

Partie 3 – Structures & Monitoring

RÉFLECTOMÉTRIE FRÉQUENTIELLE (FDR) APPLIQUÉE À L'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE DES CONDUITS DE PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE

FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY (FDR) APPLIED TO NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF EXTERNAL POST-TENSIONED DUCTS

**Filippo VISCO-COMANDINI^(a), Thierry BORE^(b), Gonzague SIX^(a), Florence SAGNARD^(a),
Sylvie DELEPINE-LESOILLE^(c), Gautier MOREAU^(d), Frédéric TAILLADE^(d*), Dominique PLACKO^(b),
Qinghua ZHANG^(e), Michel SORINE^(e)**

a. Université Paris Est, Ifsttar, 14-20 boulevard Newton Cité Descartes, Champs sur Marne,
77447 Marne la Vallée Cedex 2, France

b. SATIE, ENS Cachan, CNRS, 61 avenue du président Wilson, F 94235 Cachan Cedex

c. Andra, 1-7 rue Jean Monet, F- 92298 Chatenay-Malabry France

d. EDF R&D STEP, 6 quai Watier, BP 49, 78401 Chatou, France

e. INRIA, Domaine de Voluceau, 78153 Le Chesnay, France

* Frédéric Taillade : frederic.taillade@edf.fr

RÉSUMÉ

Ce papier présente une méthode électromagnétique de diagnostic reposant sur la réflectométrie fréquentielle (FDR) associée à un algorithme d'inversion développé par l'INRIA, ISTL™ (Inverse Scattering for Transmission Lines). ISTL™ permet d'estimer le profil spatial d'impédance électrique de la ligne à partir de la mesure FDR. Des résultats expérimentaux obtenus sur deux maquettes de conduits de précontrainte extérieure ayant des défauts de remplissage montrent la faisabilité de la méthode. Nous tacherons de montrer les similitudes qui existent entre l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure et la mesure de teneur en eau par des sondes TDR (Time Domain Reflectometry).

ABSTRACT

This paper presents an electromagnetic method of diagnosis based on frequency domain reflectometry (FDR) associated with an inversion algorithm developed by INRIA, ISTL™ (Inverse Scattering for Transmission Lines). ISTL™ allows estimating the spatial profile of the electrical impedance of the line from the FDR measurements. Experimental results on two mockups of external post-tensioned ducts with filling defects show the feasibility of the method. We will try to show the similarities between auscultation external post-tensioned ducts and measurement of water content by TDR probes (Time Domain Reflectometry).

Mots-clés : réflectométrie fréquentielle, conduit de pré-contrainte extérieure, teneur en eau, béton, argilite

* * *

1. INTRODUCTION

Face à des contraintes économiques croissantes et dans un souci de gestion durable des infrastructures, les Maîtres d’Ouvrage souhaitent maintenir en service leur parc sur des périodes de plus en plus étendues. Pour assurer la fonctionnalité des structures de génie civil en toute sûreté, le développement de méthodes de surveillance, à des fins de diagnostic de l’état de santé des structures, devient un enjeu majeur [1].

Dans cet article, nous allons nous intéresser en particulier au diagnostic des conduits de précontrainte extérieure [2] et à la mesure de la teneur en eau des parois en béton ou argilite d’ouvrages de génie civil par une méthode électromagnétique (EM) reposant sur la réflectométrie fréquentielle (FDR).

En effet, que ce soit pour l’auscultation des conduits de précontrainte extérieure en PEHD (polyéthylène haute densité) remplis de coulis de ciment [3] ou pour la mesure de la teneur en eau [4], les principales méthodes de diagnostic reposent sur l’estimation de la permittivité électrique du matériau. Dans le cas de l’auscultation des conduits de précontrainte, la méthode consiste à mesurer l’impédance électrique entre deux électrodes appliquées à la surface du conduit en PEHD. Dans le cas de la mesure de teneur en eau, le principe de mesure consiste à analyser (mesure du temps de vol ou autre) la propagation d’une onde EM dans une ligne électrique bifilaire. Dans tous les cas, la propagation des ondes EM est régie par les équations des Télégraphistes. On parle de mesures et de sondes TDR pour Time Domain Reflectometry.

