

Sonde capacitive. Vers un outil de diagnostic des conduits de précontrainte extérieure

Frédéric TAILLADE*

LCPC, Centre de Paris, France

Christophe AUBAGNAC

Christian LACROIX

LRPC d'Autun, France

Denis MALATERRE

LRPC de Toulouse, France

Jean-Luc SAUSSOL

LRPC de l'Ouest Parisien, Trappes, France

Louis-Marie COTTINEAU

LCPC, Centre de Nantes, France

■ RÉSUMÉ

Cet article présente une analyse exhaustive des aptitudes et caractéristiques de la sonde capacitive utilisée dans le cadre d'auscultations des conduits de précontrainte extérieure. Des simulations numériques fondées sur un modèle analytique et sur une approche par éléments finis permettent d'explicitier la sensibilité de la sonde capacitive en fonction des matériaux enfermés dans le conduit (vide, pâte blanche, coulis, eau) et sa sensibilité en fonction de la zone auscultée. Cette analyse montre que la sonde capacitive permet de détecter facilement des vides, tout en faisant la différence avec un retrait du coulis, et de détecter de la pâte blanche. Des mesures en laboratoire, sur une éprouvette témoin (avec des défauts connus), sont en bon accord avec des résultats de simulations numériques. Une campagne d'investigation sur le terrain dont on a tiré un exemple montre des exemples de détection de vides et de pâte blanche avec la sonde capacitive qui ont été confirmés par l'ouverture du conduit.

The capacitive probe: Developing a diagnostic tool for external prestressing ducts

■ ABSTRACT

This article presents an exhaustive analysis of both the capabilities and characteristics of the capacitive probe used within the framework of structural evaluations conducted on external prestressing ducts. Numerical simulations based on an analytical model as well as a finite element approach have proved capable of describing the sensitivity of the capacitive probe with respect to materials enclosed within the duct (voids, white paste, grout, water), and with respect to the zone being examined. This analysis shows that the capacitive probe easily detects voids while determining differences with grout shrinkage and is able to distinguish the white paste as well. Laboratory measurements, conducted on a reference specimen (containing known defects), closely agree with numerical simulation results. A field investigation campaign, an example of which has been reproduced herein, reveals void and white paste detection with the capacitive probe, with subsequent confirmation by actually opening the duct.

* AUTEUR À CONTACTER :

Frédéric TAILLADE

frederic.taillade@lcpc.fr

INTRODUCTION

De nombreux ouvrages en béton précontraint comportent des câbles de précontrainte extérieure que ceux-ci aient été mis en œuvre dès la construction (depuis les années quatre-vingt) ou comme procédé de renforcement de la structure (depuis les années soixante-dix). Il existe différents types de protection pour ces câbles. Jusqu'en 2001, ils étaient très majoritairement placés dans des conduits en polyéthylène haute densité (PEHD), où l'espace résiduel était rempli sous haute pression par un

coulis à base de liant hydraulique. Suite à quelques ruptures de câbles de précontrainte extérieure protégés par du coulis de ciment directement au contact des armatures, la détection des anomalies d'injection au coulis de ciment [1] est devenue une préoccupation des gestionnaires. Les anomalies constatées sont des vides avec ou sans présence de produits humides comme du coulis non durci ou de la « pâte blanche » issue de l'exsudation du coulis pendant sa prise, voire avec présence d'eau. La présence de ces anomalies favorise l'oxydation et la corrosion des torons qui peuvent conduire à la rupture des câbles sous tension.

Déceler visuellement des défauts d'injection dans des conduits opaques est impraticable de l'extérieur et les procédures d'auscultation habituellement utilisées s'avèrent inappropriées, car locales et destructives (ouvertures du conduit), peu commodes (rayons gamma) et coûteuses. La méthode de référence reste aujourd'hui le marteau et l'écoute humaine. Dans ces conditions, l'établissement d'un véritable diagnostic passe par la mise au point de nouveaux outils d'investigation non destructifs, délivrant des informations qualitatives voire quantitatives.

Les méthodes électromagnétiques offrent une voie prometteuse. En effet, depuis l'année 2000, des expérimentations menées dans le réseau scientifique et technique, notamment au Laboratoire régional des ponts et chaussées d'Autun, ont montré les potentialités de sondes capacitives. Les essais portaient sur des corps d'épreuve comportant un tronçon de câble d'acier, dans lesquels de l'eau et du sable pouvaient être ajoutés. Des électrodes métalliques placées à la surface du conduit forment un condensateur dont la capacité varie en fonction de la nature des matériaux constitutifs du conduit. La mesure de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant relié à ce condensateur permet de déduire sa capacité.

Des études théoriques sur ce type de capteur ont été menées au Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) dans les années soixante-dix [2, 3]. À l'époque, l'application visée était de mesurer la teneur en eau des sols, puis du béton. Cette méthode a été étendue dans les années quatre-vingt-dix à l'auscultation des conduits de précontrainte.

L'approche largement privilégiée jusqu'à présent était essentiellement axée sur le développement de méthodes et sur l'amélioration d'un capteur visant à établir la faisabilité du procédé. Un obstacle majeur à l'emploi de cette technique est lié d'une part à la caractérisation de la sonde (sensibilité, facteur d'influence...), d'autre part à l'interprétation des mesures en termes de caractérisation et d'identification de défauts : présence de vide ou d'eau dans le conduit, dégradations de l'enrobage, endommagements du câble (rupture de torons, corrosion...).

Cet article a pour but de donner une première analyse « physique » de la technique d'auscultation en s'appuyant sur la confrontation des résultats de simulation par éléments finis et des résultats expérimentaux obtenus sur une éprouvette ayant des défauts maîtrisés. On tentera de caractériser cette sonde capacitive afin de dégager, d'une part la sensibilité de la mesure vis-à-vis des propriétés diélectriques des matériaux et des défauts à identifier et d'autre part la sensibilité spatiale afin de définir la zone auscultée. Enfin, on décrira une application de cette sonde capacitive sur un ouvrage réel.

LA SONDE CAPACITIVE

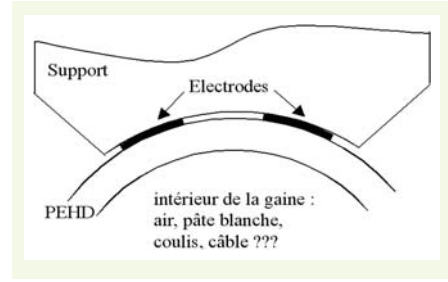
■ Principe

Le principe de la méthode capacitive est connu depuis longtemps au LCPC [2, 3], elle a notamment été utilisée pour la mesure des variations de teneur en eau dans les sols non saturés et dans les matériaux ayant une surface plane (béton, maçonnerie). La méthode a donc été étendue à l'auscultation des conduits de précontrainte extérieure injectés au coulis de ciment dans lesquels on peut être amené à rencontrer certaines anomalies d'injection (figure 1). Le principe de la méthode a fait l'objet d'un dépôt de brevet [4].

figure 1
Vue de l'intérieur d'un conduit après rupture d'un câble de précontrainte.



figure 2
Schéma de principe de la sonde capacitive.



1 | 2

Le principe de la mesure repose sur un oscillateur dont la fréquence f_{osc} varie en fonction d'une inductance L (interne à l'oscillateur) et d'un condensateur C composé par l'ensemble des matériaux entre la paire d'électrodes (**figure 2**) :

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

avec $C = \epsilon_0 \epsilon_r \chi$, où ϵ_0 est la permittivité absolue dans le vide qui vaut $8,854188 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ [5], ϵ_r est la permittivité relative du matériau diélectrique et $\chi = S/e$ pour un condensateur plan constitué de deux électrodes de surface S enserrant un matériau d'épaisseur e .

