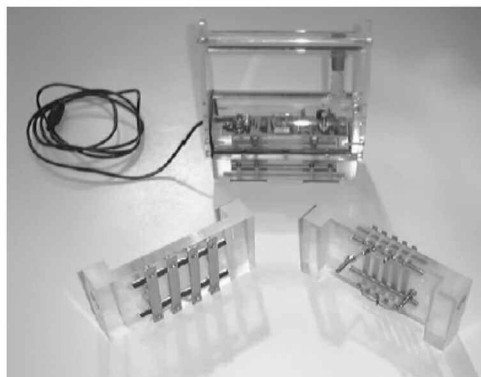


Figure 1 : Sondes capacitatives (3 types de patins) [2]

siques, ensuite nous explicitons la procédure d'inversion que nous avons développée sous environnement Matlab® et en utilisant un logiciel de simulation numérique en éléments finis (COMSOL Multiphysics®). Afin de valider ces travaux, la méthodologie précédente est appliquée à une campagne expérimentale d'imbibition d'eau sur deux bétons différents. Les profils de permittivité obtenus sont ensuite transformés en profils de teneur en eau grâce à des courbes de calibration. Enfin, les résultats sont comparés aux profils de teneur en eau obtenus par gammadensimétrie, méthode déjà validée et éprouvée [5], qui sert de référence.

2. SONDES CAPACITIVES

La technique capacitive est utilisée pour déterminer la teneur en eau pour des matériaux comme les sols ou le béton [2], [4]. En effet, la capacité mesurée dépend entre autres de la partie réelle ϵ_r' de la permittivité diélectrique relative du matériau qui dépend fortement de la teneur en eau. A basses fréquences, cette permittivité relative est de l'ordre de 4-6 pour un béton sec et de 15-25 pour un béton saturé.

Les sondes capacitatives, utilisées pour cette présente étude, sont constituées de plaques métalliques reliées à un circuit oscillant fonctionnant à une fréquence voisine de 33 MHz. Nous disposons de 3 types de patins (PE, ME, GE) composés des plaques et d'un support en Plexiglas (Figure 1). Ces patins diffèrent suivant l'espacement entre les plaques, leur taille et leur nombre. Cette différence implique une profondeur d'investigation différente pour chaque patin, celle du patin PE étant la plus petite (3-5 mm), et celle du patin GE la plus grande (6-7cm) [2], [3]. Ils sont posés à la surface du matériau à ausculter et forment avec celui-ci un condensateur. La grandeur mesurée est la fréquence d'oscillation f_{osc} du circuit qui est liée à la capacité C . Afin d'éliminer l'effet du support, de la température et de l'humidité relative ambiantes, nous réalisons une mesure différentielle dans l'air et sur le matériau. Des mesures de permittivité relative sur six matériaux étalons de permittivité connue permet d'obtenir une droite d'étalonnage par régression linéaire entre $(\Delta(1/f^2)) = \ll 1/f_{osc_matériau}^2 - 1/f_{osc_air}^2 \gg$ et ϵ_r' pour chaque type de patin (Figure 2).

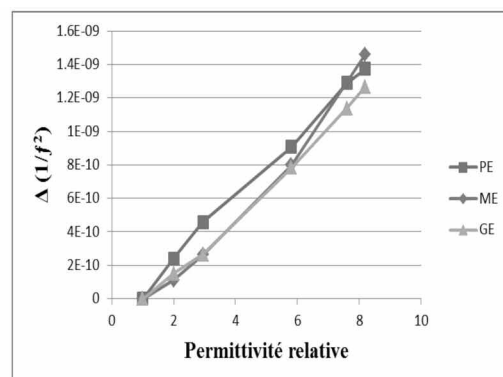


Figure 2 : Etalonnage des sondes capacitatives [6]
Mesures sur matériaux

3. TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Dans cette partie, nous présentons le problème direct ainsi que le problème inverse. En effet, considérons un milieu caractérisé par un profil de permittivité. Le problème direct consiste à calculer la capacité de chacun des condensateurs en fonction du profil de permittivité. Le problème inverse consiste lui à remonter au profil de permittivité à partir de plusieurs mesures de capacités qui correspondent à plusieurs condensateurs [7], [8].

