

Caractérisation du béton par ondes électromagnétiques

<i>Bilal Filali,</i>	<i>Jamal Rhazi,</i>	<i>François Boone,</i>	<i>Gérard Ballivy,</i>
<i>Étudiant au Doctorat</i>	<i>Professeur associé,</i>	<i>Professeur,</i>	<i>Professeur,</i>
<i>Département de génie civil,</i>	<i>Département de génie civil,</i>	<i>Département de génie électrique et de génie informatique,</i>	<i>Département de génie civil,</i>

Résumé

Cette présentation décrit un travail de recherche sur la mesure non destructive des propriétés diélectriques du béton et du mortier. Les mesures sont effectuées à l'aide d'une sonde coaxiale à terminaison ouverte de 32,5 mm de diamètre fabriquée dans le cadre de ce travail. La bande de fréquences considérée varie entre 100 MHz et 900 MHz et représente la bande fréquemment exploitée par les systèmes radar pour l'auscultation des infrastructures de béton. La sonde a été calibrée et les mesures ont été validées avec succès sur deux solutions de différentes salinités ainsi que sur du calcaire et du granite. Les essais ont également été effectués sur deux mortiers et sur six bétons de différentes formulations. L'effet de la porosité et de la teneur en eau sur les mesures a été étudié. L'analyse statistique des résultats indique que la dispersion des mesures sur ces matériaux hétérogènes (granulométrie de 5 à 20 mm) est comparable à celle observée pour le calcaire et le granite. Les résultats de cette étude confirment ceux publiés par d'autres auteurs et obtenus par d'autres techniques de mesures plus complexes. Finalement, on expose brièvement la nouvelle orientation prise afin d'exploiter les ondes radar pour étudier le béton, il s'agit des ondes radar de surface dont le comportement dépend directement des propriétés diélectriques du béton.

I. Introduction

Le radar (Ground Penetrating Radar (GPR)) est une technique de contrôle non destructif qui s'est beaucoup développée dans le domaine du génie civil depuis les années 1970. Les applications de cette technique concernent, par exemple, la mesure des épaisseurs des différentes couches d'une chaussée (ASTM D 4748-98) et la détection des dégradations dans le béton (ASTM D 6087-97).

Le radar consiste à transmettre une onde électromagnétique (EM) dans un milieu et à détecter les réflexions qui se produisent au niveau de ses interfaces. Pour l'auscultation en génie civil, les fréquences des ondes utilisées varient généralement entre 100 MHz et 1500 MHz.

La détection par radar des interfaces dans un milieu est fonction du contraste entre les propriétés électromagnétiques des deux milieux situés de part et d'autre de l'interface (ex. béton bitumineux - béton de ciment). Il est donc essentiel de connaître les propriétés EM des matériaux en place afin d'estimer l'aptitude du radar à détecter les interfaces entre ces matériaux. Par ailleurs, de nombreuses applications du radar requièrent non seulement la détection mais également la localisation des interfaces (ex. mesure de l'épaisseur de recouvrement des armatures dans le béton). La précision de cette localisation dépend aussi de la précision de l'évaluation des propriétés EM du béton lors de l'analyse des données radar.

Un des thèmes de recherche de la Chaire industrielle du CRSNG sur l'auscultation des structures de béton (Université de Sherbrooke) concerne l'étude des propriétés diélectriques du béton pour améliorer l'analyse des données radar. Actuellement, il n'existe pas, dans le commerce, de dispositifs de mesure des propriétés diélectriques des matériaux hétérogènes tels le béton. La première étape de cette activité a donc consisté à fabriquer et à calibrer une sonde coaxiale à

terminaison ouverte, pilotée par un analyseur vectoriel de réseau et permettant d'effectuer des mesures dans la bande fréquentielle 100 MHz – 900 MHz (Filali 2004). L'application de cette dernière peut se faire en laboratoire, aussi bien qu'en chantier (des mesures ponctuelles). La validation de cette technique s'est aussi effectuée par le biais d'essais sur des mortiers et des bétons et par la comparaison des résultats à ceux obtenus par d'autres chercheurs au moyen d'autres techniques de mesure.

Dans la première partie de cet article, les propriétés diélectriques du béton sont définies et les principaux équipements de mesures de ces propriétés sont présentés. La deuxième partie de l'article traite du principe général de fonctionnement d'une sonde coaxiale, de la fabrication, de la calibration et de la validation de la sonde coaxiale à terminaison ouverte. Dans la dernière partie, les résultats des mesures des propriétés diélectriques réalisées sur des mortiers et des bétons de différents rapports eau/ciment seront présentés et analysés en fonction de la porosité et de la teneur en eau.

II. Rappel sur les propriétés électromagnétiques des matériaux

II.1. Domaine du radar pénétrant en génie civil

Un système GPR pour l'auscultation en génie civil est identique à un système GPR pour les applications géophysiques. Toutefois, les antennes les plus utilisées pour l'auscultation sont celles à des fréquences supérieures à 1 GHz.

Un système GPR comporte un émetteur générant un signal radar à transmettre vers l'antenne par laquelle il sera radié sous forme d'onde radar. Une autre antenne est disposée afin de capter l'onde réfléchie ou transmise. Cette onde sera ensuite guidée vers le récepteur qui, tout comme l'émetteur, est contrôlé par un déclenchement ou trigger afin de synchroniser l'échantillonnage du signal temporel avant de l'envoyer au processeur pour l'acquisition des données puis leur affichage (Figure 1).