Ce condensateur, formé des différentes couches traversées par les lignes de champ (conduit, air, pâte blanche, coulis, acier), est fonction de la permittivité relative du milieu ϵ_r (1 pour l'air, 5 à 15 pour le béton et le coulis, 2 à 3 pour le PEHD, 80 pour l'eau). Le contraste de permittivité ϵ entre des matériaux plus humides et des matériaux plus secs induit une variation de la capacité et par conséquent de la fréquence de l'oscillateur qui est alors mesurée. La permittivité peut se mettre sous sa forme complexe : $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ où le terme ϵ' caractérise la constante diélectrique du milieu (permittivité) et le terme ϵ'' représente entre autres les pertes liées à la résistance du milieu. La variation de permittivité électrique en fonction de la fréquence peut être décrite par un phénomène de relaxation de type Debye [6] modifié par Cole et Cole [7] :

$$\epsilon(f) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_S - \epsilon_\infty}{1 + j \frac{f}{f_r}} - j \frac{\sigma_S}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2)$$

avec f_r la fréquence de relaxation, ϵ_S et ϵ_∞ respectivement la permittivité statique et à haute fréquence ($\gg f_r$), σ_S la conductivité électrique statique.

Il importe donc de choisir la fréquence de fonctionnement de l'oscillateur de façon à minimiser ces pertes afin qu'il reste dans sa plage de fonctionnement. La fréquence dans l'air retenue pour le dispositif est autour de 65 MHz. La variation de capacité pour les matériaux rencontrés ici est de quelques picofarads.

■ Le dispositif

La **figure 3a** montre une photographie de la deuxième génération du dispositif qui a été perfectionné du point de vue mécanique afin d'assurer une bonne reproductibilité du contact entre les électrodes et le conduit en PEHD. De plus, la liaison entre le capteur et l'ordinateur est assurée par ondes hertziennes, ce qui en facilite la manipulation sur le terrain.

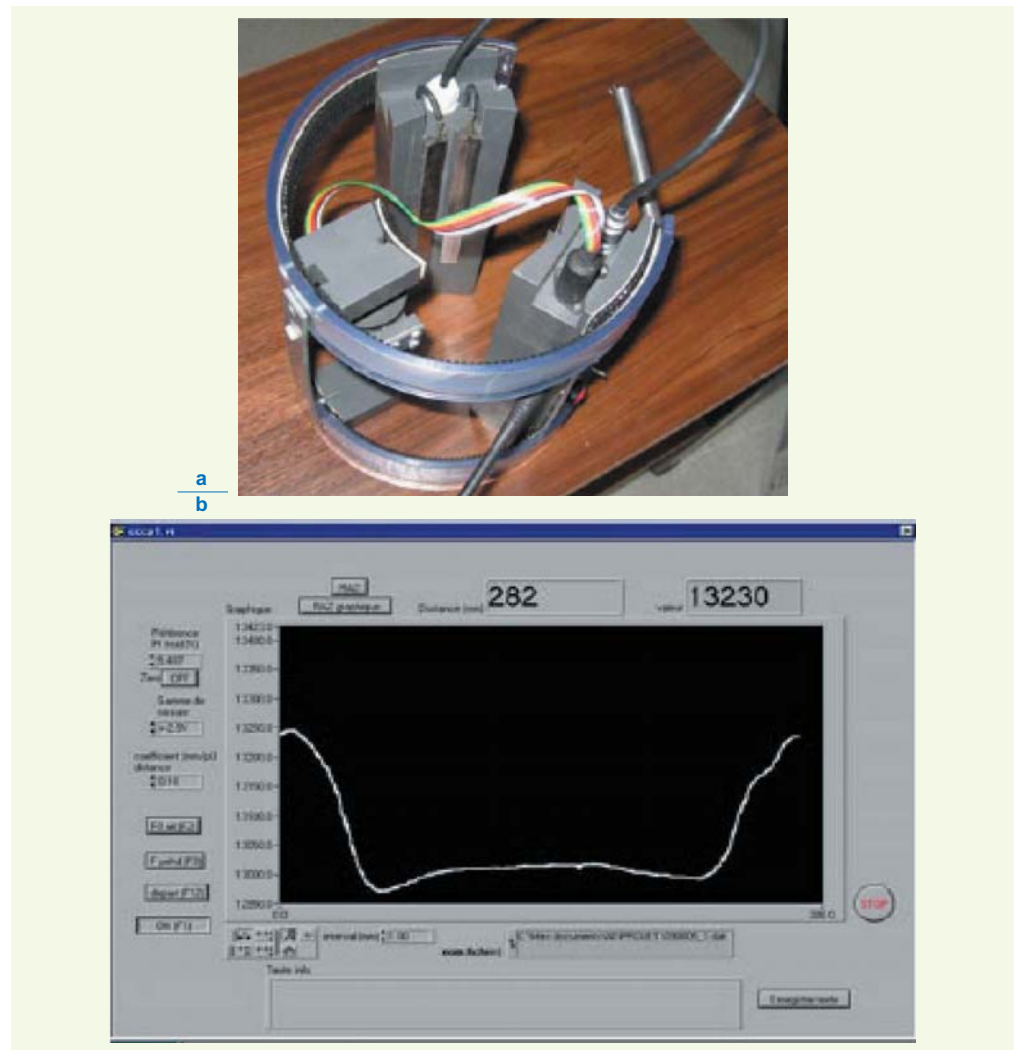
L'un des deux boîtiers supporte les électrodes de mesure en contact avec le conduit en PEHD et renferme l'électronique de l'oscillateur. L'autre boîtier abrite l'électronique chargée de la transmission sans fil des données. Les électrodes sont composées de deux lames de cuivre (ou de deux lames d'acier inox) longitudinales de 10 mm de largeur, espacées de 10 mm. La capacité est adaptée à la plage de fonctionnement de l'oscillateur par la longueur des électrodes qui est de 150 mm. La fréquence de l'oscillateur est d'environ 65 MHz ; un diviseur par 5 000 permet le transport du signal sans trop de perturbation à une basse fréquence f_D (dans l'air $f_D \approx 13\,000\text{ Hz}$).

Un codeur optique incrémental donne la position linéaire du capteur à la surface du conduit en PEHD, soit dans le sens longitudinal, soit selon une abscisse circulaire. Une interface, développée en LabView (**figure 3b**) permet la visualisation et le stockage des mesures.

■ Modèle analytique

Avant de modéliser par éléments finis cette sonde capacitive dans son milieu d'emploi, il est intéressant de comprendre le fonctionnement électrique du capteur en lui-même et les capacités

figure 3
Sonde capacitive.
a : Dispositif de
deuxième génération.
b : Interface utilisateur et
visualisation d'une mesure.



élémentaires mises en jeu lors d'une mesure. Dans toute la suite de l'article, on négligera la conductivité électrique des matériaux.

À partir du principe du capteur (cf. **figure 2**), on considère un déplié de l'ensemble support, électrodes, conduit (**figure 4**).

En suivant les lignes de potentiels d'une électrode à l'autre, il est facile d'établir un modèle électrique équivalent au schéma (**figure 4**). Ce modèle (**3**) est un condensateur constitué de deux capacités en parallèles, l'une comprenant la capacité liée au contact électrodes-support C_{CS} en série avec la capacité liée au support C_S lui-même, l'autre comprenant la capacité liée au contact électrodes-conduit C_{CG} en série avec la capacité du conduit C_G elle-même, en série avec le matériau contenu dans le conduit C_M . Finalement le condensateur équivalent peut se représenter schématiquement comme sur la figure (**figure 5**).

$$C = \frac{C_S C_{CS}}{2C_S + C_{CS}} + \frac{C_M C_G C_{CG}}{2C_M (C_G + C_{CG}) + C_G C_{CG}} \quad (3)$$

On remarque que la capacité mesurée (**3**) entre les électrodes n'est pas directement proportionnelle à la capacité liée au matériau dans le conduit.

Nous supposons que les capacités élémentaires peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$C_i = \varepsilon_0 \varepsilon_i \chi \quad (4)$$

où χ est un facteur dépendant de la géométrie du condensateur formé par ces deux électrodes supposé le même quelle que soit la capacité élémentaire.