3.1. Problème direct

3.1.1. Equations fondamentales

L'hypothèse du régime électrostatique est adoptée et la distribution du potentiel électrique ϕ en chaque point du milieu est décrite par l'équation de Poisson. Pour calculer la capacité du condensateur équivalent de notre système, nous utilisons sa relation avec l'énergie électrostatique W_c stockée dans le milieu (4) où U est la différence de potentiel entre les plaques [9]. Le potentiel U étant imposé et la modélisation numérique permettant de calculer W_c [10] le calcul de la capacité C est alors direct.

$$W_c = \frac{1}{2} CU^2 \quad (4)$$

3.1.2. Modélisation numérique sous Comsol

Le problème direct a été modélisé en 3D sous Comsol Multiphysics®, logiciel de modélisation par éléments finis [10]. Le domaine Ω se compose du matériau ausculté entouré d'air. La figure 3 illustre le domaine ainsi que les conditions aux limites attribuées, décrivant un bloc de

matériau composé de multicouches sur lequel sont posées des plaques métalliques (éléments d'électrode).

3.2. Problème inverse

Le problème inverse consiste à déterminer le profil de permittivité à partir de plusieurs mesures de capacité. La résolution du problème inverse est réalisée grâce à un code intitulé CAPEX, spécialement conçu pour cette étude, sous le logiciel Matlab® en lien avec Comsol Multiphysics®.

3.2.1. Méthode d'inversion

Le principe du calcul est d'ajuster les paramètres \mathbf{m} (qui décrivent le profil de permittivité) du modèle pour que les capacités calculées se rapprochent au mieux des capacités mesurées. Pratiquement, on minimise une fonction objectif qui est fonction de l'écart (\mathbf{e}) entre les données calculées et les données mesurées [7], [8]. Il existe plusieurs méthodes d'inversion. Nous choisissons la méthode de Gauss-Newton avec modification de Levenberg Marquardt. La méthode de Gauss-Newton implique une minimisation aux moindres carrées. La modification de Levenberg Marquardt consiste à ajouter un paramètre de régularisation λ qui rend la solution plus stable [8]. La relation entre les paramètres du modèle et les réponses du système n'étant pas linéaire, le problème est linéarisé et le calcul se fait par itérations : à chaque pas on applique une modification $\delta \mathbf{m}$ aux paramètres permettant de rapprocher les données calculées des données mesurées. L'équation prend alors la forme suivante :

$$\delta \mathbf{m} = (\mathbf{J}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (5)$$