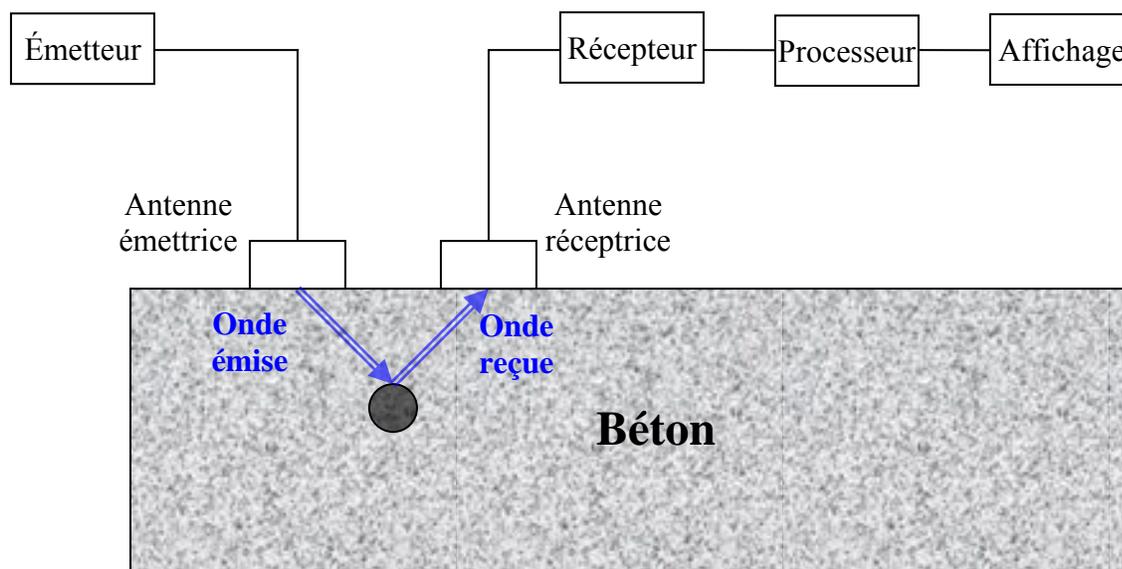


Figure 1 Principe de fonctionnement d'un système radar (Daniels 2004).

Les techniques GPR utilisées pour l'auscultation sont basées sur l'analyse de la réflexion d'une impulsion radar émise. Cela implique qu'il est nécessaire de recevoir la réflexion de l'onde par un objet en dessous de la surface du béton (armatures de renfort, vides, canalisations, fond de la dalle, etc.) afin d'avoir toute information. L'onde réfléchi est observée sous forme d'une impulsion dans le signal reçu. Sa forme dépend des propriétés électromagnétiques du béton (permittivité et conductivité).

II.2. Définitions

Le béton est un matériau généralement non magnétique dont les propriétés électromagnétiques sont essentiellement caractérisées par deux paramètres : la conductivité électrique et la permittivité diélectrique.

La conductivité électrique est liée aux courants de conduction. Elle exprime la facilité des charges libres à circuler dans le matériau sous l'effet d'un champ électrique \vec{E} . Ce déplacement de charges s'accompagne par des pertes d'énergie faisant atténuer le champ électrique appliqué sur le matériau. La conductivité, notée σ , est mesurée en Siemens par mètre (S/m) et se définit par l'expression :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

où \vec{J} est la densité du courant électrique (A/m²) et E (V/m) est le champ électrique appliqué au matériau.

La conductivité électrique est responsable de l'atténuation des ondes électromagnétiques dans le milieu de propagation. Plus le milieu est conducteur, plus l'atténuation est importante et plus faible est la profondeur de pénétration des ondes dans le milieu. De façon générale, la profondeur d'investigation maximale D (m) par le radar peut être estimée à partir de la relation suivante, faisant intervenir la conductivité σ du milieu (en mS/m) (Annan 1992) :

$$D = 35 / \sigma \quad (2)$$

La permittivité diélectrique est liée aux courants de déplacement induits par les phénomènes de polarisation. Cette polarisation résulte d'un déplacement relatif des charges liées de la matière sous l'action d'un champ électrique extérieur. Lorsque le champ électrique appliqué au matériau est variable dans le temps, les dipôles oscillent localement, créant ainsi un courant de déplacement électrique qui est également accompagné par des pertes d'énergie faisant atténuer le champ électrique. La densité de ce courant de déplacement \vec{J}_d (A/m²) s'exprime en fonction de la permittivité du milieu (ϵ), du champ électrique (\vec{E}) et de la pulsation (ω) par la relation suivante :

$$\vec{J}_d = \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} = j\omega\epsilon\vec{E} \quad (3)$$

avec $j^2 = -1$, t : le temps et $\omega = 2\pi \times$ fréquence

La permittivité, appelée également la constante diélectrique, est une propriété caractéristique de tout milieu. Elle s'exprime en Farads par mètre (F/m) et est dite permittivité relative (ϵ_r) lorsqu'elle est normalisée par rapport à la permittivité du vide ($\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m).

La densité du courant électrique total \vec{J} induite par le champ oscillatoire est donnée en fonction des paramètres définis ci-dessus par l'équation :

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_d = (\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{E} = j\omega\varepsilon_T \vec{E} \quad (4)$$

où :

$$\varepsilon_T = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5)$$

est la permittivité complexe totale.

