

# Auscultation du béton précontraint par radiométrie micro-onde

**Xavier DÉROBERT**  
ITPE

Section Reconnaissances et géophysique  
Division Reconnaissance et mécanique des sols

**Yves LEROY**  
Professeur émérite

**Ahmed MAMOUNI**  
Maître de conférence  
Docteur ès sciences

Institut d'Électronique et de micro-électronique du Nord  
Département Hyperfréquences et semi-conducteurs  
Université des Sciences et technologies de Lille

## RÉSUMÉ

L'un des objectifs de recherche du Laboratoire central des Ponts et Chaussées, dans le domaine des ouvrages d'art, concerne l'étude et le développement de techniques de contrôle non destructif. Dans ce contexte, une étude a porté sur la faisabilité du contrôle d'injection de coulis dans les gaines de béton précontraint par radiométrie micro-onde.

Après une présentation de la technique micro-onde, qui consiste en la mesure du bruit thermique émis par le béton, ce travail aborde l'influence de la teneur en eau dans le béton sur le signal radiométrique obtenu lorsque l'on chauffe localement la gaine. Les études théoriques et expérimentales montrent que, pour obtenir une modélisation correcte, il est nécessaire de tenir compte du gradient de permittivité du béton dans le calcul des paramètres de couplage entre l'antenne micro-onde et le milieu.

Cette étude montre les potentialités de la radiométrie micro-onde en ce qui concerne la mesure de la température volumique à cœur de matériaux de génie civil, de même que la possibilité de détecter des absences locales d'injection de gaines.

**MOTS CLÉS :** 32 - Auscultation - Béton précontraint - Micro-onde - Mesure - Rayonnement - Contrôle - Non destructif - Injection (matér.) - Coulis - Teneur en eau.

## Introduction

Le besoin de connaître l'état effectif des ouvrages en service est primordial pour répondre à des problèmes de sécurité vis-à-vis des usagers, ainsi qu'aux problèmes de trafic et de gestion des routes. Les études liées à cette surveillance s'intéressent à l'état de contraintes mécaniques de l'ouvrage, pour savoir si la structure portante est suffisamment dimensionnée, pour un trafic routier toujours en évolution.

Les recherches conduites au sein du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) participent à la gestion technique de l'entretien du parc national des ouvrages d'art [1]. En effet, les ouvrages, pour garder un état de service satisfaisant, doivent être surveillés, entretenus et réparés si nécessaire. Ceci est particulièrement important pour les ouvrages en béton précontraint.

## Ouvrages en béton précontraint

Lors de la construction d'un ouvrage en béton précontraint, on installe des gaines dans les coffrages avant le coulage du béton, qui serviront de guides. Les câbles sont tendus et ancrés aux extrémités. Après mise en tension, les gaines sont injectées à l'aide d'un coulis de ciment.

La qualité de l'injection s'avère essentielle pour la durabilité des ouvrages en béton précontraint, du fait d'un phénomène particulièrement dangereux : la corrosion des aciers sous tension. À partir de 1970, on considère que les méthodes d'injection des coulis ont été mieux respectées, notamment parce que la gammagraphie venait d'apparaître dans certains Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) et pouvait donc servir comme contrôle pour la réception des ouvrages [2].

## Le système d'auscultation « SCORPION »

Le LRPC de Blois est spécialisé, depuis 1968, dans le contrôle non destructif par radiographie gamma des ouvrages d'art en béton précontraint.

Si, à l'époque, la technique radiographique était bien connue dans le domaine médical ou industriel (contrôle de soudures en particulier), le Laboratoire régional de Blois fut l'un des premiers à l'appliquer au béton, en utilisant, non pas des rayons X comme en médecine, mais des rayons gamma de plus haute énergie [3]. L'épaisseur maximale de béton contrôlable était alors de 60 cm, avec des temps d'exposition n'excédant pas trente minutes, pour l'obtention de clichés photographiques.

À partir de cette technique, a été étudié, mis au point et breveté un système de radioscopie télévisée capable d'ausculter en temps réel des épaisseurs de béton de 40 à 45 cm. Dans ce cas, le film radiographique est remplacé par un dispositif qui convertit en images visibles les rayons gamma de haute énergie.

Ce système, appelé SCORPION (fig. 1), est apparu comme un appareil tout nouveau, unique en son genre, puisque ce fut sans doute la première utilisation opérationnelle sur ouvrages d'art en béton précontraint d'un système de radioscopie télévisée en haute énergie (fig. 2).

Toutefois, cette technique présente quelques limites. Le travail en transmission ne permet pas une visualisation complète de l'ouvrage, il reste des zones d'ombre. Les règles de sécurité liées au rayonnement n'autorisent pas son utilisation en milieu urbain. Enfin, cette technique est onéreuse et lourde de maniement.

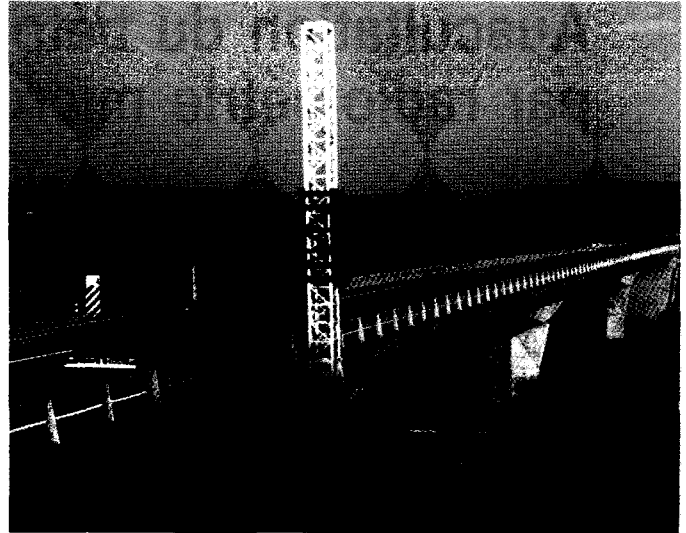


Fig. 1 - Système complet en fin de montage. L'accélérateur et sa baie de modulation sont au premier plan.