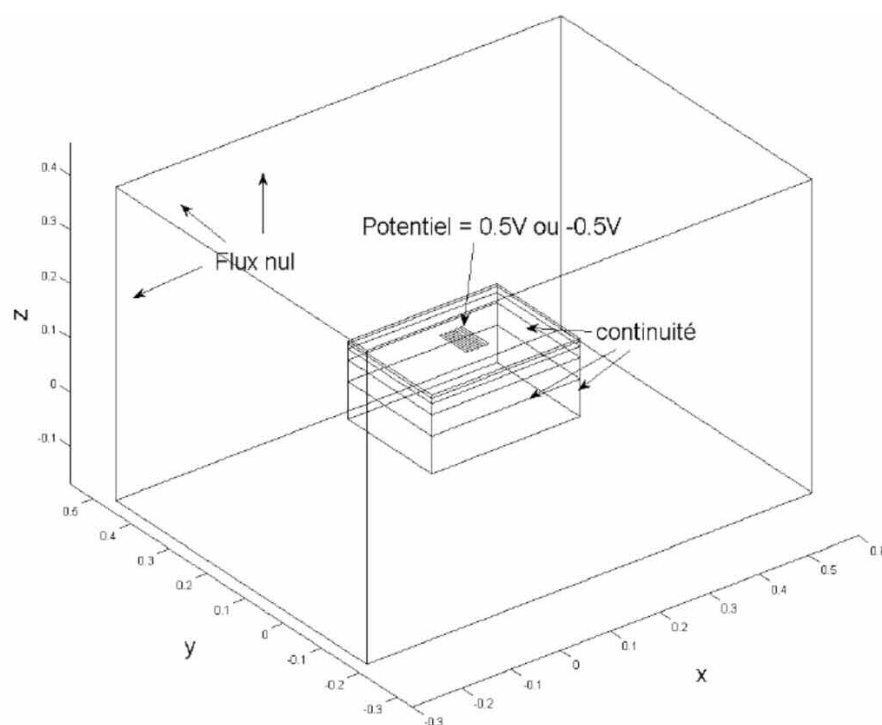


Figure 3 : Modélisation du domaine physique sous Comsol

où \mathbf{W} est la matrice des erreurs sur les mesures et \mathbf{J} la matrice des sensibilités qu'on choisit de calculer par la méthode des perturbations [11], et \mathbf{I} une matrice identité.

3.2.2. Choix de paramétrisation du modèle

La distribution des paramètres dans l'espace peut être présentée sous deux formes : distribution continue $\varepsilon(x, y, z)$ ou distribution discrète [7]. Nous avons choisi une distribution discrète : une superposition de couches homogènes et parallèles à la surface du béton. Les mesures étant surtout sensibles aux premières couches, nous augmentons l'épaisseur des couches avec la profondeur. Nous avons retenu en première approche un nombre de 10 couches pour représenter au mieux un gradient réel, sachant qu'ainsi le modèle est sous-déterminé.

4. ETUDE DE CAS

Afin d'étudier la méthodologie d'inversion, nous l'avons testée sur des données synthétiques (profils avec gradients raides (front) et moins raides, linéaires) et des données réelles qui correspondent à des essais d'imbibition d'eau sur deux bétons différents. Ces résultats nous renseignent sur la pertinence de la méthodologie adoptée et ses limites.

4.2. Données synthétiques

4.1.1. Profil « raide »

Nous avons étudié 6 milieux synthétiques dont l'épaisseur de la couche surfacique croît. La Figure 4 montre les 6 milieux synthétiques (traits pleins) et les 6 inversions correspondantes (en pointillés). Le modèle synthétique choisi est formé de deux couches de permittivités relatives différentes : 20 pour la couche surfacique et 5 pour la couche inférieure. A partir du problème direct (§3.1), nous calculons la capacité pour chaque type de patin. Ensuite ces capacités sont inversées pour obtenir un profil de permittivité qui est comparé au profil synthétique. Les résultats indiquent que l'inversion reconstruit assez bien un modèle

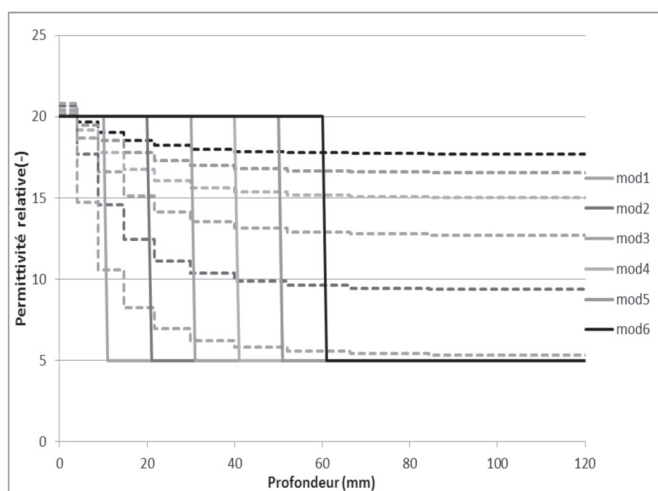


Figure 4 : Profil inversé d'un gradient raide

proche du modèle synthétique pour un front de saturation se situant à 1cm de profondeur mais que la justesse de l'inversion diminue lorsque la transition est plus profonde. Cette diminution de qualité provient du caractère sous-déterminé du problème inverse (non unicité de la solution), de la profondeur d'investigation limitée des sondes et enfin du choix d'une paramétrisation discrète du problème inverse.