La partie imaginaire ε'' de ε_T exprime la perte d'énergie de l'onde électromagnétique durant sa propagation. La partie réelle ε' gouverne la vitesse de propagation des ondes (V) dans le milieu à travers l'équation (6) ci-dessous dans laquelle c est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide ($C = 3 \cdot 10^8$ m/s). C'est également l'importance du contraste entre les permittivités des matériaux qui détermine l'intensité de la réflexion des ondes radar aux interfaces entre les matériaux.

$$v = c / (\varepsilon')^{0.5} \quad (6)$$

Cole et Cole (Cole et Cole 1941) ont montré que la permittivité totale ε_T peut être calculée à l'aide de la relation suivante:

$$\varepsilon_T(f) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau)^{1-\alpha}} - j \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (7)$$

avec :

- ε_∞ et ε_s représentent respectivement les valeurs de la permittivité pour une fréquence infiniment grande et une fréquence nulle (permittivité statique);
- τ : temps de relaxation ou inverse de la fréquence de résonance dipolaire. Il correspond à la durée pendant laquelle les dipôles continuent à osciller après l'arrêt brusque du champ électrique appliqué au matériau. C'est ce facteur τ qui donne la contribution du courant de déplacement à la partie imaginaire de la permittivité totale;
- α est un paramètre de correction empirique dont la valeur varie entre 0 et 1;
- σ est la conductivité électrique du matériau à basses fréquences (en S/m);
- $j = (-1)^{0.5}$.

II.3. Techniques de mesure des propriétés diélectriques du béton

Il est possible de mesurer la permittivité d'un matériau au moyen de quatre techniques différentes. Le choix de la technique dépend des caractéristiques de l'échantillon (matériau, géométrie, dimension), de la bande de fréquence et de la précision désirée. Une description détaillée de la technique de la sonde coaxiale à terminaison ouverte est donnée plus loin; les trois autres techniques de mesure sont brièvement décrites comme suit :

- La *technique du condensateur à deux plaques parallèles* (Al-Qadi et al. 1995). La permittivité est mesurée à partir de la différence de potentiel aux bornes d'un condensateur à deux plaques parallèles connectées à un générateur de courant de fréquence variable. Cette

technique est simple et économique, et n'est généralement utilisée que pour des mesures à basses fréquences.

- La *technique de l'espace libre* (Polívka 1996). Elle consiste à disposer une antenne émettrice-réceptrice et une antenne réceptrice de part et d'autre de l'échantillon. La permittivité peut être déterminée pour des fréquences supérieures à 100 MHz à partir de l'onde électromagnétique réfléchie sur la surface de l'échantillon et/ou de l'onde transmise à travers l'échantillon. C'est une technique simple mais qui requiert des échantillons plats ayant une surface supérieure à la largeur du rayonnement afin d'éliminer les effets de bord. La précision des mesures est également fonction des précautions prises pour éviter la contamination des ondes par les réflexions parasites sur les obstacles autour de l'échantillon (ex. cloisons du laboratoire de mesure).

- La *ligne de transmission coaxiale* (Shaw et al. 1993). Ce dispositif de mesure est formé de deux cylindres concentriques de 50 cm de longueur et de diamètres respectifs de 10 cm et 4 cm. L'échantillon cylindrique est usiné et inséré entre les deux cylindres conducteurs. La ligne est connectée à un analyseur vectoriel de réseau (VNA) et la permittivité est déterminée à partir de la réflexion et de la transmission des ondes par l'échantillon.

Les techniques décrites ci-dessus ont des limitations d'ordre pratique. En effet, les mesures doivent être effectuées, soit sur des éprouvettes devant être usinées en fonction de la géométrie et de la dimension des dispositifs de mesure, soit sur des éléments de béton de grandes dimensions. Aucune de ces techniques ne permet la réalisation des essais à la fois en laboratoire et in situ sur des ouvrages en service. La technique de la sonde coaxiale, de par son principe et son architecture, permet de s'affranchir des restrictions inhérentes aux autres techniques de mesure. Cet avantage non négligeable nous a amenés à nous orienter dès l'année 2001 vers le développement et l'utilisation de cette technologie.

III. La sonde coaxiale à terminaison ouverte

III.1. Principe de mesure

Une sonde coaxiale est un guide d'onde constitué de deux cylindres coaxiaux (Figure 2). Le cylindre intérieur (noyau) est un conducteur de diamètre $2a$. Le cylindre extérieur creux (diamètre $2b > 2a$) contient un matériau diélectrique entourant le noyau. Le guide d'onde se termine par une ouverture qui est mise en contact avec la surface plate de l'échantillon étudié. L'instrument est piloté par un analyseur de réseau vectoriel (VNA).

Des ondes électromagnétiques sont générées par le VNA et sont transmises à la sonde au moyen du câble coaxial. Ces ondes, rendues à la surface de l'échantillon se réfléchissent vers l'intérieur de la sonde portant l'information sur les propriétés électromagnétiques du milieu en contact avec l'ouverture de la sonde (Figure 3). Cela dit qu'une sonde coaxiale fournit des mesures du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence des ondes guidées et réfléchies à l'ouverture de la sonde.