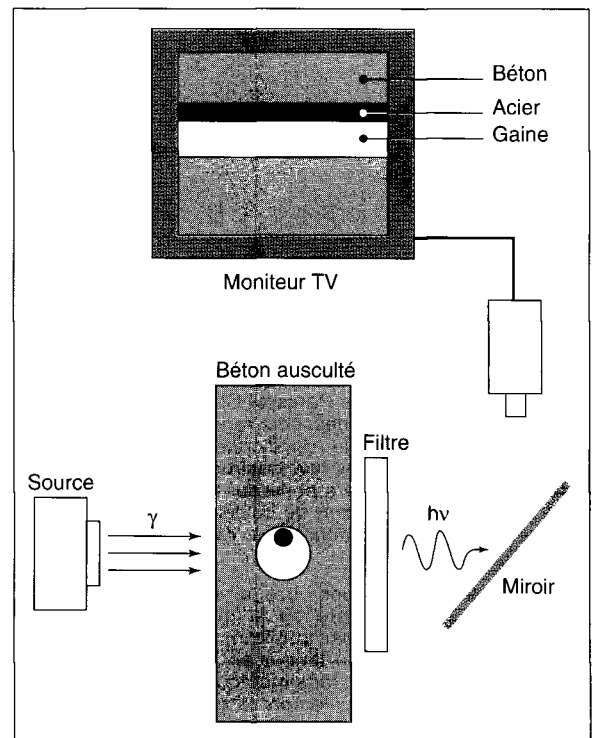


Fig. 2 - Principe du SCORPION.

C'est pourquoi toute autre méthode physique, qui pourrait s'appliquer à l'auscultation des gaines métalliques de précontrainte, ou simplement au contrôle non destructif des ouvrages, intéresse le réseau des LPC, tant au niveau de la recherche qu'au niveau du développement.

## La radiométrie micro-onde

L'idée d'envisager l'utilisation de la radiométrie micro-onde pour l'auscultation des gaines de précontrainte vient du fait qu'aucun type d'ondes, mécaniques ou électromagnétiques (hormis les rayons X et gamma), ne peut traverser une gaine métallique et en ressortir une information exploitable - problème physique pour les ondes électromagnétiques et problème de longueur d'onde, et d'atténuation, pour les ondes mécaniques.

Le principe repose sur le chauffage préalable de la gaine par un moyen électrique, ou inductif. Celle-ci diffuse alors cette énergie à l'intérieur dans le coulis de ciment, et à l'extérieur dans le béton. L'absence locale de coulis dans la gaine entraîne une redistribution des échanges thermiques avec le béton, qui peut être détectée par radiométrie micro-onde.

### Rayonnement du corps noir

Lorsqu'un corps est porté à une température différente du zéro absolu, il émet spontanément un rayonnement de nature électromagnétique, dans une large bande de fréquence, qui transporte de l'énergie et peut se propager dans le vide [4]. L'origine physique du rayonnement électromagnétique, appelé aussi bruit thermique par les électroniciens et spécialistes des télécommunications, provient de l'addition des rayonnements individuels incohérents issus de l'agitation des particules électriques, ou des dipôles, du milieu dissipatif.

Une mesure de ce signal permet ainsi une mesure de la température au sein du matériau sans insertion d'aucun capteur, ce qui en fait son principal intérêt.

Dans le cas le plus simple, le corps noir, considéré comme un étalon de rayonnement, est un radiateur idéal, qui, à une température et pour une longueur d'onde données, émet le maximum de signal. Cette énergie électromagnétique rayonnée, d'origine thermique, correspond, dans un intervalle de fréquence  $\Delta f$  dans la bande des micro-ondes, à une puissance de  $k.T.\Delta f$ , avec  $k$  la constante de Boltzmann et  $T$  la température [5], [6].

De la même façon que le rayonnement électromagnétique peut se propager dans l'espace, il peut être guidé dans des câbles de raccord d'appareils électroniques (ou lignes de transmission). Aussi, il est possible, pour un récepteur adapté à un corps noir, de recueillir l'énergie spontanément émise par celui-ci, par l'intermédiaire d'une antenne. Ainsi, pour un système de bande passante connue, la puissance de bruit thermique ne dépend que de la température du corps noir (cas idéal).

Dans la réalité, les matériaux ayant une permittivité diélectrique différente de celle de l'air présentent une surface partiellement réfléchissante. Ils sont caractérisés par un paramètre  $e(f)$  appelé émissivité qui définit la capacité du matériau à recevoir, ou émettre, un rayonnement. Un matériau d'émissivité  $e(f)$ , à une température  $T'$ , rayonne sur une bande de fréquence  $\Delta f$ , une puissance égale à :

$$P = e(f)kT'\Delta f \quad (1)$$

avec  $e(f) < 1$ .

Il est à noter que l'émissivité d'un matériau est liée au coefficient de réflexion  $\rho(f)$  en surface, par la relation :  $e(f) = 1 - \rho(f)^2$ .

On peut donc obtenir une relation exprimant la puissance reçue par le récepteur :

$$P = \rho(f)^2 kT\Delta f + [1 - \rho(f)^2] kT'\Delta f \quad (2)$$

où  $T$  est la température de bruit du récepteur, à laquelle correspond une puissance de bruit réfléchie par le dioptré antenne-matériau.

Le problème se complique lorsque le matériau réel n'est pas porté à une température uniforme. On considère alors que le matériau est constitué d'une multitude de volumes élémentaires  $\Delta V_i$ , à des températures  $T_i$  constantes sur chacun des  $\Delta V_i$ . L'information liée au rayonnement de chacun des  $\Delta V_i$  dépend de leur position devant l'antenne. Cette information est caractérisée par un paramètre appelé le coefficient de couplage  $C_i$ , qui caractérise le couplage entre le volume  $\Delta V_i$  et l'antenne.

Cette approche correspond tout à fait à celle des « radaristes » qui s'intéressent aux lobes de rayonnement des antennes. Le signal reçu par le récepteur peut s'exprimer par :

$$P = A(f)\sum C_i(f) T_i(f)\Delta f \quad (3)$$

où  $A(f)$  est un coefficient dépendant du capteur.

Les valeurs  $C_i$  peuvent être obtenues par l'application du théorème de réciprocité des antennes, en utilisant le capteur en mode actif. Dans ce cas, un champ électrique  $E_i$  est créé dans le volume élémentaire  $\Delta V_i$ , de conductivité  $\sigma_i$ . La puissance dissipée dans  $\Delta V_i$  peut être assimilée au paramètre  $C_i$ , qui s'écrit alors :

$$C_i \propto \sigma_i(f) |E_i(f)|^2 \Delta f \quad (4)$$

Il est à noter que la permittivité, paramètre électromagnétique complexe caractérisant le matériau, et noté  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ , intervient, dans l'équation (4), dans les termes  $\sigma_i(f)$  et  $E_i(f)$ . Pour des raisons de simplicité, on utilise souvent la permittivité relative  $\epsilon_r^*$  des matériaux en divisant  $\epsilon^*$  par la permittivité de l'air  $\epsilon_0$ .