Ce papier présente une nouvelle méthode reposant sur la réflectométrie fréquentielle (FDR). Les méthodes de réflectométrie avancées d’aujourd’hui offrent une solution efficace pour la détection de défauts et le diagnostic des lignes de transmission électriques [5,6].

Après une brève présentation des modèles électriques de lignes considérés dans cet article et un rappel succinct de la théorie de la propagation d’ondes dans les lignes électriques, nous présentons un exemple simulé de la mise en œuvre de la méthode de diagnostic reposant sur la réflectométrie fréquentielle et sur la mise en œuvre d’un algorithme d’inversion développé par l’INRIA, ISTL™ (Inverse Scattering for Transmission Lines). Des résultats expérimentaux obtenus sur deux maquettes de conduits de précontrainte extérieure ayant des défauts de remplissage montrent la faisabilité de la méthode.

2. MODÈLE ÉLECTRIQUE APPLIQUÉ AUX CONDUITS DE PRÉCONTRAINTE EXTÉRIEURE ET AUX SONDES TDR

L’idée principale de la méthode repose sur une mesure de réflectométrie fréquentielle en considérant la propagation des ondes EM le long d’une ligne de transmission constituée soit d’une paire de bandes électriquement conductrices placées sur les génératrices supérieure et inférieure du conduit, soit directement les antennes de la sonde TDR (Figure 1a). Les paramètres de transmission le long d’une ligne électrique (comme l’impédance caractéristique, la vitesse et l’atténuation) dépendent de la permittivité complexe du matériau qui est placé entre les conducteurs électriques constituant la ligne. Il est bien connu que la permittivité dépend de la nature du matériau diélectrique, fonction de la teneur en eau, de vide, etc. La mesure de réflectométrie fréquentielle est réalisée grâce à un analyseur de réseau vectoriel (VNA) connecté à la ligne. Le VNA mesure alors le coefficient de réflexion en fonction de la fréquence $S_{11}(\omega = 2\pi f)$.

Dans le cas du diagnostic des conduits de précontrainte extérieure, nous supposons que le modèle de câble (Figure 1a) est équivalent à une géométrie multi-couche plane (Figure 1b). Les conducteurs électriques et les conduits forment une ligne électrique entre les bandes conductrices. Nous considérons que le conduit est rempli partiellement avec du ciment, surmontée d’une couche de pâte blanche