Dans une première approche, le facteur χ est calculé en appliquant la même forme que celle du condensateur plan parallèle et en considérant les géométries de la sonde capacitive à savoir, S la surface des électrodes soit $150 \times 10 \text{ mm}^2$ et e l'espace entre électrodes soit 10 mm, $\chi = 150 \text{ mm}$.

La variation de capacité mesurée en fonction de la permittivité relative du matériau ε_M (**figure 6**) rend compte de la sensibilité de la sonde capacitive vis-à-vis du matériau enfermé dans le conduit. Au vu de la sensibilité, cette sonde est particulièrement adaptée pour distinguer des matériaux dont la permittivité relative est comprise entre 1 pour l'air et 20 pour un coulis humide. Il sera, *a priori*, plus difficile de différencier si le matériau est un coulis humide ou de l'eau.

■ Étalonnage

Afin de comparer les résultats expérimentaux et de simulations, il est nécessaire de connaître la forme de la relation entre la fréquence de l'oscillateur et la capacité mesurée entre électrodes ainsi que les paramètres d'étalonnage. Bien que très sommaire, cet étalonnage est suffisant pour recaler les résultats issus de simulations sur les résultats expérimentaux.

figure 4
Schéma simplifié du capteur.

figure 5
Modèle électrique –
Condensateur équivalent.

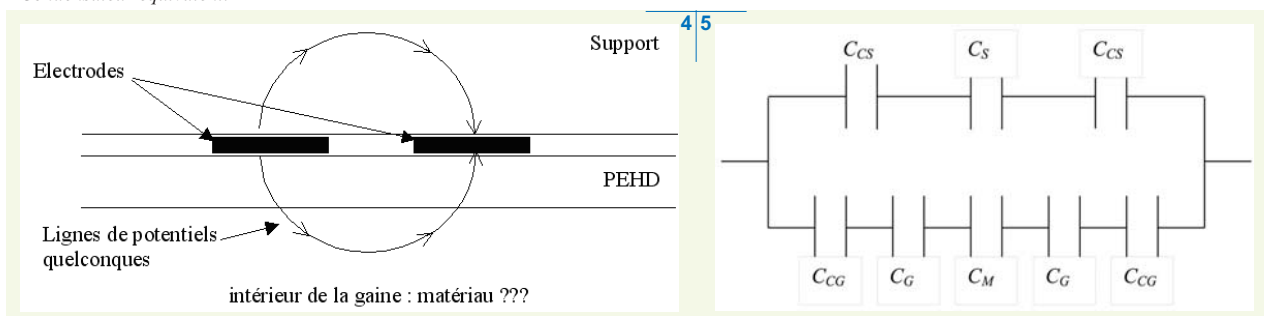
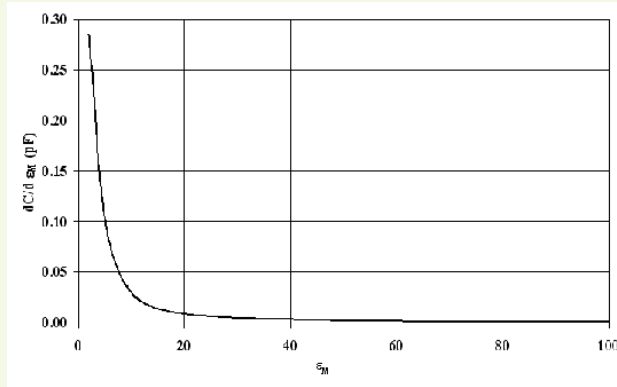


figure 6
Calcul analytique de la sensibilité en fonction de la permittivité du matériau dans le conduit.



L'étalonnage consiste à mesurer la fréquence à la sortie du diviseur $f_D = f_{osc} / 5000$ après avoir mis en contact les électrodes de la sonde avec un condensateur électronique de capacité connue C_R . La capacité des condensateurs électroniques est connue à 20 % de leur valeur nominale, ce qui reste suffisant dans une première approche.

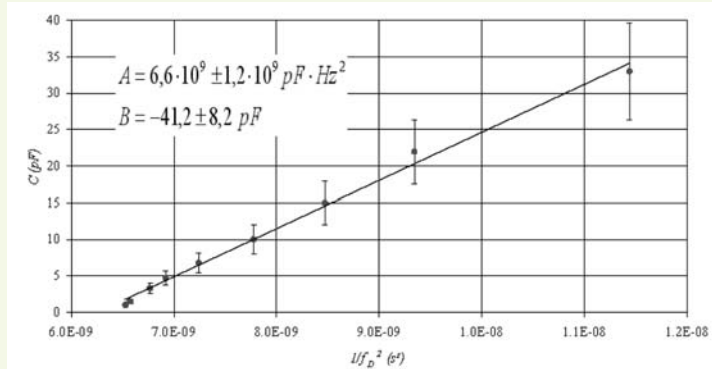
En négligeant les capacités de contact entre électrodes et la capacité de référence C_R et en combinant les équations (1) et (3), on montre que la capacité mesurée C_R est de la forme :

$$C_R = \frac{A}{f_D^2} + B \quad (5)$$

$$\text{avec } A = \frac{1}{10^8 \pi^2 L} \text{ et } B = -\frac{C_S C_{CS}}{2C_S + C_{CS}}$$

La **figure 7** montre les résultats de l'étalonnage avec les valeurs des coefficients A et B .

figure 7
Étalonnage de la sonde capacitive.



SIMULATIONS – CARACTÉRISATION DE LA SONDE CAPACITIVE

Comme dans le modèle analytique, on cherche à évaluer de manière théorique la capacité entre les électrodes de la sonde qui dépend naturellement de la géométrie des électrodes et des matériaux constitutifs du conduit de précontrainte. L'intérêt du calcul par éléments finis tient à sa capacité à prendre en compte des géométries complexes de conduit, soit selon une section à travers un modèle à deux dimensions (2-D), soit en considérant une géométrie complète en trois dimensions (3-D), et à simuler des défauts de géométries et de natures variables.

■ Modèle aux éléments finis

Le problème posé fait appel à la propagation des ondes électromagnétiques dans le conduit et il faut résoudre les équations de Maxwell dans ce milieu plus ou moins complexe. Auparavant, il est intéressant de regarder l'expression de la capacité (4) où l'on remarque que seule la permittivité relative du matériau équivalent entre les électrodes est susceptible de varier en fonction de la fréquence (2). De nombreux travaux de recherche se sont intéressés à caractériser l'eau, qu'elle soit sous forme de liquide ou de solide [8], en fonction de la température ou de la salinité [9, 10]. Un graphe (figure 8) tiré de la référence [8] donne la permittivité relative de l'eau et de la glace en fonction de la fréquence et les paramètres de Debye identifiés. On remarque que la permittivité relative de l'eau présente trois domaines différents en fonction de la fréquence considérée :

- une partie sensiblement constante correspondant aux basses fréquences ($\ll f_r$) ; dans cette partie ϵ' est sensiblement égale à la permittivité relative statique et la partie imaginaire ϵ'' est nulle ;
- une zone autour de la fréquence de relaxation correspondant à une transition brusque de la partie réelle et une augmentation de la partie imaginaire, siège d'une absorption des ondes électromagnétiques ;
- une partie sensiblement constante à haute fréquence ($\gg f_r$) ; dans cette région, la partie imaginaire ϵ'' est nulle.

Mais le comportement de deux ou plusieurs matériaux adsorbés les uns aux autres (le coulis est effectivement constitué de plusieurs matériaux : eau, adjuvant, ciment), de permittivités et de conductivités différentes, conduit à ce que l'on appelle des phénomènes de polarisation interfaciale, dont la théorie de Maxwell-Wagner donne une représentation approchée [11]. Il apparaît alors un ou plusieurs domaines d'adsorption d'énergie pour lequel ϵ'' n'est plus nulle. Lorsque l'eau est adsorbée ou liée à d'autres matériaux comme du sable ou du ciment, il a été montré [2, 12], que le domaine de Maxwell-Wagner se trouvait à des fréquences inférieures à 10 MHz.