Pour calculer l'amplitude du champ rayonné en mode actif, une méthode modale a été développée, depuis quelques années, par le Département hyperfréquences et semi-conducteurs (DHS) de l'université des Sciences et technologies de Lille, à travers différentes thèses dont celles de MM. Mamouni [5] et Bocquet [7]. Ces travaux ont permis de valider la méthode modale sur des matériaux à fortes pertes, mais sans beaucoup d'expériences sur des matériaux à faibles pertes.

La fréquence utilisée, à la fois pour le calcul numérique et pour les expérimentations, a été fixée par différents facteurs pour lesquels il a fallu trouver un compromis. L'application envisagée passe par un compromis entre une profondeur de pénétration suffisante, ce qui intéresse les basses fréquences, et un fort pouvoir de résolution obtenu par les hautes fréquences. Nous avons alors retenu une valeur de 1,5 GHz, fréquence qui a déjà été testée et exploitée par l'université de Lille, dans le domaine médical.

Cependant, malgré plusieurs problèmes non résolus, une étude antérieure menée conjointement avec le DHS et le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen sur un enrobé (de permittivité voisine de celle du béton) montre l'intérêt de poursuivre ce type de recherche [7], qui passe par une information volumique sur le lobe de rayonnement en champ proche de l'antenne dans un milieu dissipatif.

## Étude sur le béton

Le béton étant le milieu de propagation des ondes électromagnétiques, il est nécessaire de bien le connaître. Il est composé de granulats et d'un liant, mélange de ciment et d'eau, dans des proportions variables mais se situant autour de :

- granulats : 1 800 kg/m<sup>3</sup>,
- ciment : 400 kg/m<sup>3</sup>,
- eau : 200 kg/m<sup>3</sup>.

Des réactions physico-chimiques se produisent dès le malaxage, correspondant d'abord à la prise du béton, puis à son séchage. On considère qu'à la fin de ce séchage, il reste environ 80 l/m<sup>3</sup> d'eau liée qui ne pourra jamais s'évaporer. Pour ce qui concerne l'eau libre, le séchage naturel du béton est un phénomène extrêmement lent qui s'accompagne, pendant une phase souvent assez longue, d'importants gradients de teneur en eau au voisinage des surfaces [8], [9]. Le béton est donc un milieu dont la permittivité va dépendre principalement de sa teneur en eau.

Quelques études ont été menées dans le réseau des LPC sur la permittivité des bétons, surtout pour des applications d'auscultation électromagnétique [10], [11], [12]. Les résultats, très dispersés, montrent que les valeurs doivent être

prises avec précaution, et que l'incertitude augmente avec la teneur en eau dès que l'on dépasse des valeurs de l'ordre de 8 à 9 %.

Indépendamment de la recherche de la permittivité, le séchage du béton est un problème majeur qui est étudié par le réseau des LPC, car les phénomènes hygrométriques ont des conséquences importantes sur son comportement physique et mécanique, et plus particulièrement sur les déformations différées et sa durabilité [13], [15].

Ces divers résultats complémentaires nous permettent d'avoir une idée approchée de ce que peut être la permittivité relative d'un béton en fonction de la profondeur, surtout pour les vingt premiers centimètres (fig. 3).

L'importance des imprécisions dues à la combinaison de la géométrie du béton sur ouvrage, de son âge et de la nature du granulat utilisé, nous impose donc d'être très prudents sur la valeur d'une permittivité que l'on retiendrait, valeur que l'on prendra constante dans un premier temps.

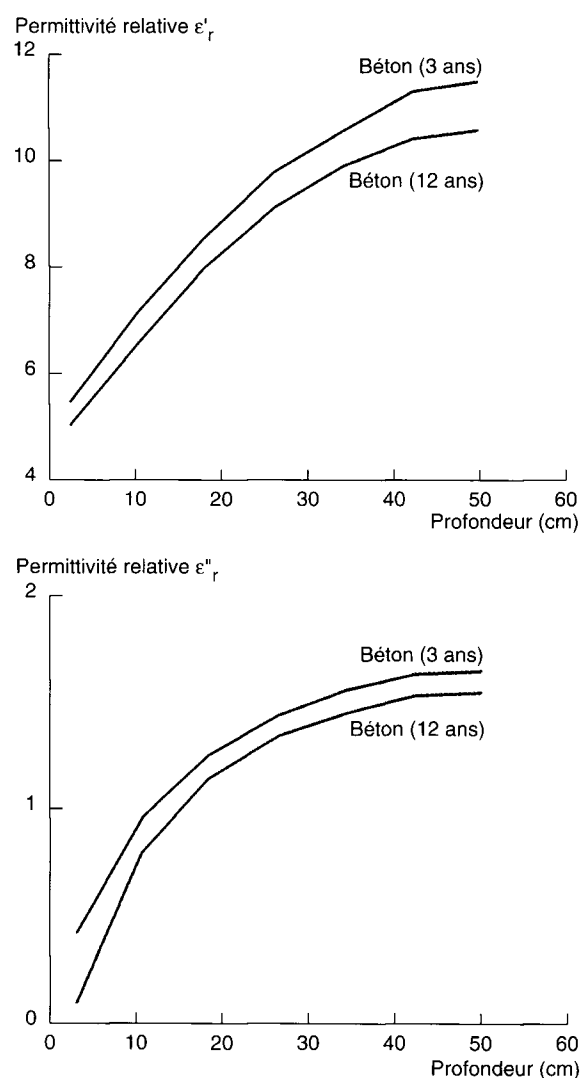


Fig. 3 - Estimation de la permittivité relative ( $\epsilon'_r$  et  $\epsilon''_r$ ) d'un béton en fonction de la profondeur à 1,5 GHz.

## Étude thermique

Pour pouvoir modéliser correctement les signaux radiométriques, il nous faut contrôler le chauffage expérimental et connaître la précision de sa modélisation.

Les dispositifs d'ancrage des câbles de précontrainte étant capotés et injectés de coulis, donc inaccessibles, le chauffage inductif nous a semblé un procédé logique comme moyen de chauffage. Un inducteur a donc été conçu et dimensionné pour répondre au mieux à ce problème. Il a ensuite été testé sur un bloc de béton, conçu pour toutes nos expérimentations (fig. 4).