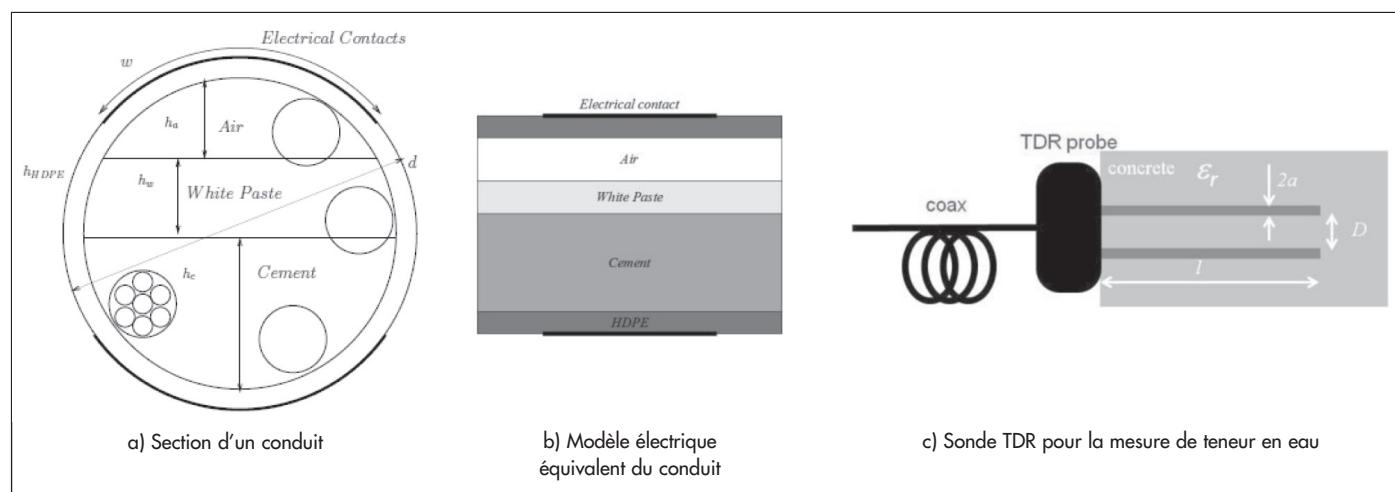


Figure 1 : Modèle de ligne électrique: a) et b) pour le conduit de précontrainte extérieure et c) pour la sonde TDR mesurant la teneur en eau

puis d'air. Chaque matériau est caractérisé par sa permittivité relative complexe $\epsilon_n = \epsilon'_n - j\epsilon''_n$ ($j = \sqrt{-1}$) où l'indice n peut être remplacé par air ($\epsilon_{air} = 1$), PEHD ($\epsilon_{PEHD} = 2,5$), ciment ($\epsilon_{ciment} = 5$), pâte blanche ($\epsilon_{pate} = 63 + j2,6$).

La hauteur de chaque matériau h_n dans la section transversale dépend de la position variable $z \in [0,l]$ le long de la ligne électrique, et d représente le diamètre du conduit (voir figure 1). En considérant un modèle multi-couche plan [7], la permittivité électrique apparente du conduit s'écrit :

$$\frac{1}{\epsilon_{app}(z)} = \frac{1}{d} \sum_n \frac{h_n(z)}{\epsilon_n(z)}$$

Dans le cas de la mesure de teneur en eau par sonde TDR (Figure 1c), la ligne électrique est constituée de deux fils parallèles insérés dans un matériau de permittivité relative ϵ_r

3. PROPAGATION DANS UNE LIGNE DE TRANSMISSION

La transmission du signal le long d'une ligne électrique est régie par les équations des Télégraphistes. Chaque tronçon de ligne élémentaire est généralement caractérisé par les paramètres linéaires R, L, C et G, représentant respectivement, la résistance, l'inductance, la capacitance et la conductance [6]. En régime harmonique, les équations des Télégraphistes s'écrivent :

$$\partial_z V(\omega, z) - j\omega L(z)I(\omega, z) + R(z)I(\omega, z) = 0$$

$$\partial_z I(\omega, z) - j\omega C(z)V(\omega, z) + G(z)V(\omega, z) = 0$$

où l'intensité $I(\omega, z)$ et la tension $V(\omega, z)$ dépendent de la position z et de la pulsation $\omega = 2\pi f$ où f est la fréquence. Les conditions aux limites suivantes sont vérifiées aux deux extrémités de la ligne à $z = 0$ et $z = l$