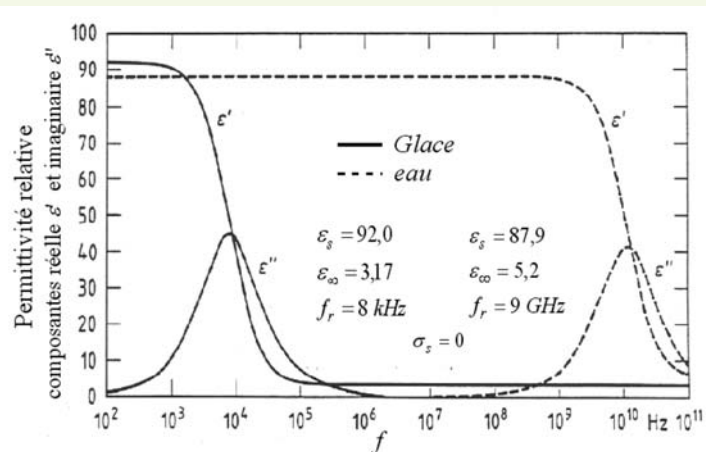
Si l'on mesure la permittivité relative du matériau complexe (conduit de précontrainte) autour d'une fréquence centrale comprise entre le domaine de polarisation interfaciale (10 MHz) et le domaine de polarisation dipolaire (pour l'eau environ 10 GHz), la permittivité peut être considérée comme indépendante de la fréquence. Ceci explique la fréquence de travail d'environ 30 MHz adoptée dans les années soixante-dix [2] qui après des études expérimentales pour l'auscultation des conduits de précontrainte a été augmentée à 65 MHz.

Dans ces conditions, la modélisation des ondes électromagnétiques se propageant dans le conduit peut se résoudre de manière statique, ce qui revient à résoudre l'équation (6) dans tout l'espace du conduit en tenant compte des conditions aux limites imposées par les électrodes :

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = 0 \quad (6)$$

où Φ représente le potentiel.

figure 8
Permittivité relative de l'eau en fonction de la fréquence [8].



La capacité entre les électrodes est calculée par intégration de la densité d'énergie électrique sur tout le domaine.

L'ensemble des modélisations par éléments finis de la sonde capacitive dans différentes configurations de mesure a été réalisé avec le logiciel COMSOL [13], notamment la partie électrostatique généralisée du module électromagnétique, qui prend en compte les matériaux conducteurs et diélectriques.

■ Comparaison des modèles analytique et aux éléments finis

La première modélisation que nous proposons d'étudier en 2-D, correspond au modèle analytique présenté auparavant (cf. [figure 4](#)) où les électrodes sont coplanaires. Cela permettra de confronter le modèle analytique à une modélisation par éléments finis. La troisième dimension (dans le sens longitudinal des électrodes) est prise en compte dans le calcul de la capacité au moment de l'intégration sur tout le domaine de la densité d'énergie électrique.

Afin de minimiser les effets de bord, les dimensions géométriques du domaine sont prises grandes devant la largeur des électrodes (rapport de 100 à 1). Le domaine est donc constitué de trois sous-domaines ([figure 9](#)) :

- le support, de permittivité relative $\varepsilon_s = 30$ (compte tenu du coefficient d'étalonnage B et du facteur géométrique χ) ;
- le conduit en PEHD, de permittivité relative $\varepsilon_G = 2,5$;
- le matériau uniforme, sous le conduit, de permittivité relative variable (entre l'air $\varepsilon_M = 1$ et l'eau $\varepsilon_M = 80$).

Les conditions aux limites externes au domaine sont choisies comme étant isolées électriquement. Seules les conditions aux limites représentatives des électrodes sont choisies comme étant à un potentiel -1V pour l'électrode de gauche et $+1\text{V}$ pour celle de droite. Après maillage (par défaut), le potentiel électrique est calculé en chaque nœud pour chaque valeur de permittivité relative ε_M du sous-domaine représentant l'intérieur du conduit.

La [figure 10](#) présente une comparaison de la sensibilité en fonction de la permittivité relative du matériau des capacités calculées avec le modèle analytique d'une part, issues du calcul par éléments finis d'autre part. On note un bon accord entre ces deux courbes.

Considérons maintenant la géométrie courbe de la sonde capacitive (cf. [figure 2](#)). Les conditions aux limites et les sous-domaines sont en tous points identiques à ceux du cas précédent. La [figure 11](#) montre que la sensibilité est légèrement différente selon que l'on considère la géométrie de la sonde courbe ou pas. Quant au modèle analytique, il peut être ajusté à la sensibilité déterminée par élé-

figure 9
Modèle aux éléments
finis 2-D électrodes
coplanaires.

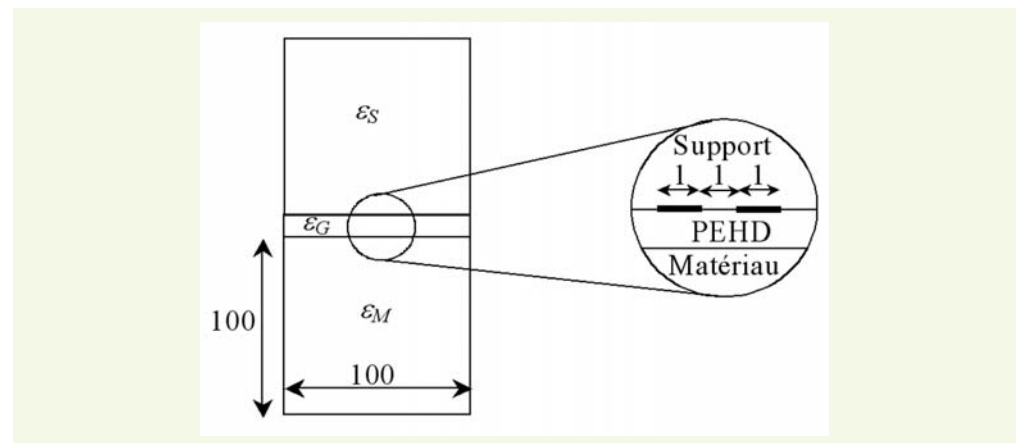


figure 10

Calcul de la sensibilité en fonction de la permittivité du matériau dans le conduit.

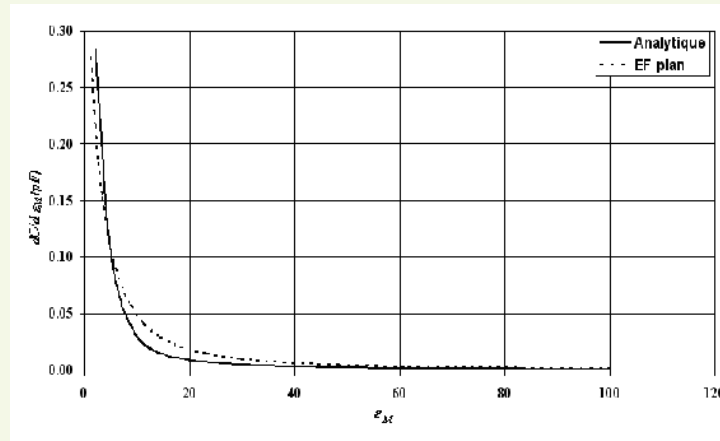
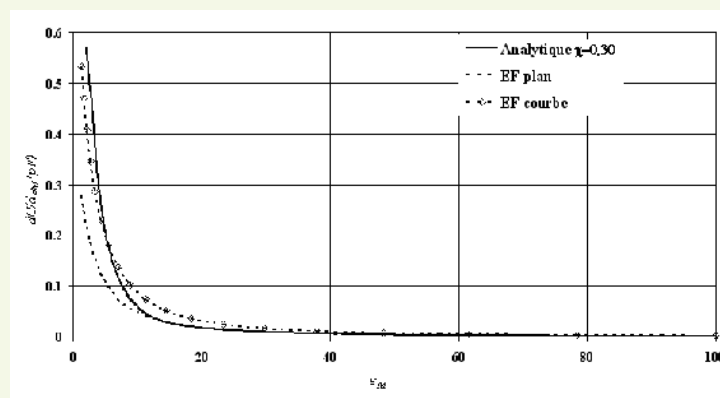


figure 11

Comparaison entre modèles analytique et par éléments finis des résultats du calcul de la sensibilité en fonction de la permittivité du matériau dans le conduit.



ments finis en prenant un facteur géométrique $\chi = 300$ mm soit le double de la réalité. Le modèle analytique présenté pourrait être implémenté dans le logiciel d'acquisition afin de permettre une interprétation rapide des résultats *in situ* lors de la prise de mesures. Bien évidemment, ceci ne remplacera pas une analyse plus poussée utilisant des outils plus perfectionnés reposant sur des techniques de tomographie électromagnétique [14-16].