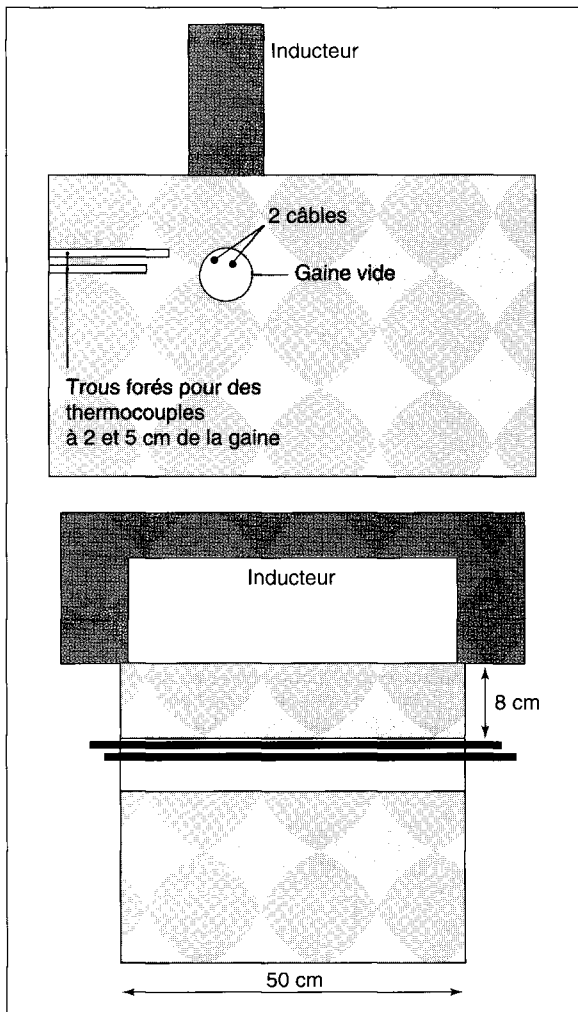


Fig. 4 - Dispositif expérimental.

Les premiers essais thermiques ont été effectués en remplaçant le béton par de l'air, afin de mesurer les élévations de température sur une gaine, partiellement remplie de coulis, à l'aide d'une caméra infrarouge. Le dispositif est sur la figure 5. Un résultat infrarouge est présenté sur la figure 6, le niveau de couleur élémentaire correspondant à une plage de température de 2,7 °C, pour un temps de chauffage de 75 secondes.

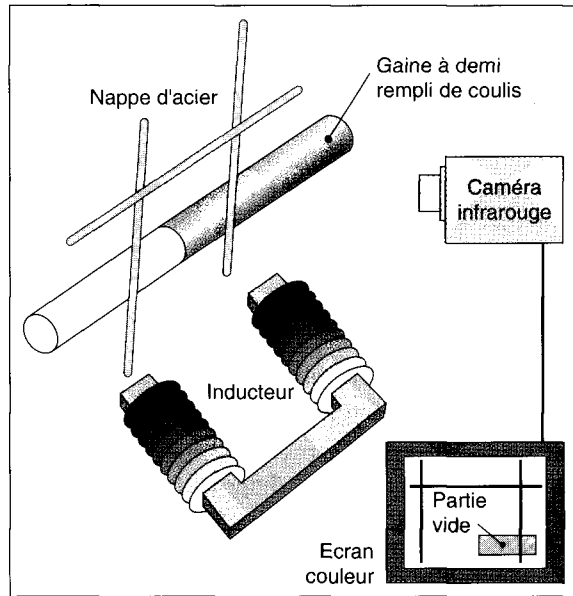


Fig. 5 - Expérimentation infrarouge.

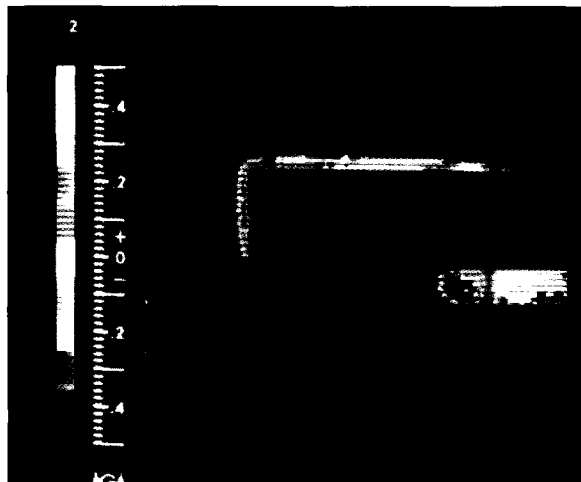


Fig. 6 - Résultat infrarouge du dispositif de la figure 5.

La mesure radiométrique micro-onde que nous allons réaliser correspond au signal de bruit thermique mesuré, en fonction du temps, par une antenne appliquée en différents points de la surface du béton.

La variation de température entre les deux parties, vide et pleine, de la gaine est très franche et de plusieurs degrés, ce qui nous permet de supposer que ce gradient pourrait être détecté par radiométrie micro-onde, étant donné que les deux cas vont produire des échauffements différents dans le volume du béton, d'où des signaux radiométriques différents.

Pour mieux comprendre les phénomènes thermiques qui se produisent au sein du béton, nous avons cherché à modéliser ce chauffage inductif. La forme géométrique simple du problème nous a incité à choisir la méthode des différences finies pour résoudre l'équation de la chaleur,

méthode beaucoup plus simple que celle des éléments finis [16] et [17].

Pour les conditions aux limites, nous avons fait plusieurs hypothèses :

> Tout d'abord, le milieu est considéré comme infini. Cela est justifié par le fait que nous nous trouvons en régime transitoire et que le front thermique n'a pas atteint la surface du béton.

> Nous ne tenons pas compte des pertes par convection à l'intérieur de la gaine.

> Le flux inductif absorbé par la gaine est constant dans le temps.

Cette modélisation est validée par des expérimentations à l'aide du dispositif décrit sur la figure 4. La température est mesurée pendant et après le chauffage, le thermomètre utilisé ayant une sensibilité de 0,1 °C.

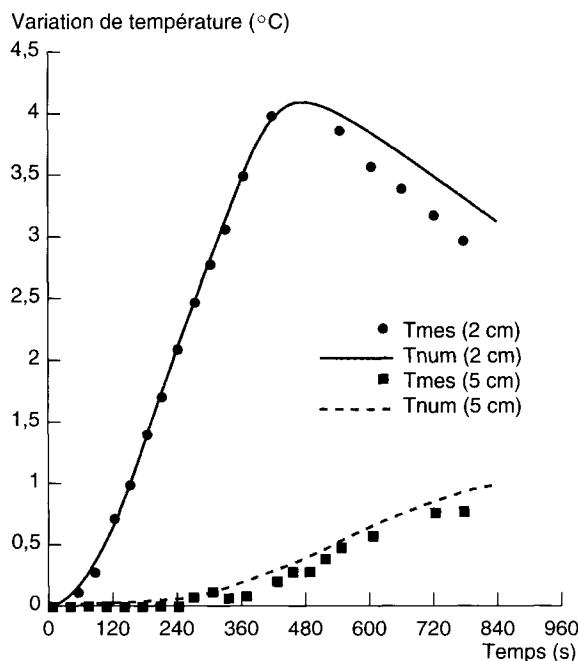


Fig. 7 - Comparaison entre les études numérique et expérimentale de la température, fonction du temps, mesurée par des thermocouples.