$$V(\omega, 0) - Z_s(\omega)I(\omega, 0) = V_s(\omega)$$

$$V(\omega, l) - Z_T(\omega)I(\omega, l) = 0$$

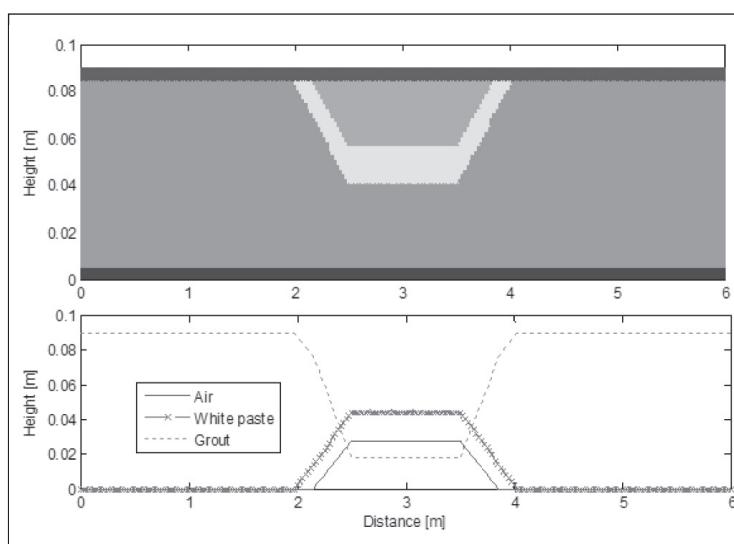


Figure 3 : Profil de remplissage du conduit de précontrainte extérieure simulé

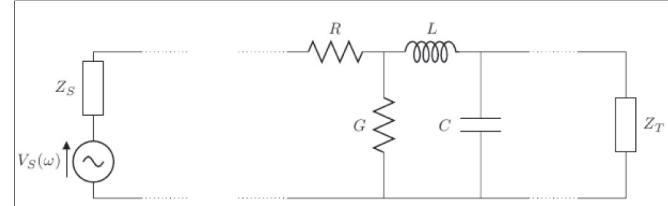


Figure 2 : Modèle de ligne de transmission intégrant la partie génératrice (VNA) et l'impédance de charge

$Z_s(\omega)$ est l'impédance de la source interne du VNA relié à $z = 0$ et l'impédance $Z_T(\omega)$ reliée à $z = l$ (Figure 2).

Les résolutions du problème direct et inverse ne sont pas décrites dans ce papier, mais le lecteur pourra trouver des informations dans les références [5, 6]. Le problème direct consiste à déterminer classiquement à chaque pulsation, l'impédance apparente de la ligne (en $z = 0$) à partir des paramètres électriques $R(z)$, $L(z)$, $C(z)$, $G(z)$ spécifiés. Le coefficient de réflexion mesuré avec le VNA correspondant à l'impédance apparente qui s'écrit :

$$S_{11}(\omega) = \frac{Z_{app}(0, \omega) - Z_s}{Z_{app}(0, \omega) + Z_s}$$

Le problème inverse consiste à déterminer l'impédance caractéristique distribuée $Z_o(z) = \sqrt{L(z)/C(z)}$ en tout point z à partir du coefficient de réflexion $S_{11}(\omega)$.

La méthode d'inversion est réalisée grâce au logiciel ISTL™ (Inverse Scattering for Transmission Lines) développé à l'INRIA par l'équipe SISYPHE. ISTL™ repose sur une méthode de diffusion inverse appliquée aux lignes de transmission [8].

4. SIMULATIONS ET VALIDATIONS

Afin de valider la méthode proposée, nous avons choisi de l'appliquer au diagnostic des conduits de précontrainte extérieure en considérant un conduit rempli partiellement de ciment, de pâte blanche et d'air (Figure 3). La résolution