■ Sensibilité spatiale de la sonde capacitive

En complément de la sensibilité en fonction de la permittivité relative du matériau inclus dans le conduit, il est intéressant de connaître la part de la capacité mesurée qui doit être attribuée à chaque zone du matériau considéré. Cette sensibilité servira d'indicateur sur la zone auscultée par la sonde capacitive.

Pour ce faire, on a réalisé un modèle aux éléments finis 2-D en fonction de différentes permittivités relatives du matériau contenu dans le conduit (**figure 12a**). Pour chaque zone considérée (**figure 12a**), on a calculé la capacité, sachant que la somme de ces capacités élémentaires représente la capacité mesurée par la sonde. La **figure 12b** présente la part des capacités élémentaires C_{Zone} conduisant à la capacité totale mesurée par la sonde.

La capacité mesurée par la sonde dépend à environ 70 % de la capacité provenant du conduit en PEHD. Plus la zone considérée s'éloigne de la paire d'électrodes, moins la capacité mesurée dépend de cette zone. Comme nous avons vu que la sensibilité de la sonde était limitée à des permittivités relatives inférieures à environ 20 (**figure 11**), la **figure 12b** nous permet de définir la zone auscultée

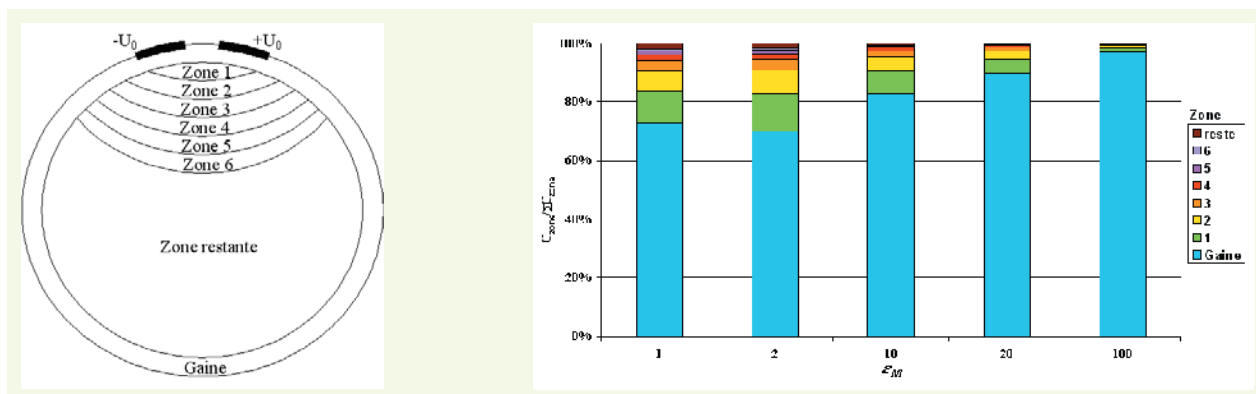


figure 12

Sensibilité spatiale de la capacité mesurée pour différentes permittivités relatives du matériau contenu dans le conduit.
a : Définition des zones de mesures.
b : Proportion de la capacité mesurée en fonction de la zone considérée.

par la sonde. Cette zone d'investigation est comprise entre la paire d'électrodes et la zone 3, ce qui représente un peu plus de 97 % de la capacité totale mesurée.

La zone d'auscultation est d'autant plus confinée au voisinage immédiat de la paire d'électrodes que la permittivité relative du matériau à l'intérieur du conduit est grande. Par conséquent, une faible couche d'eau près du conduit en PEHD masquera complètement le matériau au cœur du conduit.

On peut de ce fait observer des variations notables de capacité induites par une simple variation des propriétés diélectriques du conduit en PEHD ou de son épaisseur, ce qui risque d'être interprété comme un défaut.

■ Influence du retrait du coulis

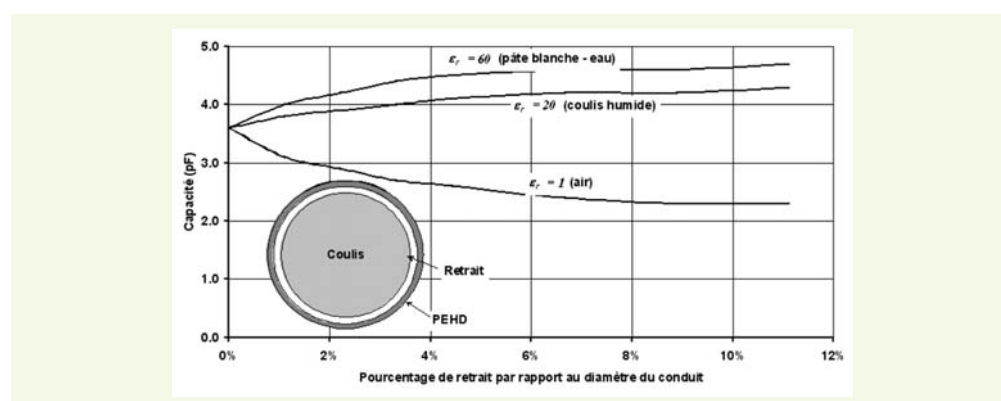
En complément de cette étude de sensibilité spatiale, il paraît intéressant de regarder l'influence du retrait du coulis sur la mesure de capacité et notamment il est important de montrer si la sonde capacitive permet de faire la différence entre un mauvais remplissage et un retrait normal du coulis.

En effet, en durcissant le coulis se rétracte légèrement (1 % du diamètre environ), laissant apparaître une couronne d'espace « vide » entre le coulis et l'intérieur du conduit en PEHD. Cet espace est en général rempli d'air, mais, on peut bien évidemment imaginer que de l'eau vienne le remplir suite à une infiltration. On considère que le reste du conduit est rempli de coulis $\epsilon_r = 7$.

On a alors modélisé ce phénomène par éléments finis 2-D, en calculant la capacité mesurée en fonction de l'épaisseur de la couronne et du matériau remplissant la couronne. La **figure 13** montre les variations de la capacité mesurée en fonction du retrait (en pourcentage du diamètre du conduit) qui peut être rempli de trois matériaux différents (de l'air, du coulis humide et de l'eau). Lorsque l'épaisseur relative du retrait est nulle (absence de retrait), la capacité mesurée vaut 3,6 pF.

figure 13

Influence du retrait sur la capacité mesurée.



Dans le cas d'un retrait classique, de l'ordre de 1 % du diamètre et rempli d'air, la capacité mesurée varie d'environ 14 %, alors que, lorsque l'espace entre le coulis et le conduit augmente de 10 % (on parlera alors de mauvais remplissage), la variation de capacité mesurée est de l'ordre de 40 %. En termes de fréquence, ceci correspond respectivement à des variations de 0,6 % et de 1,5 %, ce qui est parfaitement discernable puisque la dérive de la fréquence observée sur une journée est de l'ordre de 0,06 %. Même dans le cas d'un remplissage avec de l'eau, il sera facile de distinguer un retrait d'un mauvais remplissage au coulis du conduit.