La figure 7 montre que notre modèle est parfaitement calé pendant et peu après le chauffage. L'écart entre les pentes de refroidissement, à 2 cm de la gaine, provient du fait que nous n'avons pas intégré de facteur de pertes au niveau de la gaine. Ce phénomène reste toutefois secondaire et nous montre dans quel intervalle de temps nous pourrions mesurer les signaux radiométriques issus du béton.

## Étude radiométrique

Le calcul des signaux radiométriques s'effectue pendant, puis après le chauffage, afin de voir leurs évolutions au cours du temps.

La figure 8 présente les signaux radiométriques pour un béton jeune, de permittivité  $\epsilon_r^* = 11,5 - 1,65j$ , soumis à 6 minutes de chauffage. Les résultats correspondent à différentes positions latérales de l'antenne,  $x$  étant la distance entre le centre de l'antenne et la projection de la gaine sur la surface du béton.

Ces premiers calculs sont encourageants car un radiomètre usuel est capable de détecter un écart de température micro-onde d'environ 0,1 °C pour un temps de mesure de l'ordre de la seconde, valeur que l'on peut réduire en augmentant le temps de mesure (ce qui est possible dans le cas de la présente expérience).

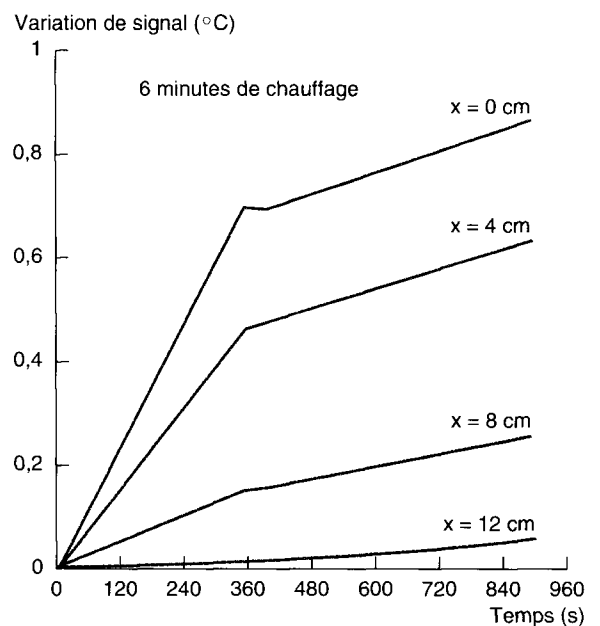


Fig. 8 - Signaux radiométriques calculés pour différentes positions latérales de l'antenne ( $\epsilon_r^* = 11,5 - 1,65j$  et  $f = 1,5$  GHz).

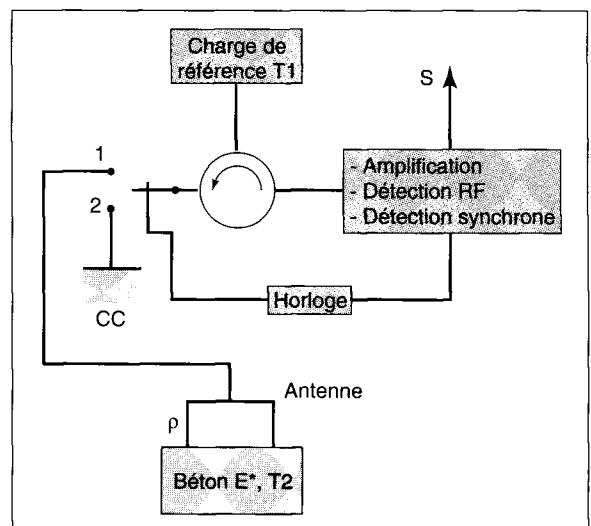


Fig. 9 - Principe de fonctionnement d'un radiomètre micro-onde par une méthode de zéro.

## Matériel radiométrique

Le matériel fourni par le laboratoire d'électronique du DHS est un radiomètre simplifié, conçu principalement pour une étude de faisabilité.

Son fonctionnement est fondé sur une méthode de zéro, couramment employée au DHS [5], [6]. On cherche à annuler le signal de sortie en modifiant la température  $T_1$  d'une charge adaptée (fig. 9). Ce signal en sortie du radiomètre est la combinaison de deux signaux élémentaires résultant de la position 1, ou 2, d'un commutateur hyperfréquence.

Pour chaque position du commutateur commandé par l'horloge, le signal radiométrique correspondant est détecté et amplifié. Le signal de sortie a donc pour valeur :

$$\Delta S = k\Delta f(1 - |\rho|^2)(T_1 - T_2) \quad (5)$$

avec :

$T_2$  : la température du matériau,

$|\rho|^2$  : le coefficient de réflexion.

En théorie, cette méthode permet de s'affranchir du coefficient de réflexion. L'annulation du signal de sortie par la modification de la valeur de la résistance  $T_1$  nous donne directement la température  $T_2$ .

Dans le cas de notre matériel, la température  $T_1$  est constante. Il est donc nécessaire d'étalonner ce radiomètre sur du béton pour exprimer les millivolts enregistrés en termes de variation de température.

## Procédure expérimentale

Le bloc de béton utilisé pour la procédure expérimentale est celui de l'étude thermique. Un thermocouple placé à deux centimètres de la gaine mesure en continu la température à cœur. Cette mesure locale donne une indication sur la dispersion thermique du chauffage inductif et permet donc de valider celui-ci par rapport aux signaux radiométriques.

Ces essais sont effectués dans un hall protégé et aéré, mais pas chauffé et sensible à l'humidité ambiante. Son principal avantage est la présence d'un pont roulant qui nous permet d'éloigner rapidement l'inducteur du bloc pour permettre la mesure radiométrique.

Le radiomètre s'est révélé très sensible aux signaux hyperfréquences accidentels (un four micro-onde fonctionnant dans notre bâtiment sature le radiomètre par exemple), ou aux parasites électriques du secteur lors d'appels de courant fort dans le bâtiment.