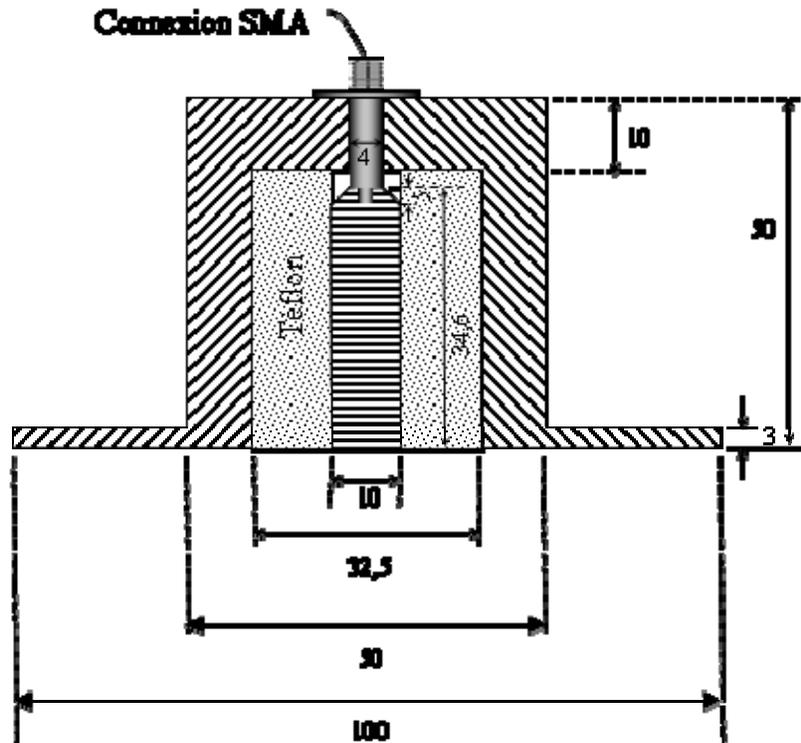


Figure 2 Schéma de la sonde coaxiale.

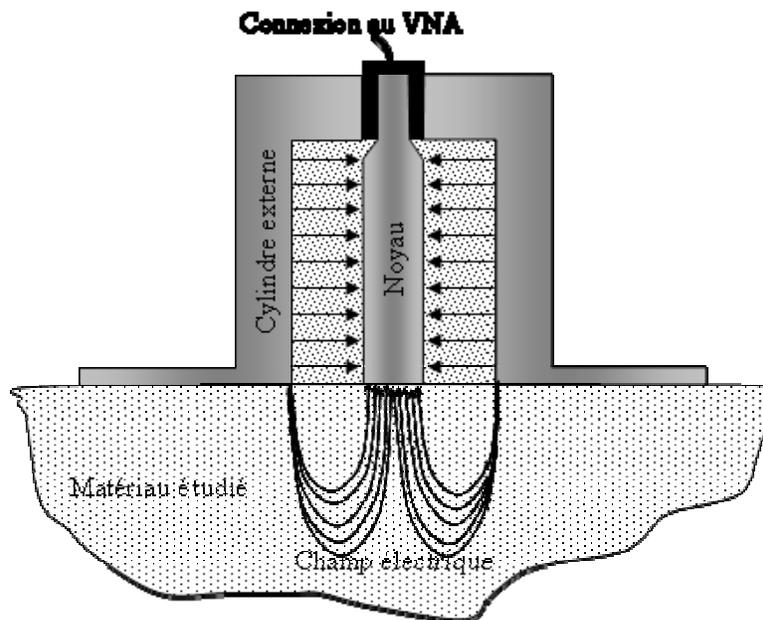


Figure 3 Principe de fonctionnement d'une sonde coaxiale.

Un VNA permet de générer les ondes à travers la sonde, détecter la réflexion à l'ouverture de la sonde et sauvegarder les données. Celles-ci sont ensuite extraites de l'analyseur pour être traitées sur un ordinateur au moyen d'un programme de traitement spécifique élaboré dans le cadre de cette étude. Ce programme permet le calcul de la partie réelle et de la partie imaginaire de la permittivité en fonction de la fréquence.

III.2. Calibration de la sonde coaxiale

Comme mentionné ci-dessus, la sonde coaxiale permet la mesure du coefficient de réflexion Γ des ondes électromagnétiques à la surface du matériau. Celui-ci représente le rapport de l'amplitude de l'onde réfléchie $A_r(f)$ sur celle de l'onde incidente $A_i(f)$. Toutefois, le coefficient de réflexion ρ initialement donné par la chaîne de mesure (VNA - câble de connexion - sonde) est perturbé par celle-ci, et il est nécessaire de connaître ces perturbations afin d'avoir le vrai coefficient de réflexion Γ à la surface du matériau. Ceci est effectué en appliquant la relation entre les coefficients Γ et ρ dans laquelle, trois paramètres S_{11} , S_{22} et $S_{12} = S_{21}$ sont à déterminer (Kraszewski et al. 1983).

Lorsque la chaîne de mesure est calibrée, les parties réelle et imaginaire de la permittivité de tout matériau inconnu peuvent être déterminées en appliquant l'expression de l'admittance en fonction de la permittivité (Blakham et Pollard 1997).

Des essais de validation des mesures ont été menés avec succès sur deux solutions salines de 10 ppm, et 20 ppm, ainsi que sur des échantillons solides de calcaire et de granite (Filali 2004), ce qui a confirmé la fiabilité de la sonde coaxiale pour la caractérisation diélectrique d'échantillons liquides.

IV. Mesures par sonde coaxiale sur des échantillons de mortier et de béton

Cette section discute des résultats expérimentaux obtenus sur les échantillons de mortier et de béton étudiés. L'analyse des résultats concerne l'influence de l'hétérogénéité du béton ainsi que l'influence de sa teneur en eau et de sa porosité.

IV.1. Échantillons étudiés

Les mesures de permittivité à l'aide de la sonde coaxiale ont été effectuées sur six bétons séchés au four jusqu'à stabilisation de la masse (bétons A, B, C, D, E et F). Les rapports eau/ciment (E/C) de ces bétons varient entre 0,84 et 0,30, les résistances à la compression entre 12,5 MPa et 80 MPa et les modules d'élasticité entre 22 GPa et 38 GPa (TABLEAU 1). Les granulats utilisés pour la confection de ces bétons sont des calcaires dans le cas des bétons A, B, C et D, et des calcaires Spratt (calcaires fortement réactifs face à la réactivité alcalis-silice (RAS)) dans le cas des bétons E et F.