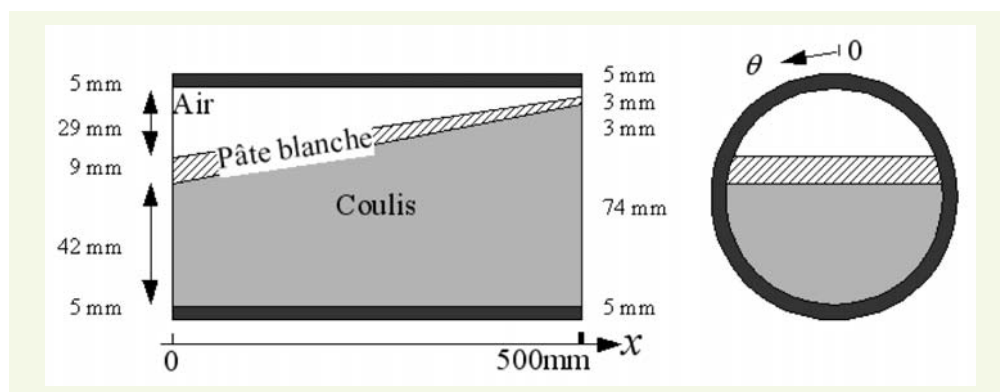
VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Après avoir modélisé et caractérisé la sonde capacitive, on va confronter les résultats issus de calculs avec les mesures expérimentales faites sur une éprouvette de conduit de précontrainte extérieure présentant des « défauts » simulés.

■ Description de l'éprouvette de laboratoire

L'éprouvette utilisée nommée « Pâte » est constituée d'un conduit en PEHD de 500 mm de long, de diamètre extérieur 90 mm et d'épaisseur 5 mm contenant un coulis en forme de biseau, surmonté d'une couche biseautée de pâte blanche, surmontée enfin d'une couche d'air (figure 14). L'éprouvette est obturée par deux bouchons hermétiques afin de conserver au mieux l'humidité de la pâte blanche et du coulis.

figure 14
Schéma de l'éprouvette
« Pâte ».

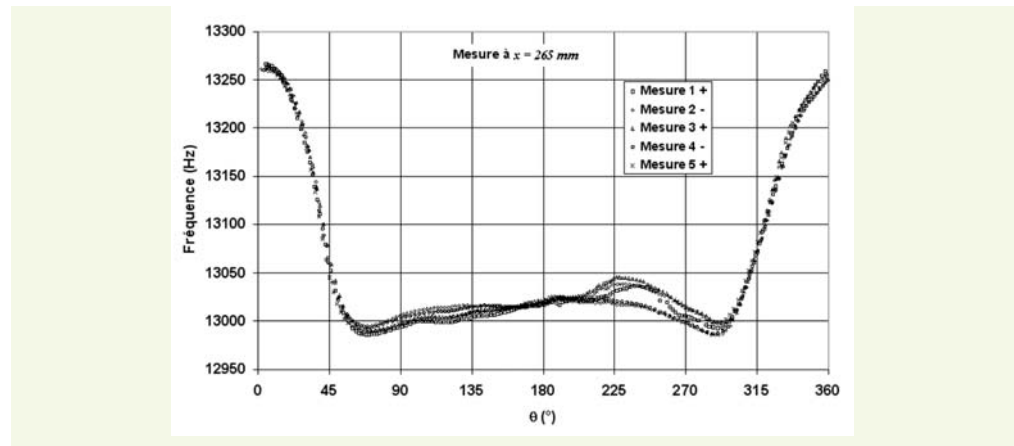


■ Mesures expérimentales en fonction de θ

Le centre des électrodes (dans le sens longitudinal) est positionné à l'abscisse $x = 265$ mm. On mesure la fréquence à la sortie du diviseur en fonction de l'angle θ dans le sens positif (noté +) et dans le sens négatif (noté -). En tout, cinq mesures ont été enregistrées et sont affichées sur le graphique (figure 15). On distingue parfaitement l'effet du sens de rotation qui est certainement imputable à la préemption de la sonde capacitive. Néanmoins, l'écart type de répétabilité s'étend de 2 à 12 Hz, soit en moyenne de l'ordre 5 Hz, ce qui est comparable à la dérive de la sonde sur une journée qui a été estimée à 7 Hz. De plus, en appuyant plus ou moins sur la sonde, on a relevé une variation de fréquence d'environ 10 Hz.

La fréquence mesurée est symétrique par rapport à l'axe passant par $\theta = 0^\circ/180^\circ$, ce qui correspond bien à la symétrie de l'éprouvette « Pâte ». À $\theta = 0^\circ$, lorsque la paire d'électrodes se trouve au droit de la zone contenant de l'air, la fréquence mesurée à la sortie du diviseur est maximum. La fréquence diminue au fur et à mesure que la première électrode se rapproche de la zone de pâte blanche. À $\theta \approx 30^\circ$, la première électrode passe sur la zone contenant la pâte blanche et la fréquence mesurée diminue notablement. Lorsque θ augmente, la fréquence continue à décroître jusqu'au moment où la seconde électrode a dépassé la zone de pâte blanche ($\theta = 70^\circ$). Puis la fréquence augmente lorsque la paire d'électrodes est au droit du coulis jusqu'à se stabiliser pour $\theta = 180^\circ$.

figure 15
Mesures (aller +/retour -)
de la fréquence du diviseur
en fonction de θ .



■ Comparaison des mesures expérimentales et simulées

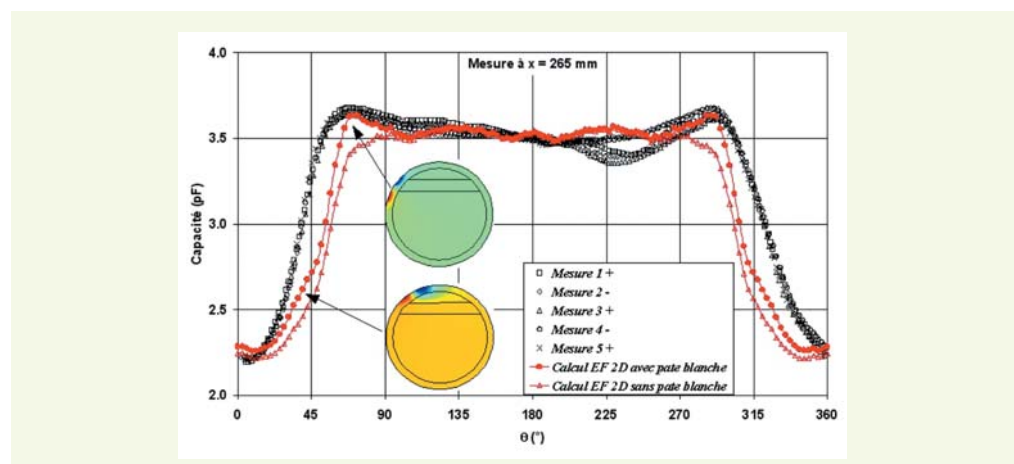
On a simulé la mesure en fonction de θ par un modèle aux éléments finis 2-D de l'éprouvette en considérant les épaisseurs de matière moyenne à l'abscisse $x = 265$ mm. Les résultats sont exprimés directement en capacité en picofarads. En utilisant les coefficients d'étalonnage présentés ci-dessus, on a transformé les fréquences mesurées à la sortie du diviseur en capacité. La **figure 16** montre la comparaison entre mesures expérimentales et résultats de simulation.

On présente deux calculs aux éléments finis 2-D avec et sans pâte blanche tout en conservant un espace d'air identique dans les deux cas. En présence de pâte blanche, on observe sur les fronts montant et descendant des courbes simulées ($\theta = 45^\circ/315^\circ$), un léger épaulement correspondant à la situation où l'une des électrodes est au droit de la pâte blanche et la seconde au droit de la zone remplie d'air. De même, lorsqu'une électrode est au droit du coulis alors que la seconde est au droit de la pâte blanche ($\theta = 70^\circ/290^\circ$), on note une légère augmentation de la capacité mesurée par rapport à une mesure réalisée en regard d'une zone remplie de coulis ($90^\circ < \theta < 270^\circ$). Ces deux « anomalies » dans le signal permettront de détecter la présence d'une couche de pâte humide.