Pour limiter ces signaux parasites, nous avons construit une cage de Faraday pouvant contenir

le bloc de béton et le radiomètre. La procédure étant lourde, il s'avère difficile de prendre une mesure moins d'une minute après la fin du chauffage. Cependant, ce problème est limité puisque les mesures se révèlent très stables expérimentalement pendant plusieurs minutes.

## Essais radiométriques

Les essais radiométriques ont été effectués sur une longue période (deux ans) pendant laquelle les conditions thermiques et hygrométriques ont notablement varié. Le béton avait alors environ trois ans d'âge. Nous nous sommes intéressés à des temps de chauffage supérieurs à trois minutes, afin d'avoir des mesures sortant parfaitement du seuil de bruit, d'une part, avec de larges déplacements latéraux de l'antenne, d'autre part. Les mesures enregistrées sont précises à plus ou moins un millivolt, valeur correspondant au niveau de bruit, soit  $\pm 0,08$  °C.

Les différents essais peuvent se distinguer par la température mesurée par un thermocouple placé à 2 cm de la gaine. Cette indication valide la mesure et permet de constater la fidélité du chauffage imposé.

Des résultats expérimentaux correspondant aux signaux radiométriques mesurés dans les mêmes conditions de chauffage, dès l'arrêt de celui-ci, en fonction de la position latérale  $x$  de l'antenne, sont donnés sur la figure 10. La dispersion qui accompagne ces mesures est largement supérieure à l'élévation de signal attendue pour une minute de chauffage supplémentaire.

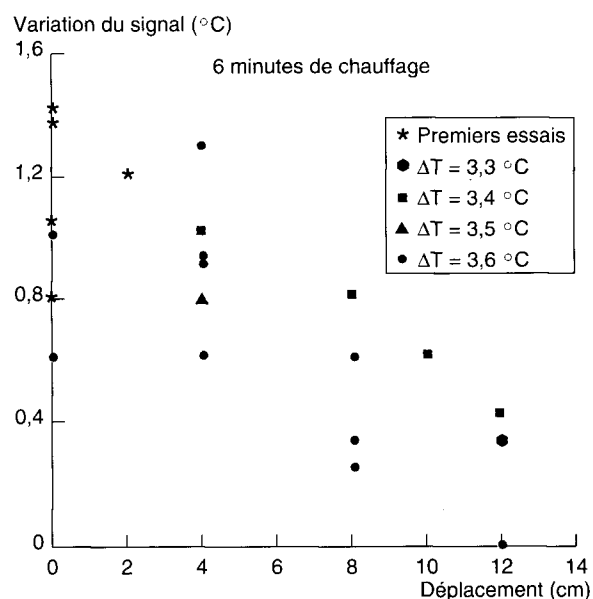


Fig. 10 - Mesures radiométriques pour différentes positions latérales de l'antenne ( $\Delta T$  : contrôle technique à 2 cm de la gaine).

Ce constat rejoint une recherche menée, dans l'unité mixte de recherche LCPC-CNRS (UMR 113), par la section Physique des milieux granulaires et poreux. Cette équipe s'intéresse, depuis des années, à la teneur en eau dans les matériaux, et s'est récemment penchée sur la diffusivité de l'eau dans le béton.

Ces matériaux poreux sont, bien entendu, très sensibles à la pluie et à l'hygrométrie ambiante. Cependant, les phénomènes de diffusion de l'eau, et de succion, se sont avérés complexes et déterminants, en surface, vis-à-vis de la teneur en eau. Les différentes études menées au LCPC montrent que l'épaisseur de béton affectée par le climat ambiant est de l'ordre de deux centimètres. Aussi nous notons que, pour une gaine ayant une couverture de plus de huit centimètres de béton, le signal radiométrique issu du volume chaud correspondant dépend essentiellement du taux d'humidité de cette première couche.

Sachant que la permittivité d'un béton à l'autre peut être très variable, nous présentons sur la figure 11 les résultats numériques correspondant à des permittivités extrêmes que l'on peut rencontrer (sec pour  $\epsilon'_r = 4,95 - 0,1 j$  et saturé pour  $\epsilon'_r = 11,5 - 1,65 j$ ), et au cas d'un béton quelconque (celui-ci est représenté avec une permittivité moyenne de :  $\epsilon'_r = 7,20 - 1,1 j$ ).

On constate sur les résultats numériques que l'atténuation due à l'épaisseur de béton en surface est prépondérante sur l'émission radiométrique issue du volume de béton chaud, à cœur. Donc, plus la permittivité est forte, plus le signal radiométrique est faible.

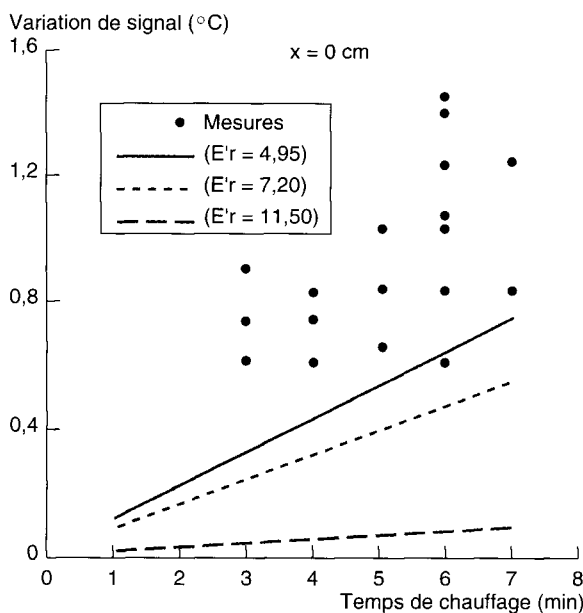


Fig. 11 - Comparaison de signaux numériques et expérimentaux.

Cette interprétation doit être nuancée à cause des phénomènes de diffraction, dont la contribution augmente généralement pour des permittivités plus faibles.

Cependant, si les résultats radiométriques calculés se rapprochent des mesures expérimentales lorsque la permittivité diminue, ils n'en restent pas moins éloignés de la réalité (on ne rencontre pas de bétons possédant une permittivité moyenne inférieure à 5 sous nos climats).

On doit donc conclure que notre modélisation correspondant à un milieu semi-infini homogène n'est pas adaptée à un matériau comme le béton, et qu'il faut prendre en compte, dans les calculs, le gradient de permittivité en fonction de la profondeur.