TABLEAU 1 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES MÉLANGES DE BÉTON.

Propriété	Béton					
	A	B	C	D	E	F
E/C	0,30	0,38	0,56	0,84	0,66	0,75
f^c ^a	80	31	23	15	29,2	12,5
E ^b	38,4	29	27	22	28,8	24

^a f^c : Résistance à la compression (MPa) à 28 jours

^b E : Module de Young (GPa) à 28 jours

Deux dalles de dimensions 28 cm x 28 cm x 7 cm ont été fabriquées pour chaque type de béton. Ces dalles ont été polies sur les deux faces afin d'assurer un bon contact entre la sonde et la

surface des échantillons. Les essais ont également été réalisés sur deux dalles de mortier, MB et MC, saturées d'eau. Ces dalles, polies et sans granulats grossiers, ont les mêmes dimensions ainsi que la même formulation que les dalles de béton B et C.

IV.2. Influence de l'hétérogénéité du béton

Afin d'estimer la dispersion des mesures causée par la granulométrie des échantillons de béton étudiés (5 à 20 mm), dix essais ont été effectués sur chaque échantillon (cinq mesures sur chaque face). Les moyennes et les coefficients de variation (CV) de la partie réelle et de la partie imaginaire à la fréquence de 900 MHz (équation (5)) pour tous les échantillons sont donnés au TABLEAU 1.

TABLEAU 2 DISPERSION DES MESURES SUR LES ÉCHANTILLONS SOLIDES

Matériau	Partie réelle (ϵ'_r)	Partie imaginaire (ϵ''_r)	E/C	f_c	E
	Moyenne (CV)	Moyenne (CV)			
Calcaire	6,80 (4,0%)	1,02 (5,0%)			
Granite	5,00 (2,0%)	0,60 (3,0%)			
Béton A	6,20 (1,5%)	0,99 (2,0%)	0.30	80	38.4
Béton B	5,55 (2,5%)	0,79 (3,5%)	0.38	31	29
Béton C	5,10 (5,5%)	0,74 (3,0%)	0.56	23	27
Béton D	4,60 (6,5%)	0,62 (5,0%)	0.84	15	22
Béton E	4,85 (2,0%)	0,72 (3,0%)	0.66	29.2	28.8
Béton F	4,15 (2,0%)	0,57 (2,0%)	0.75	12.5	24
Mortier MC	9,00 (4,0%)	2,78 (2,0%)			
Mortier MB	8,20 (6,0%)	2,50 (5,0%)			

Les valeurs moyennes des permittivités mesurées sur les bétons secs varient approximativement entre 4 et 6. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par des mesures avec la technique de la ligne de transmission et reportées par Robert (Robert 1996) et Pokkuluri (Pokkuluri 1998). De plus, hormis le béton A, la moyenne des CV associés aux mesures sur les bétons est de 4,8%. Cela montre que l'effet des granulats de ces bétons ne cause pas plus de dispersion des mesures par sonde coaxiale que le calcaire ou le granite dont les granulométries sont inférieures à 5 mm (TABLEAU 2). La valeur du CV plus élevée observée dans le cas du béton A (6,2%), dont le rapport E/C est de 0,84, est attribuable à une distribution non homogène de sa porosité relativement plus élevée

En ce qui concerne les mortiers saturés MC et MB, les CV observés sont légèrement plus grands que pour les bétons et varient entre 4% et 6%. Cela ne peut pas être attribué à la granulométrie des mortiers qui est de quelques millimètres, mais plutôt à la distribution non homogène de la teneur en eau.

IV.3. Effet de la teneur en eau et de la porosité

La Figure 4 donne les variations des parties réelle et imaginaire de la permittivité en fonction de la fréquence pour les mortiers MB et MC. Ces résultats indiquent que le mortier MC, dont le rapport E/C est de 0,56, a la plus grande permittivité. À 900 MHz, la partie réelle de sa permittivité est de 9 et sa partie imaginaire est d'environ 3. Pour le mortier MB (rapport E/C = 0,38), la partie réelle de la permittivité est de l'ordre de 8 et sa partie imaginaire est de 2,5. Cette différence diélectrique entre le mortier MB et le mortier MC provient du fait, qu'à l'état saturé, plus le matériau est poreux, plus sa teneur en eau est importante, et donc plus sa permittivité est grande.