4.1.2. Gradient en escalier non raide

La Figure 5 présente trois inversions différentes de données simulées sur un modèle synthétique de profil quasi continu en marche d'escalier. Ce dernier représente un profil plus réaliste pouvant refléter un essai d'imbibition d'eau [6], [3]. La différence entre les trois inversions repose sur le modèle initial utilisé. Pour la courbe « inversion 1 », les valeurs initiales de toutes les couches sont constantes, égales à 13. Pour les autres courbes, un profil initial de permittivité relative décroissante est introduit qui varie de 20 à 10 pour « inversion2 » et de 15 à 6 pour « inversion3 ». Les profondeurs d'investigation de chaque patin (PE, ME, GE) sont représentées sur la figure 5. Nous remarquons que les 3 inversions sont assez proches de la solution dans la zone inférieure à 40 mm, ceci est cohérent avec les profondeurs d'investigation des patins. L'« inversion3 » est la plus proche du profil synthétique mais ceci est dû au fort a priori sur le profil initial. Ces trois inversions assez différentes soulignent le fait qu'il existe plusieurs solutions pour le même problème inverse, sachant que le critère de convergence atteint (écart quadratique entre les données calculées et les données synthétiques) est inférieur à 0.5% pour les trois inversions au bout de 5 itérations.

4.2. Données réelles – Essais d'imbibition

Dans ce paragraphe nous exploitons des mesures réelles [6] réalisées au moyen des sondes capacitatives sur un béton noté: B2 ($E/C=0.356$, $D_{max}=20$ mm, $R_c=70.8$ MPa, $\phi=16.6\%$) et un mortier noté B6 ($E/C=0.67$, $D_{max}=5$ mm, $R_c=38.4$ MPa et $\phi=26.4\%$). Les mesures ont été faites pendant un essai d'imbibition d'eau qui consiste à plonger les