### Étude numérique dans le cas d'un matériau à permittivité variable

Nous savons que le béton présente une permittivité variable en fonction de la profondeur, de son âge et de l'hygrométrie du milieu environnant. Pour aller plus loin, il est intéressant de se pencher sur les phénomènes de propagation électromagnétique dans un milieu à permittivité variable, qui a le mérite de mieux approcher la réalité et doit permettre d'analyser l'influence de ces phénomènes sur les signaux radiométriques.

Les hypothèses de calcul, dans le cas d'un matériau comme le béton, imposent une permittivité variable suivant la profondeur, définie par :

$$\epsilon^* = \epsilon^*(z).$$

Les équations de Maxwell aboutissent alors aux équations de propagation suivantes :

$$\Delta E - \mu_0 \epsilon^* \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

$$\Delta H - \mu_0 \epsilon^* \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \text{grad}(\log \epsilon^*) \text{Arot} H = 0$$

où un troisième terme apparaît dans l'équation (6) du fait que  $\epsilon^* = \epsilon^*(z)$ .

La résolution de ce système d'équations nous permet de connaître tous les modes de propagation électromagnétique [18], [20], et donc, à l'aide du calcul modal développé par le DHS, de calculer les paramètres de couplage  $C_i$  associés à un matériau de permittivité continûment variable suivant la direction  $z$ .

Dans ce type de calcul, nous ne nous intéressons plus directement à la permittivité, mais à l'âge du béton. Celui-ci étant connu, il nous est permis de retrouver les valeurs de  $\epsilon^*$  en fonction de la profondeur à l'aide de la figure 3.



Pour pouvoir comparer les modélisations à  $\epsilon^*$  constant avec celles à  $\epsilon^*$  variable, nous avons retenu les valeurs extrêmes que peut présenter un béton d'un âge donné, sur les dix premiers centimètres, pour la modélisation à permittivité constante. En effet, la permittivité de la nouvelle modélisation varie linéairement entre ces deux valeurs extrêmes du volume du béton qui est couplé à l'antenne radiométrique.

Les calculs indiquent que les paramètres de couplage du béton décroissent beaucoup plus lentement, pour cette nouvelle modélisation. Cela est dû à une conductivité  $\sigma(f)$ , proportionnelle à  $\epsilon''$ , qui augmente avec la profondeur et tend à contre-balancer l'atténuation du champ électromagnétique.

Nous considérons d'abord le cas d'un profil de permittivité correspondant à un béton âgé de trois ans (fig. 12). Nous représentons également les valeurs des signaux radiométriques de matériaux homogènes, de permittivités correspondant aux valeurs extrêmes d'un béton de trois ans, dans les dix premiers centimètres (soit  $\epsilon'_r = 4,95 - 0,1 j$  en surface et  $\epsilon'_r = 7,20$  à dix centimètres).

Ces résultats montrent que l'hypothèse d'un gradient de permittivité rend mieux compte des résultats expérimentaux que celle d'une permittivité homogène, quelle que soit sa valeur.

Il faut de plus garder à l'esprit que la permittivité relative moyenne du bloc de béton se situe près de 7 et que c'est par rapport aux calculs liés à  $\epsilon'_r = 7,20$  que nous devons comparer nos différentes modélisations aux résultats expérimentaux.

On est alors amené à s'intéresser à l'influence de l'âge du béton sur les signaux radiométriques, c'est-à-dire voir dans quelles proportions l'atténuation de la permittivité, avec l'âge, augmente le rayonnement thermique micro-onde.

Sur la figure 13, nous retrouvons, sur les signaux radiométriques, la même tendance que dans le cas où les milieux étaient homogènes : plus le milieu est absorbant, moins nous recueillons de signal.

On peut voir que, pour une évolution de trois à douze ans (soit une diminution de 0,5 de la permittivité sur toute la profondeur), l'augmentation de variation des signaux reste faible devant la dispersion des mesures. Cela entraîne que l'influence de l'âge de notre bloc de béton de trois ans, lors de tous les essais réalisés sur une période de deux ans, apparaît comme secondaire.

La dispersion des mesures ne provient, en fait, que de l'hygrométrie ambiante qui influence les deux premiers centimètres du béton. De fait, les phénomènes d'hydratation, ou déshydratation, de

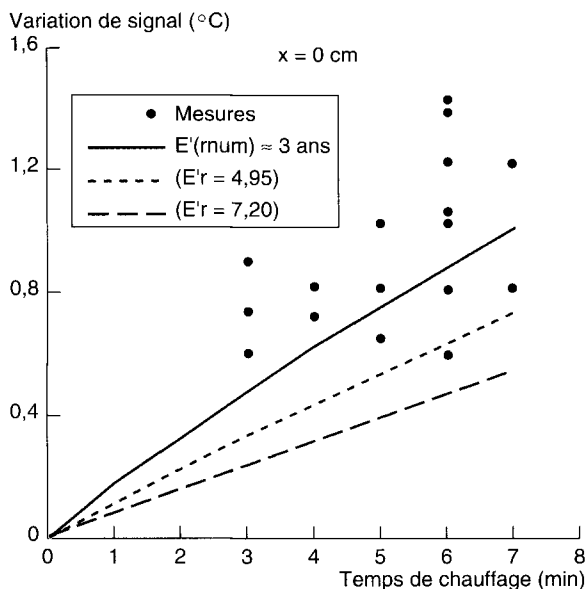


Fig. 12 - Comparaison des deux mobilisations (permittivités constantes ou dépendant de z) et des valeurs expérimentales (âge moyen : 3 ans).

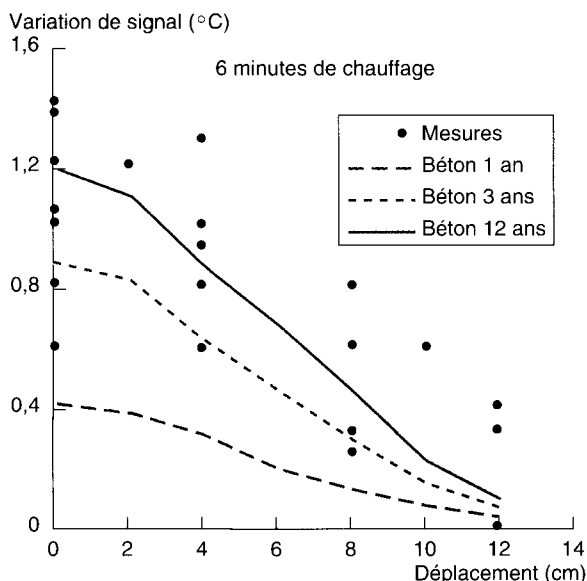


Fig. 13 - Évolution des signaux radiométriques calculés en fonction de l'âge du béton (cas où  $\epsilon^*$  varie avec z) et comparés aux résultats expérimentaux (âge moyen : 3 ans).

cette couche changent considérablement des variations de permittivité relative.