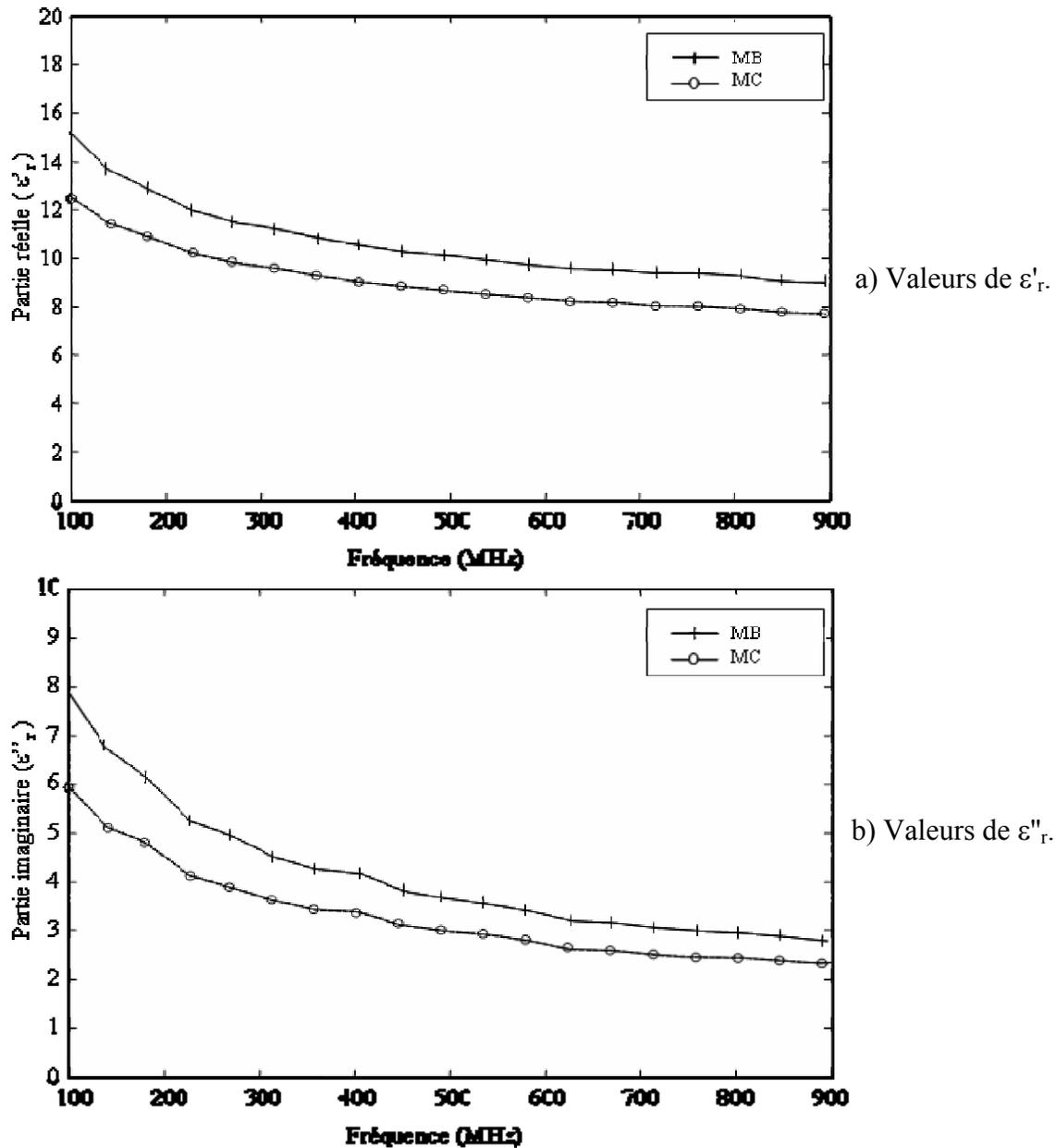


Figure 4 Mesures de permittivité par sonde coaxiale sur les échantillons de mortier.

La comparaison des mesures réalisées sur les dalles A, B, C et D (Figure 5) montre que le béton A ($E/C = 0,3$) possède la permittivité la plus importante (une valeur moyenne de 6,2 à 900 MHz), tandis que les bétons B ($E/C = 0,38$), C ($E/C = 0,56$) et D5 ($E/C = 0,84$) possèdent des permittivités respectives de 5,5; 5,1 et 4,7. Ce résultat indique que, pour des bétons secs, la permittivité diminue lorsque le rapport E/C du béton augmente.

Le rapport E/C d'un béton à l'état sec affecte la quantité d'eau liée. À cet état, l'eau n'a aucun effet significatif sur la permittivité du béton (Haddad et Al-Qadi 1998), il en est de même pour le rapport E/C . Toutefois, la porosité et la perméabilité sont généralement très affectées par le rapport E/C et l'on considère alors que ce dernier paramètre a un effet indirect sur la constante diélectrique.