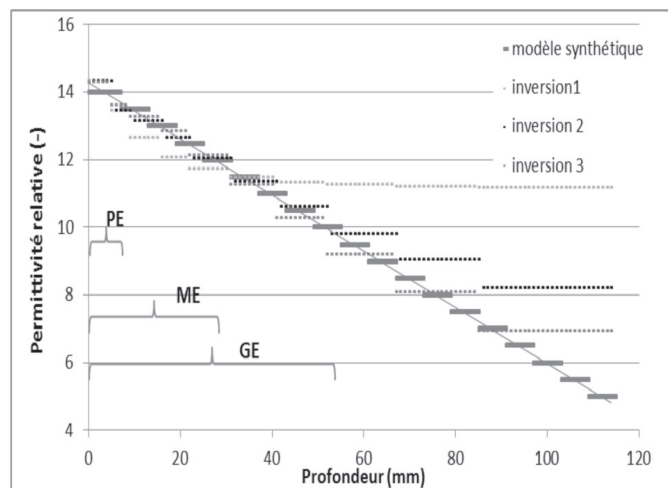


Figure 5 : Profil inversé d'un gradient en escalier non raide

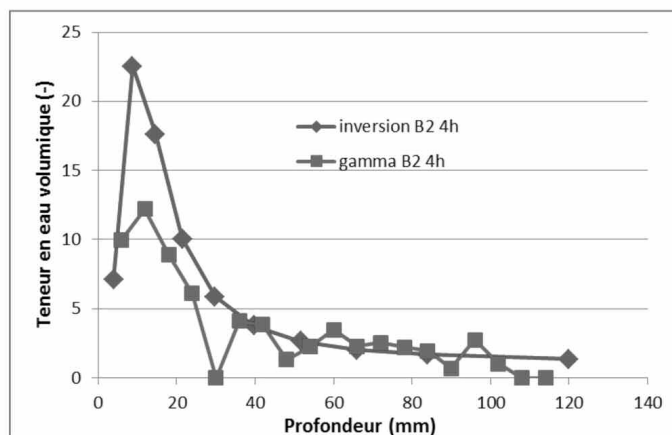


Figure 6 : Profil de teneur en eau volumique inversé pour du béton B2 après 4h dans l'eau

dalles de béton, dont les parois latérales ont été étanchéifiées, dans l'eau jusqu'à une hauteur de 1cm [6]. Les matériaux présentent ainsi un gradient de teneur en eau et donc un gradient de permittivité. Nous avons réalisés des inversions des données capacitatives pour une échéance à 4 heures dans l'eau en prenant comme valeurs initiales une permittivité constante pour toutes les couches. L'écart quadratique moyen entre les capacités mesurées et les capacités inversées est de 20% pour le B2 et 10% pour le B6 respectivement au bout de 3 et 4 itérations. Nous avons choisi de retenir et présenter ces itérations en comparaison avec des itérations supérieures donnant des profils non réalistes (trop structurés), dont l'écart quadratique moyen n'est pas cohérent avec l'erreur sur les mesures et dont la permittivité est inférieure à 3 (non réaliste pour un béton). Comme profil de référence, nous disposons des mesures réalisées par gammadensimétrie. Le principe de la gammadensimétrie se base sur l'absorption par la matière des rayons gamma [5], fonction de la densité du matériau testé qui, pour cette expérimentation, ne varie qu'en fonction de sa teneur en eau volumique. En réalisant des mesures à différentes échéances (états saturé, sec, initial et pendant l'imbibition), nous pouvons obtenir un profil de teneur en eau volumique à chaque échéance avec un point de mesure tous les 6 mm. Par ailleurs, nous disposons des courbes de calibration qui relient la permittivité à la teneur en eau volumique pour chacun des bétons [6]. Cette calibration permet ainsi de transformer les profils de permittivité inversés en profil de teneur en eau volumique. Ce dernier est comparé au profil de référence (gammadensimétrie) pour une échéance à 4h dans l'eau pour les bétons B2 et B6 (figure 6 et 7).

Sur les figures 6 et 7, nous remarquons que l'inversion donne des résultats encourageants pour les deux bétons. Pour le mortier B6, la courbe de référence est décroissante tandis que la courbe inversée augmente au début puis diminue. Cette forme en cloche est concordante vis à vis des données du petit patin (PE), du moyen patin (ME) et du grand patin (GE). Expérimentalement, ce phénomène pourrait s'expliquer par l'observation d'un contact imparfait entre les patins des sondes capacitatives et la surface rugueuse du béton qui crée une petite couche d'air de permittivité égale à 1. Ce contact imparfait affecte surtout le

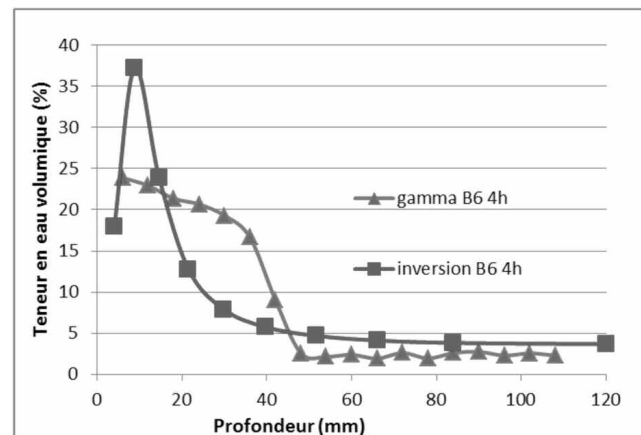


Figure 7 : Profil de teneur en eau volumique inversé pour du mortier B6 après 4h dans l'eau