Les séries de mesures ayant eu lieu dans un hall aéré et non chauffé, on peut supposer que des mesures radiométriques en extérieur donneraient, en valeurs absolues, des résultats non significatifs, ou difficilement exploitables, les bétons d'ouvrages d'art en service étant beaucoup plus exposés aux intempéries. Aussi, seule l'utilisation des valeurs relatives des mesures de signaux radiométriques pourra être exploitée sur un matériau tel que le béton.

Le dernier point pratique étudié, avant de clore cette comparaison, a porté sur l'élévation du

signal radiométrique, calculé pour le cas où la gaine métallique serait convenablement remplie de coulis de ciment. Comme cela avait été vérifié par l'étude thermique infrarouge, nous avons constaté, en première approche, à géométrie et matériau équivalents, que ce signal était deux fois moindre que celui correspondant à une gaine vide (fig. 6).

Cette différence montre que l'interprétation de signaux réels ne devrait soulever aucune ambiguïté quant à la présence ou non de coulis dans la gaine.

## Conclusion

Par la mesure des variations thermiques qui résultent, dans le béton environnant, de l'échauffement de la gaine, la radiométrie micro-onde est une technique capable de distinguer, localement, jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 10 cm, la présence ou non de coulis dans les gaines de béton précontraint.

L'étude de faisabilité, présentée dans cet article, s'appuie sur une modélisation numérique qui

tient compte de l'existence d'un gradient de permittivité au sein du béton. Elle aboutit à des résultats prouvant que la différence de flux thermique dans le béton, suivant que la gaine est injectée ou vide, est mesurable par un radiomètre micro-onde.

Cependant, aujourd'hui, cette modélisation ne peut pas être développée plus loin, dans le cadre de cette application, compte tenu des incertitudes sur les valeurs de permittivité, qui sont dues aux géométries, aux conditions climatiques et à l'âge des ouvrages d'art réels.

La poursuite d'une telle recherche passe par l'utilisation de plusieurs radiomètres en parallèle permettant *in situ* des mesures simultanées, comparables entre elles, ces mesures devant être exploitées de manière relative. Il s'agit alors d'une technique de cartographie, qui peut être complétée par des outils numériques, afin d'obtenir des informations plus précises pour les utilisateurs. Cela passe par un calcul de reconstruction tomographique en cherchant à inverser, sans doute par itération, les résultats de nos modélisations radiométriques.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Les ouvrages d'art (1978), *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, p. 13.
- [2] ZOUBOFF V. (1971), Examen par gammagraphie des ouvrages en béton précontraint, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **56**, pp. 7-9.
- [3] DUFAY J.-C., PICCARDI J. (1985), Scorpion premier système de radioscopie télévisée haute énergie pour le contrôle non destructif des ouvrages d'art en béton précontraint, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **139**, pp. 77-83.
- [4] GERY M. (1985), *Transfert de Chaleur*, cours de DEA, ENTPE, 207 pages.
- [5] MAMOUNI A. (1988), *Radiométrie micro-onde en champ proche. Applications médicales*, Thèse de doctorat d'État ès Sciences Physiques, Université des Sc. et Techn. de Lille-Flandre-Artois, 301 pages.
- [6] LEROY Y., *Radiométrie et thermographie micro-ondes*, Techniques de l'ingénieur, R 3030 pp. 2-8.
- [7] BOCQUET B. (1989), *Contribution à l'exploitation de la radiométrie micro-onde*, Thèse de doctorat de l'Université des Sc. et Techn. de Lille-Flandres-Artois, 67 pages.
- [8] MENSI R., ACKER P., ATTOLOU A. (1988), Séchage du béton : analyse et modélisation, *Materials and structures*, **21**, pp. 3-12.
- [9] ABIAR G. (1986), *Cinétique de dessiccation et déformations différées du béton (analyse et modélisation)*, Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris.
- [10] MENARD J., BLONDEL O. (1986), *Constantes diélectriques des bétons*, Rapport du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen.
- [11] BAILLOT G., SERVANT D. (1984), *Mesures de constantes diélectriques en micro-ondes*, Rapport du Laboratoire central des Ponts et Chaussées.
- [12] GIROT D., BENOIST J.-M. (1985), *Auscultations au Pénétradar*, Rapport du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen.
- [13] ATTOLOU A. (1984), *Étude du séchage du béton par gammadensimétrie*, Rapport du Laboratoire central des Ponts et Chaussées.
- [14] ACKER et al. (1990), *Drying and shrinkage of concrete: the case of massive parts*, Proceedings 1st ASTM Materials Engineering Congress, Denver.
- [15] GODIN J. (1990), *Mesure de la teneur en eau par méthodes capacitives*, Rapport du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers.
- [16] GERY M. (1985), *Transfert de chaleur*, cours de DEA, ENTPE, 207 pages.

- [17] KREITH F. (1967), *Transmission de la chaleur et thermodynamique*, Masson et Cie éd., Paris, 654 pages.
- [18] WAIT J. R. (1962), *Electromagnetic Waves in Stratified Media*, Ed. Mac Millan, N. Y., chap. III, IV.
- [19] PICHOT C. (1977), *Propagation guidée des ondes électromagnétiques dans des couches dié-*
- lectriques inhomogènes. Application aux guides diffusés*, Thèse de troisième cycle en sciences physiques, université de Paris-Sud (Orsay).
- [20] DÉROBERT X. (1995), *Méthodes d'auscultation électromagnétique du béton armé et précontraint par radiométrie et imagerie active micro-onde*, Thèse de doctorat de l'Université des Sc. et Techn. de Lille, 230 pages.

#### ABSTRACT

##### Examination of Prestressed Concrete by Microwave Radiometry

X. DÉROBERT - Y. LEROY - A. MAMOUNI

One of the research goals of the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, in the field of engineering structures, is the study and development of nondestructive examination techniques. In this context, one study concerned the feasibility of inspecting the grouting of sleeves in prestressed concrete by microwave radiometry.

After presenting the microwave technique, which consists of measuring the thermal noise emitted by the concrete, the article considers the influence of the water content of the concrete on the radiometric signal obtained during local heating of a sleeve. Theoretical and experimental studies show that, to achieve a correct model, it is necessary to take the permittivity gradient of the concrete into account in calculating the parameters of coupling between the microwave antenna and the medium.

This study shows the potential of microwave radiometry in measuring the voluminal temperature in the heart of civil engineering materials, together with the possibility of detecting local gaps in the grouting of sleeves.