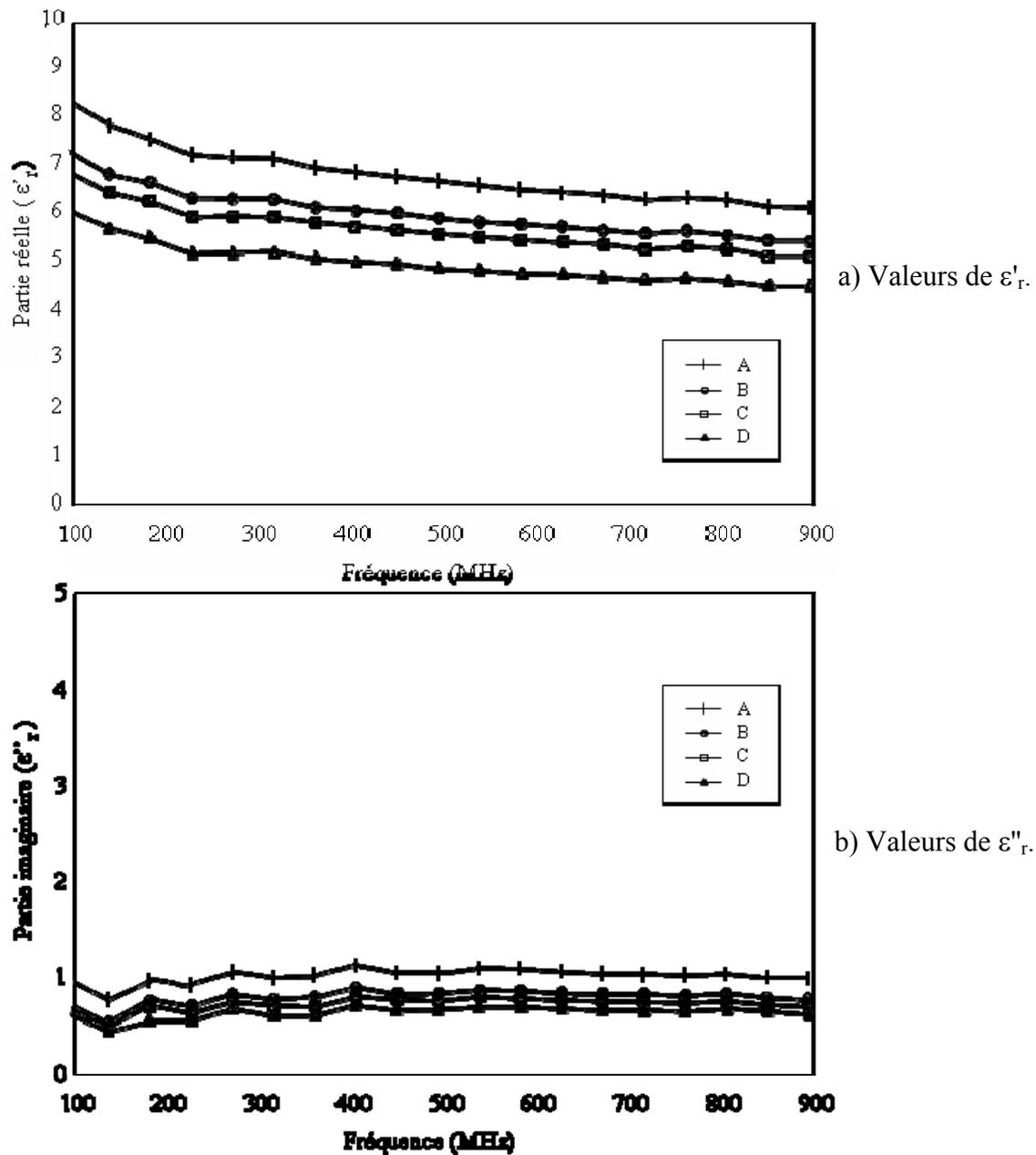


Figure 5 Mesures de permittivité par sonde coaxiale sur les échantillons de béton.

V. Étude des ondes radar de surface

Lorsqu'une antenne radar de type dipôle (rayonnement omnidirectionnel) est placée sur un sol ou surface de béton, une onde de volume est émise dans le milieu solide. L'énergie de radiation de cette dernière se focalise principalement vers l'intérieur du milieu, et plus particulièrement, dans un angle égal au double de l'angle critique de réfraction air-sol θ_c (Figure 6).

Cependant, cette énergie de radiation n'est pas complètement radiée dans l'angle décrit précédemment ; une partie mineure de l'énergie est radiée à des angles plus grands que θ_c , jusqu'à la direction de la surface, où la radiation est minimale. On définit alors les ondes radar de surface (ORS) comme étant la partie des ondes de volume se propageant le long de la surface.

Les ondes radar de surface ont déjà été étudiées pour l'auscultation en génie civil par (Klysz 2004). Cette étude effectuée au département de génie civil de l'Université de Toulouse (Paul Sabatier) est la première qu'on a trouvée en auscultation.

Ce dernier travail qui se base sur des simulations numériques et des essais radar, tire plusieurs conclusions importantes, notamment sur la variation de la vitesse des ORS en fonction de la teneur en eau du béton et sur leur atténuation en fonction de sa conductivité. Cela marque notamment l'influence des propriétés diélectrique du béton sur la propagation des ces ondes.

Une autre recherche a été réalisée sur les ORS par (Sbartai 2005) dans un programme de cotutelle entre l'université de Sherbrooke et l'INSA de Toulouse. Ce dernier fait l'étude des ORS après un important programme expérimental en laboratoire pour observer l'effet de l'eau sur la dispersion des ondes dans le domaine fréquentiel. L'analyse est complètement basée sur le comportement des propriétés diélectriques du béton entre les différentes fréquences radar.

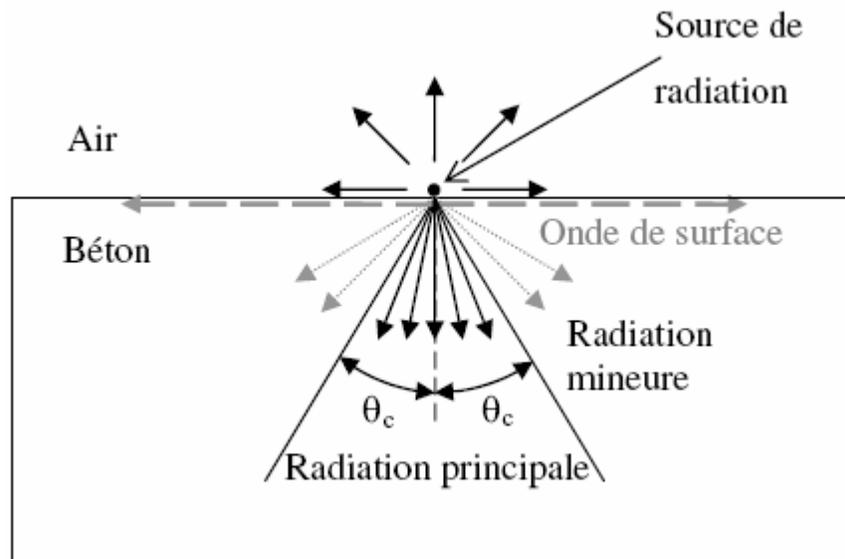


Figure 6 Illustration des ondes radar de surface.