Dans l'ensemble, les mesures expérimentales et les résultats de la simulation aux éléments finis 2-D sont en bon accord. Toutefois, on remarque un léger décalage en angle ($\Delta\theta \approx 15^\circ$) entre les mesures expérimentales et les calculs au niveau des fronts montant et descendant ($\theta = 45^\circ/315^\circ$), qui peut être corrigé en tenant compte de deux problèmes :

- la modélisation est 2-D, alors que cette expérience est 3-D notamment lorsque les électrodes sont au droit de la couche de pâte : une moitié de l'électrode est en regard avec la couche d'air alors que l'autre moitié est en regard avec la couche de pâte ;

figure 16
Comparaison des mesures
expérimentales sur
l'éprouvette « Pâte » et des
résultats de simulation à
l'abscisse $x = 265$ mm.



– la géométrie de l'éprouvette n'est pas forcément bien connue : lors du remplissage à la verticale de l'éprouvette, une fine couche de coulis a pu se déposer et sécher sur la paroi interne du PEHD.

Moyennant quoi, il est possible de recalibrer les résultats de simulation sur les mesures expérimentales à quelque 4° près sur θ . Dans le futur, il conviendra de prendre en compte les conductivités électriques des matériaux afin de reproduire au mieux la réalité dans les simulations.

RÉSULTATS D'AUSCULTATION SUR LE TERRAIN

L'exemple ci-après décrit le cas d'un ouvrage sur lequel a été utilisée la sonde capacitive. Les investigations ont été réalisées par les Laboratoires régionaux des ponts et chaussées d'Autun et de Toulouse.

Cette étude a fait l'objet, dans un premier temps, d'une inspection détaillée de la précontrainte extérieure, accompagnée de sondages au marteau pour détecter la présence de « vides » à l'intérieur des conduits. Cette inspection a permis de constater la présence de défauts importants, susceptibles de générer une dégradation de la précontrainte :

- des vides non négligeables au niveau des points hauts dans les conduits (au droit des piles) ; ces vides « probables » sont mis en évidence par des sons cavernes sous les chocs d'un marteau ; ils affectent notamment le voisinage de la pile rive droite où ces défauts ont été notés sur la totalité du périmètre (d'où probablement un vide complet du conduit en point haut) ;
- la présence de zones sonnantes creux dans les conduits de précontrainte suivant la génératrice supérieure ; bien que ce défaut touche régulièrement quelques mètres de conduit, il est très localisé sur la génératrice supérieure du conduit (sur une largeur de 2 à 3 cm) ; il est probable que les câbles sont protégés en totalité (ou en quasi-totalité) par le coulis de ciment ; ce défaut ne semble donc pas avoir de caractère de gravité ;
- la présence d'une pâte blanchâtre, encore humide, en partie haute, près de la pile rive droite a été constatée au niveau d'un échantillon, dans un conduit présentant un défaut d'injection et sonnante creux sous les coups d'un marteau ;
- la présence d'eau à l'intérieur du câble A, au niveau du massif d'ancrage rive gauche ; cette eau a été mise en évidence par enlèvement du tuyau équipant l'échantillon, au niveau du capot d'ancrage.

Puis dans un deuxième temps, le LRPC d'Autun a procédé à une auscultation de ces conduits à l'aide de la sonde capacitive, ce qui a permis :

- de confirmer la présence de vides en mettant en évidence leur faible (retrait) ou moyenne importance (**figure 17**) ;
- de détecter des vides non repérés lors du sondage au marteau (travée rive gauche) ;
- de localiser des zones avec présence de pâte blanche et d'humidité (**figure 18**).

Les résultats ainsi obtenus à l'aide du capteur ont été confirmés par la réalisation de fenêtres ou d'ouvertures circulaires (**figure 19**). Cependant, comme le laissait entrevoir l'étude sur la sensibilité en fonction de la permittivité, dans un cas d'un retrait rempli d'eau une mesure circulaire n'a pas permis de prédire la présence d'eau.

De plus, on remarque sur la **figure 18**, après le premier épaulement (indiqué par une flèche blanche), que la mesure de la capacité est perturbée par la présence des câbles d'acier probablement proches du conduit en PEHD.

figure 17
Relevé longitudinal sur la
génératrice supérieure du
conduit.

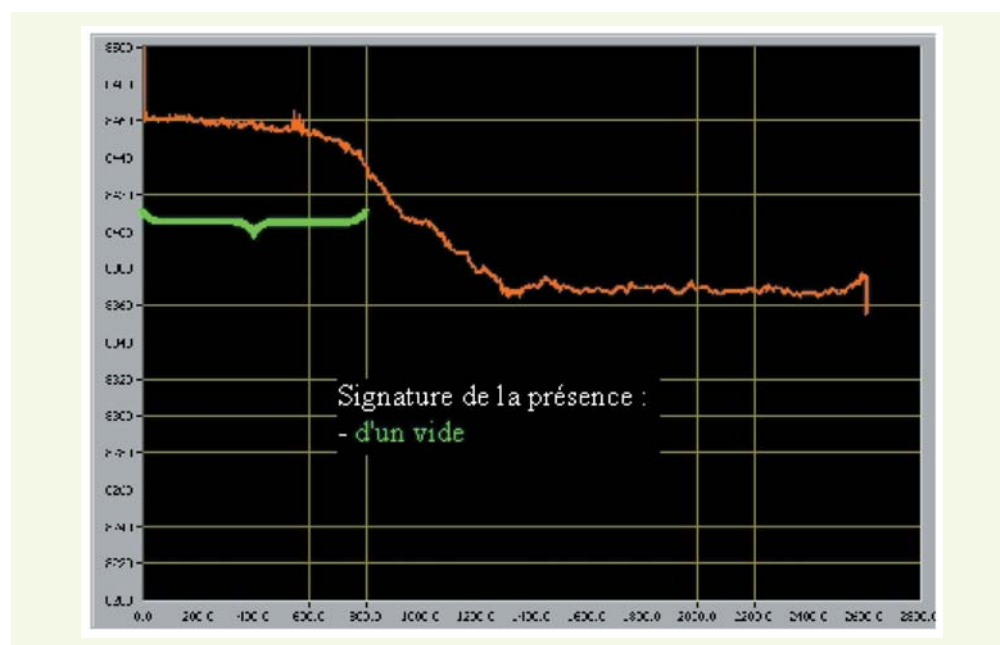
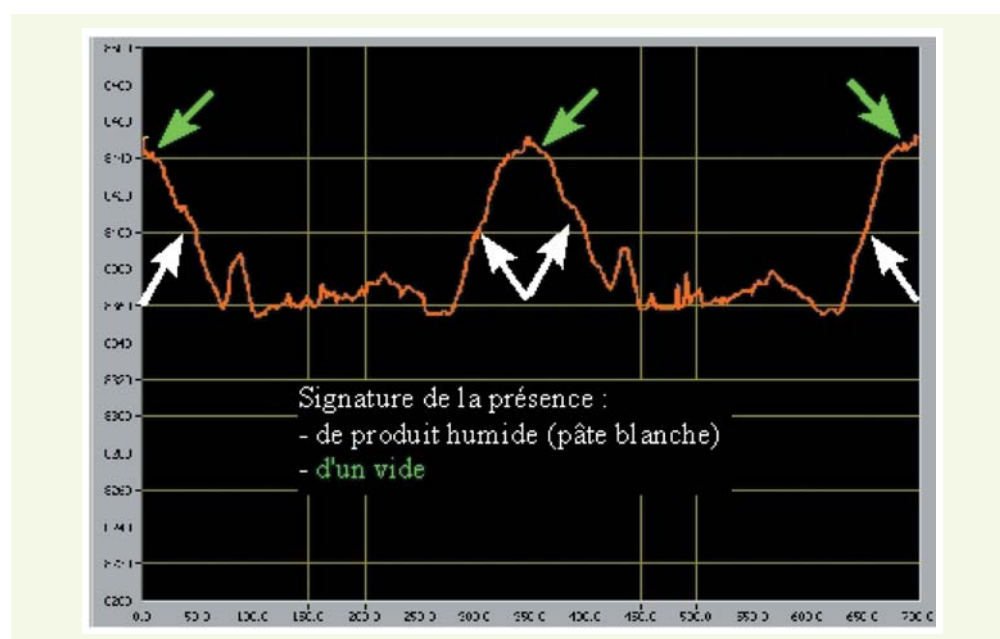


figure 18
Relevé circulaire (2 tours)
au droit de la zone de vide
repérée dans l'expérience
précédente (figure 17).