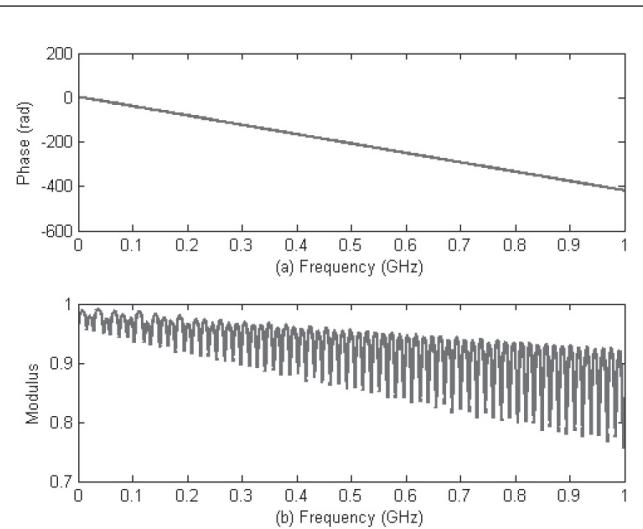


Figure 4 : Coefficient de réflexion S_{11} simulé

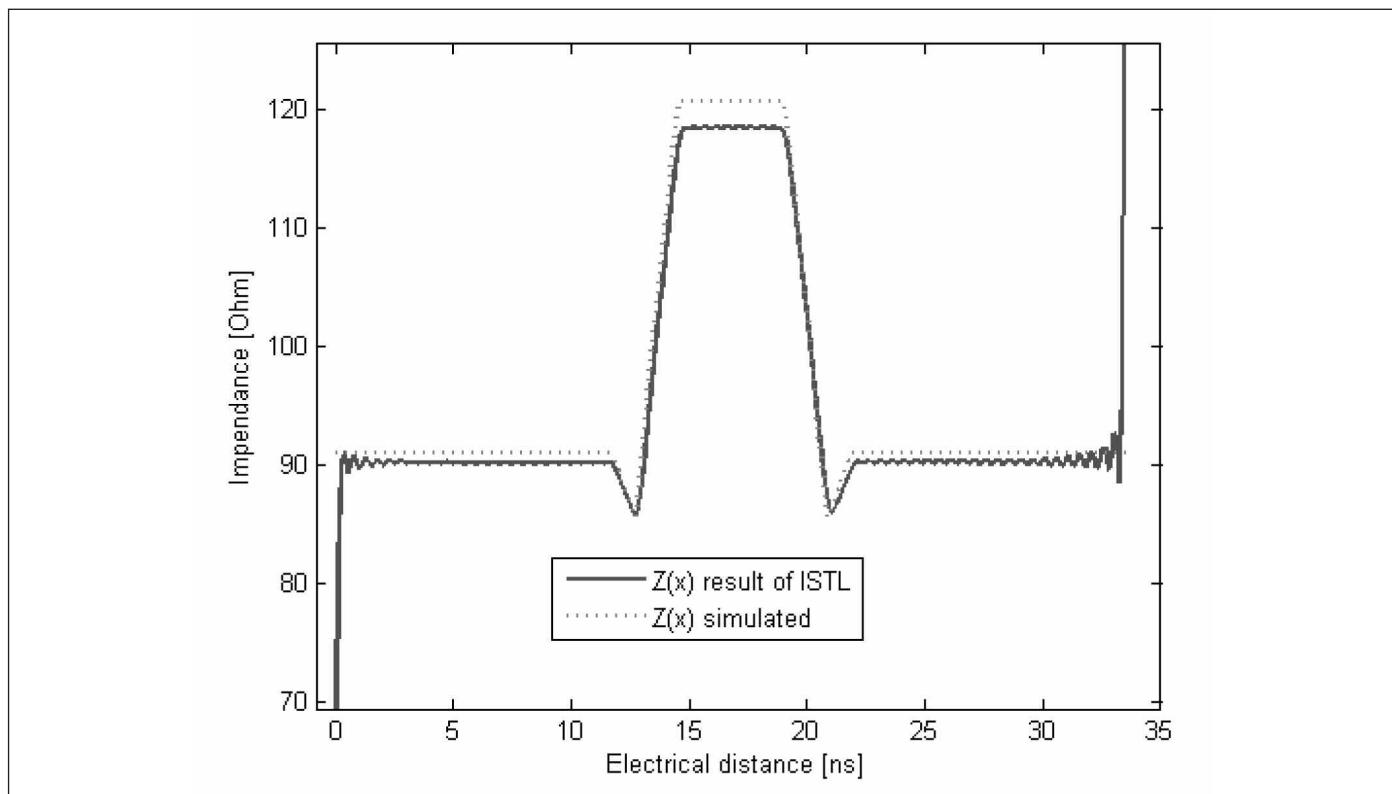


Figure 5 : Impédance simulée et inversée en fonction de la distance électrique x (avec $x(z) \int_0^z ds/v(s)$ où $v(s)$ est la vitesse de l'onde électrique dépendant de R , L , C , G).