patin PE qui a la plus petite profondeur d'investigation. L'inversion donne donc une faible valeur superficielle affectée par l'effet de l'air et une deuxième valeur très élevée pour compenser cette faible valeur. Pour le béton B2, cet effet est encore amplifié du fait que le profil de référence augmente avant de diminuer. Pour le mortier B6, la différence entre le profil inversé et le profil de référence (par gammadensimétrie) est plus important que pour le béton B2. Ceci peut être expliqué par la forme du profil de référence qui est plus raide pour B6 que pour B2. L'incapacité de l'inversion à trouver la bonne forme de la courbe a comme origine la sous-détermination du problème (information limitée, non unicité de la solution) observée dans les résultats des inversions synthétiques ; ce point est d'autant plus important dans cette zone de profondeur.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Dans cet article nous avons développé une méthodologie d'inversion des mesures par sondes capacitatives pour obtenir des profils de permittivité et donc de teneur en eau dans le béton d'enrobage. Les équations du problème direct se basent sur l'hypothèse électrostatique. La méthode du problème inverse choisie est la méthode de Gauss-Newton avec modification de Levenberg Marquardt. Le choix de paramétrisation du modèle est une distribution discrète. La méthodologie a été testée sur des données synthétiques et des données réelles sur deux bétons. L'inversion des données synthétiques montre une perte de sensibilité en profondeur et une dépendance au modèle initial choisi. L'inversion des données réelles diffère un peu des profils de référence fournis par gammadensimétrie, en particulier pour les couches peu profondes. Ces premiers résultats, tant synthétiques qu'expérimentaux, sont prometteurs. Néanmoins, l'inversion présente plusieurs faiblesses qui sont à optimiser à travers une étude paramétrique future. Plusieurs modifications peuvent être envisagées : tester l'hypothèse électrostatique, optimiser la paramétrisation du modèle (nombre de couches, distribution continue), définir le modèle initial de permittivité et augmenter les informations a priori. En outre, nous pouvons simuler de

nouvelles formes de patins qui permettent une plus grande profondeur d'investigation, et donc normalement une meilleure inversion en profondeur.

RÉFÉRENCES

- [1] AFGC, Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - Etat de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle sur la base d'indicateurs de durabilité, Documents scientifiques et techniques de l'AFGC, groupe de travail piloté par V. BAROGHEL-BOUNY, juillet 2004.
- [2] Dérobert X., Iaquina J., Klysz G., et Balayssac J, Use of capacitive and GPR techniques for non-destructive evaluation of cover concrete. NDT&E International, Volume 41, 2008, Pages 44-52.
- [3] du Plooy R., Villain G, Palma Lopes S.,Ihamouten A., Dérobert X., Thauvin B., Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete : a comparative study,Materials and Structures, 2013.
- [4] Fares A, Alva AK. Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. Soil Sci Soc Am J 2002, Pages 64-311.
- [5] Villain G., Thierry M., Incertitudes des mesures par gammadensimétrie, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n 260, 2006, Pages 69-82.
- [6] Ihamouten A., Caractérisation physique et hydrique des bétons d'ouvrage par propagation d'ondes électromagnétiques, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2011.
- [7] Menke, W. Geophysical data analysis: discrete inverse theory, 1984.
- [8]Fargier, Y. Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre, Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 2011.
- [9] J-P Pérez, R. C., Electromagnétisme Fondements et applications, 1990.
- [10] Multiphysics, Comsol. AC/DC module, User's Guide, 2008.
- [11] McGillivray P. R., Oldenburg D.W.,Methods for calculating fréchet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem :A comparative study. Geophysical Prospecting, Volume 38, 1990, Pages 499-524.