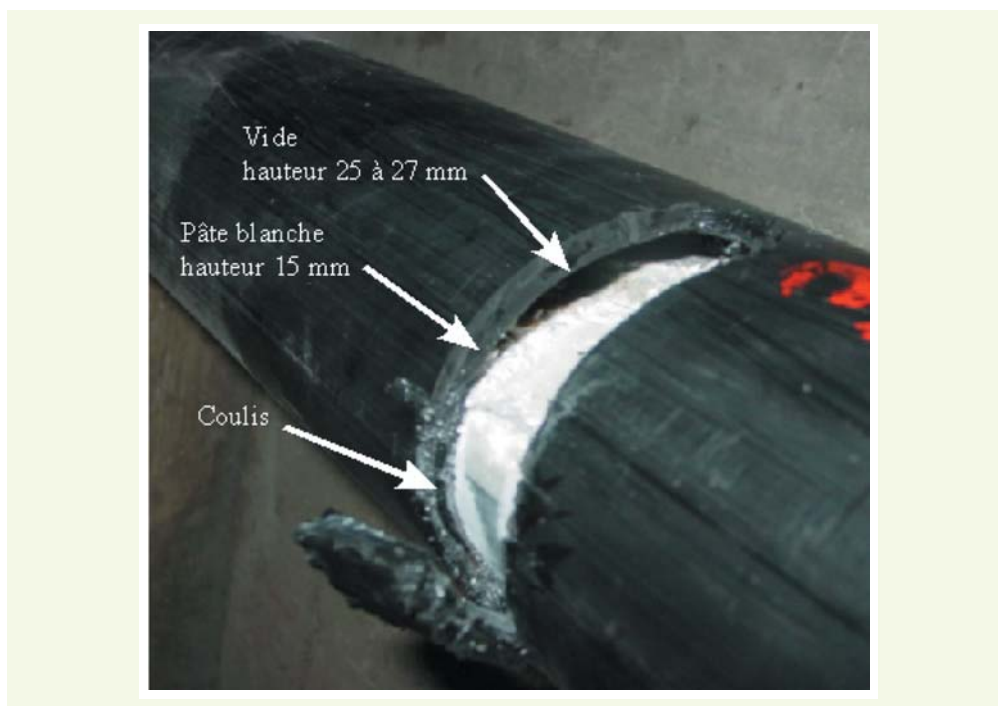


CONCLUSION

Cette étude contribue à quantifier les performances de la sonde capacitive actuelle pour l'auscultation de la protection des câbles de précontrainte extérieure. L'étalonnage proposé permet de comparer quantitativement des mesures expérimentales et des résultats de simulation.

Bien qu'extrêmement simple, le modèle analytique présenté donne des résultats en bon accord avec des résultats de calculs aux éléments finis. Ce modèle pourrait être implémenté dans le logiciel d'acquisition pour une analyse des résultats *in situ* et en temps réel afin d'alerter l'inspecteur d'ouvrage lors de la prise de mesure.

figure 19
Fenêtre rectangulaire au
droit du relevé circulaire
(figure 18).



L'étude de la sensibilité de la sonde capacitive a permis de dégager deux conclusions intéressantes :

- sensibilité en fonction de la permittivité : on a montré que la sensibilité de la sonde ne varie pas linéairement en fonction de la permittivité relative du matériau dans le conduit ; elle est grande lorsque la permittivité relative est comprise entre 1 (air) et 20 (coulis humide) mais quasiment nulle au-delà, ce qui laisse entrevoir que la distinction entre des matériaux plus ou moins humides, notamment entre de l'eau et du coulis humide, sera difficile ;
- sensibilité spatiale : on a montré que la sensibilité spatiale de la sonde, c'est-à-dire la zone auscultée entre les deux électrodes, est confinée au voisinage du conduit en PEHD ; de plus l'essentiel de la valeur de la capacité mesurée provient du conduit en PEHD (à près de 70 %) ce qui signifie que la sonde est très sensible à une faible variation de ce matériau soit en géométrie (épaisseur) soit en permittivité relative.

Bien que les simulations (analytique ou par calcul aux éléments finis) ne tiennent pas compte de la conductivité électrique des matériaux, on a pu identifier la variation de capacité en présence de pâte blanche. Pour affiner la compréhension du fonctionnement de la sonde capacitive, il conviendra de tenir compte dans les modèles de la conductivité électrique des matériaux (coulis, pâte blanche), notamment en cas de présence de câbles d'acier dans le conduit.

Enfin, on a montré par des simulations numériques et par des mesures expérimentales que la sonde capacitive permet de détecter facilement un vide et de la pâte blanche. De plus, la sonde capacitive permet de distinguer le cas d'un retrait de coulis d'un mauvais remplissage du conduit, ce qui ne permet pas l'auscultation au marteau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **LE ROY R.**, *Rhéologie et stabilité des matrices cimentaires et des coulis : Applications à l'amélioration de la durabilité de la précontrainte*, 2006, ERLPC, OA53, 84 pages.
- 2 **TRAN N.L. et al.**, *Mesure de la teneur en eau des sols par les méthodes électriques. Étude d'une méthode capacitive*, rapport de recherche n° 5 du LCPC, mars 1970.
- 3 **TRAN N.L. et al.**, *Mesure de la teneur en eau des sols et des matériaux par une méthode capacitive*, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 1972, 60, pp. 155-165.
- 4 **DUPAS A., SUDRET J.-P., CHABERT A.**, *Méthode de diagnostic de câbles de précontrainte externe contenu dans des gaines*, Brevet d'invention n° 0107719, 2001.
- 5 *Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants*, <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>
- 6 **DEBYE P.**, *Polar molecules*, *The Chemical Catalog Company*, New York, 1929.
- 7 **COLE K.S., COLE R.H.**, Dispersion and adsorption in dielectrics : I alternating current characteristics, *Journal of Chemical Physics*, 1941, volume 9, pp. 341-351.
- 8 **KAATZE U.**, *Microwave aquametry*, A. Kraszewski Ed., IEEE Press, 1996.
- 9 **AYARI M.Y. et al.**, Marine oil-spills electromagnetic scattering model using two-scale model, *ECPS 2005 Conference*, 15-18 March 2005, Brest, France.
- 10 **HASTED J.B.**, *Aqueous dielectrics*, Chapman and Hall, 1973.
- 11 **FOURNIÉ R., COELHO R.**, Diélectriques - Bases théoriques, *Techniques de l'Ingénieur*, février 2000, volume D2 300.
- 12 **KEDDAM M., TAKENOUTI H., NOVOA X.R., ANDRADE C., ALONSO C.**, Impedance measurements on cement paste, *Cement and concrete research*, 1997, 27, pp. 1191-1201.
- 13 <http://www.comsol.com/>
- 14 **BANGLIANG S. et al.**, The use of simultaneous iterative reconstruction technique for electrical capacitance tomography, *Chemical Engineering Journal*, 2000, 77, pp. 37-41.
- 15 **GOMEZ S. et al.**, Reconstruction of capacitance tomography images of simulated two-phase flow regimes, *Applied Numerical Mathematics*, 2003, 46, pp. 197-208.
- 16 **VAUHKONEN M. et al.**, A matlab package for the EIDORS project to reconstruct two-dimensional EIT images, *Phys. Measurement*, 2001, 22, pp. 107-111.