du problème direct permet de calculer l'impédance apparente le long du conduit servant alors à simuler une mesure du coefficient de réflexion S_{II} (Figure 4).

Le logiciel d'inversion est alors utilisé pour extraire, du coefficient de réflexion, le profil d'impédance de la ligne. La figure 5 compare le profil d'impédance calculé dans le problème direct avec le résultat issu de l'inversion. Cet exemple illustre la résolution du problème inverse. Lorsque le conduit est rempli totalement de ciment, l'impédance est de l'ordre de 90Ω (valeur nominale). Par rapport à la valeur nominale de l'impédance, le défaut de remplissage simulé entraîne une augmentation de l'impédance d'environ 30% alors que la pâte blanche seule diminue l'impédance d'environ 5%.

5. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Deux maquettes de conduits de 6m de longueur et de diamètre 90mm ont été réalisées (Figure 6). Les conduits sont équipés de torons 12T15 (12 torons de diamètre 15mm). Ces conduits sont fixés sur un châssis reproduisant la courbure au niveau d'un déviateur (au droit d'une pile de pont). Les événements sont disposés de part et d'autre du point haut, c'est à dire dans la pratique de chaque côté du déviateur. Des cales en bois ont été insérées entre le châssis métallique et les conduits afin de ne pas perturber la mesure. Le ciment a été injecté dans le conduit A en utilisant un adjuvant *Superstresscem* (E/C de 0,35) de telle manière à obtenir un défaut réaliste de remplissage au

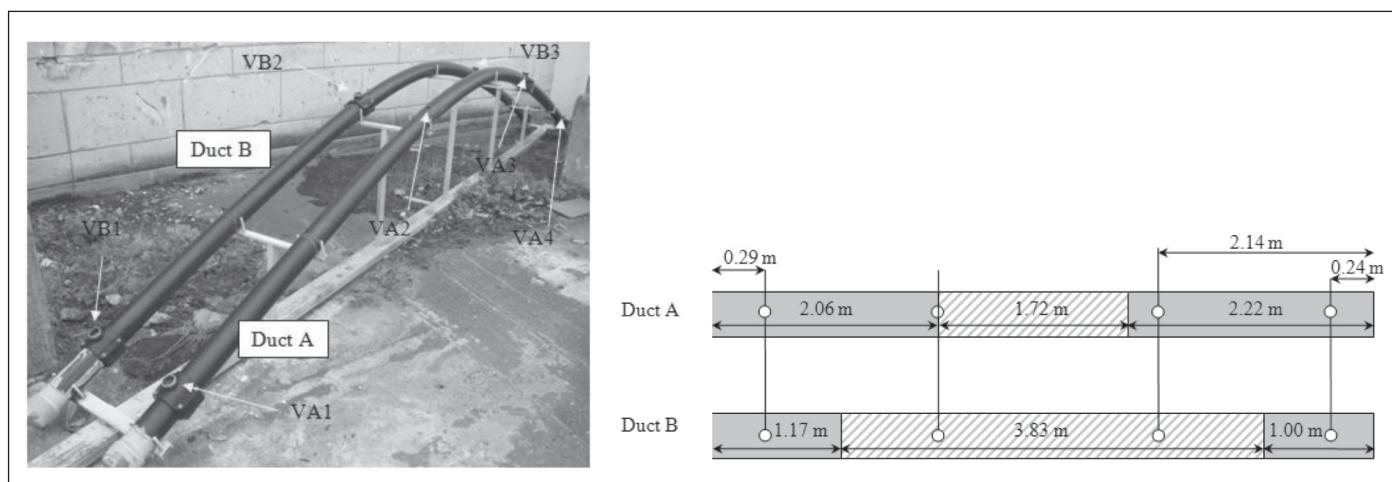
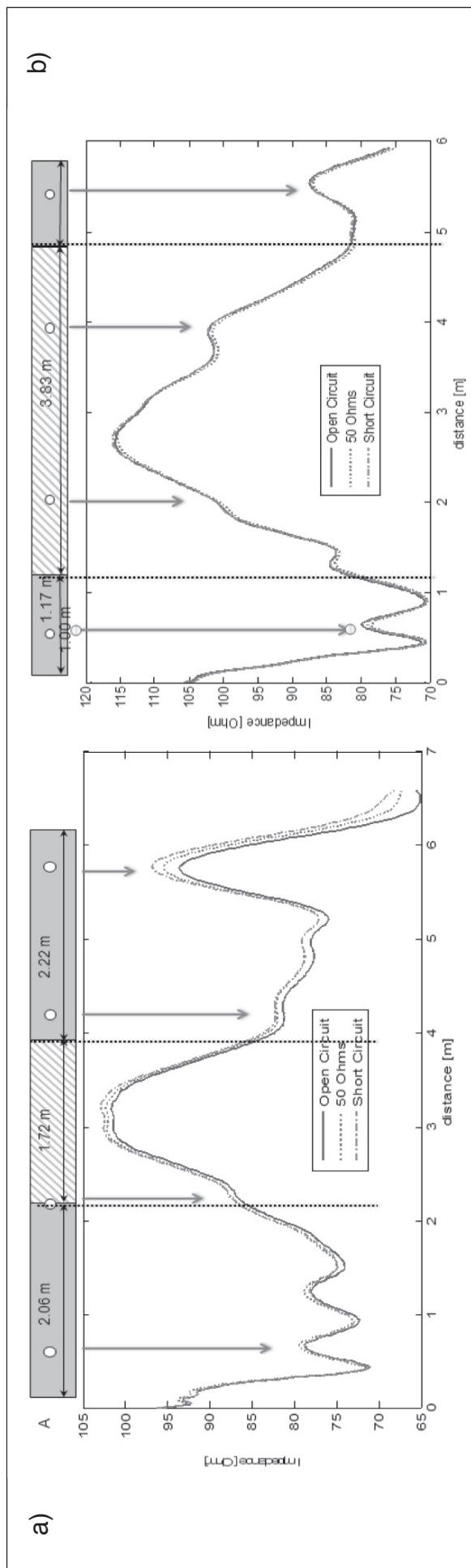


Figure 6 : Maquettes de conduits de précontrainte extérieure (laboratoire du CEREMA de Trappes) ; les zones hachurées représentent les vides et les ronds (o) les événements.



**Figure 7 : Le profil d'impédance calculée par rapport à marteler ISTL auscultation
a) sur le conduit A ; b) sur le conduit B**

point haut. Le conduit B a été injecté avec du ciment utilisant un adjuvant *ChrysoGT* (E/C de 0,65) afin de favoriser l'apparition d'une pâte blanche et un défaut de remplissage. Une inspection au marteau a permis de positionner les zones de mauvais remplissage (Figure 6 droite).

Les conduits ont été équipés de bandes métalliques collées sur deux génératrices (supérieure et inférieure). La bande est composée d'aluminium d'épaisseur de 0,1mm et de largeur 50mm. Cette paire de bandes est connectée à un câble coaxial au moyen de pinces. Les mesures du coefficient de réflexion S_{II} sont effectuées en utilisant un VNA de Anritsu MS2026. Les mesures sont effectuées sur une gamme de fréquences de 1MHz à 1GHz avec un pas de fréquence de 1MHz (1000 points). Sur chaque conduit, nous avons réalisé trois expériences différentes en connectant une impédance connue à l'autre extrémité du conduit (circuit ouvert, court-circuit et une impédance de 50Ω).

Après inversion des mesures par ISTL™, la figure 7 présente une comparaison entre les trois expériences différentes réalisées sur chaque conduit. Les profils d'impédance sont alors comparés aux résultats d'inspection réalisée classiquement avec un marteau. L'analyse du profil d'impédance permet clairement de positionner l'emplacement des événements et de la zone partiellement remplie de coulis de ciment. Les oscillations d'impédance, dues à la perturbation amenée par les événements, empêchent de distinguer la pâte blanche.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons présenté une nouvelle méthode de contrôle non destructif reposant sur la réflectométrie fréquentielle (FDR). L'inversion du signal mesuré (coefficient de réflexion S_{II} en fonction de la fréquence) est réalisée avec le code ISTL™ qui permet de remonter au profil de l'impédance électrique en fonction de la position spatiale z le long de la ligne.

Une faisabilité du diagnostic des conduits de précontrainte extérieure montre que cette méthode est capable de détecter les hétérogénéités recherchées (vide) le long du conduit. Le diagnostic est en bon accord avec l'inspection classique au marteau. Par rapport à la sonde capacitive, cette méthode présente l'avantage de pouvoir réaliser le diagnostic en continu, tout le long du conduit (même au droit des déviateurs, là où la sonde capacitive ne peut être mise en œuvre). De plus, après avoir équipé les conduits d'une paire de conducteurs, le diagnostic peut être réalisé à distance sans nécessiter la présence d'opérateurs à l'intérieur de l'ouvrage ce qui améliore la sécurité du personnel. En revanche, il semble difficile de diagnostiquer la présence de la pâte blanche.

La méthode présentée dans ce papier reposant sur la réflectométrie fréquentielle (FDR) associée à la méthode d'analyse par ISTL™ devrait permettre sa mise en œuvre dans le cas de la mesure de teneur en eau du béton et de l'argile. A priori, il serait notamment possible de mesurer le profil (gradient) de teneur en eau le long des antennes constituant la sonde TDR ce qui représenterait un progrès significatif dans la surveillance des ouvrages de génie civil et dans le pronostic de leur durée de vie.

RÉFÉRENCES

- [1] Stephan P., Salin J. (2012) "Ageing management of concrete structure: Assessment of EDF methodology in comparison with SHM and AIEA guides", *Constr. and Build. Mat.* 37, 924–933.
- [2] R. Le Roy, "Rhéologie et stabilité des matrices cimentaires et des coulis." *Etudes et recherches des Laboratoires des ponts et chaussées*, LCPC Paris, 2006.
- [3] T. Bore, D. Placko, F. Taillade et M. Himbert. Capacitive sensor for measuring the filled of post-tensioned ducts: experimental set-up, modelling and signal processing. *IEEE Sensors Journal*, 13:457, 465, 2012.
- [4] A. Courtois, F. Taillade, G. Moreau, T. Clauzon, F. Skoczylas et B. Masson. Water content monitoring for nuclear concrete buildings : needs, feedback and perspectives. 5th Biot Conference on Poromechanics, July 2013.
- [5] Huaibin Tang and Qinghua Zhang. An inverse scattering approach to soft fault diagnosis in lossy electric transmission lines. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 59(10):3730-3737, 2011.
- [6] Qinghua Zhang, Michel Sorine, and Mehdi Admane. Inverse scattering for soft fault diagnosis in electric transmission lines. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 59(1):141-148, 2011.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, Wiley, New York, 3rd ed. edition, 2005.
- [8] G. L. Lamb, *Elements of Soliton Theory*. John Wiley and sons, 1980.