La recherche sur les ondes radar de surface a donné lieu à peu de travaux fondamentaux et expérimentaux. Les connaissances sur la propagation de ce type d'ondes sont donc limitées, raison pour laquelle, le projet vise trois objectifs spécifiques qui sont les suivants :

1. Améliorer les connaissances sur la propagation des ondes radar de surface.
2. Étudier la dispersion des ondes radar de surface pour différentes conditions physiques et mécaniques du béton.
3. Étudier les corrélations possibles entre les mesures par ORS et les mesures de résistivité électrique.

VI. Conclusion et recommandations

L'étude présentée ici traite de la possibilité d'utiliser une sonde coaxiale à terminaison ouverte pour la mesure des propriétés diélectriques du béton. Cette technique de mesure est plus flexible et plus simple que les autres techniques existantes. Toutefois, la sonde coaxiale est une technique basée uniquement sur la réflexion des ondes électromagnétiques à la surface des matériaux, il a donc été nécessaire de comparer les résultats obtenus à l'aide de cette technique aux techniques basées sur la propagation des ondes électromagnétiques à travers les échantillons telle la technique de la ligne de transmission.

On a démontré que la taille des hétérogénéités des bétons étudiés (une granulométrie de 5 à 20 mm), est inférieure à l'ouverture de la sonde (32,5 mm) et ne cause pas d'erreurs significatives. Des cas particuliers ont été rencontrés (CV de 7%), où le béton est relativement très poreux ou saturé, ce qui a bien été expliqué. Par ailleurs, l'effet de la porosité sur la permittivité a été bien observé pour les six dalles de béton séchées au four. Les résultats montrent que les bétons plus poreux ont des permittivités plus faibles que les dalles plus compactes.

Les résultats obtenus à la suite de cette étude indiquent que la sonde coaxiale à terminaison ouverte mise au point peut être utilisée pour l'étude des propriétés diélectriques du béton. Les applications pratiques concernent notamment l'estimation in-situ des variations locales de la teneur en eau et des ions chlorure dans le béton. Ces deux facteurs sont à l'origine de la corrosion dans les ouvrages de béton renforcé avec des armatures d'acier. Ainsi, de telles mesures pourront être effectuées en corrélation avec des mesures radar (par ORS par exemple).

On recommande notamment le développement d'une sonde coaxiale avec une plus grande ouverture (jusqu'à un diamètre de 10 cm au lieu de 3,25 cm). Cela augmentera la profondeur de pénétration et diminuera la perturbation due à l'hétérogénéité du béton.

VII. Remerciement

Ce travail de recherche a été mené dans le cadre de la Chaire industrielle du CRSNG sur l'auscultation des structures de béton (Université de Sherbrooke). Les auteurs remercient le CRSNG, le FQRNT et les partenaires industriels de la Chaire pour le support financier, ainsi que le professeur P. Rivard (département de génie civil) sa collaboration. Ils remercient aussi le personnel de soutien technique qui a contribué à la conduite des essais.

Références

Al-Qadi, I. L., Hazim, O. A., Su, W. et Riad, S. M. (1995). "Dielectric Properties of Portland Cement Concrete at Low Radio Frequencies." J. Mater. Civ. Eng. vol. **7**(3), pp. 192.

Annan, A. P. (1992). Ground penetrating radar workshop notes. Mississauga, Ontario, 128 p.

ASTM (D 4748-98). "Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar." vol., pp.

ASTM (D 6087-97). "Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar." vol., pp.

Blakham, D. V. et Pollard, R. D. (1997). "An Improved Technique for Permittivity measurements Using a Coaxial Probe." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement vol. **46**(5), pp. 1093-1099.

Cole, K. S. et Cole, R. H. (1941). "Dispersion and absorption in dielectrics." Journal of Chemical Physics vol. **9**, pp. 341-351.

Daniels, D. J. (2004). Ground penetrating radar. London, Institution of Electrical Engineers, 2nd, 726 p.

Filali, B. (2004). Étude des Propriétés Diélectriques du Béton par Sonde Coaxiale et par Antenne Radar, Maîtrise ès science appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 151 p.

Haddad, R. H. et Al-Qadi, I. L. (1998). "Characterization of Portland Cement Concrete Using Electromagnetic Waves over the Microwave Frequencies." Cem. Concr. Res. vol. **28**(10), pp. 1379.

Klysz, G. (2004). Caractérisation du Béton d'Enrobage par Technique Radar: Exploitation de l'Onde Directe Émetteur-Récepteur., Thèse de doctorat, Toulouse III, Toulouse, 240 p.

Kraszewski, A., Stuchly, M. A. et Stuchly, S. S. (1983). "ANA Calibration Method for Measurements of Dielectric Properties." IEEE Trans. Instrum. Meas. vol. **IM-32**(2), pp. 385.

Pokkuluri, K. (1998). Effect of Admixtures, Chlorides, and Moisture on Dielectric Properties of Portland Cement Concrete in the Low Microwave Frequency Range, Master of Science in Civil Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 67 p.

Polívka, J. (1996). "Measuring the Permittivity of Concrete at Millimetre Waves." International Journal of Infrared and Millimetre Waves vol. **17**(10), pp. 1673.

Robert, A. (1996). Recherche de Méthodes d'Interprétation des Mesures Géoradar et de Thermographie Infrarouge Appliquées au Contrôle Non Destructif et à l'Auscultation In Situ des Matériaux de Construction, Docteur Ès Sciences Techniques, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 214 p.

Sbartai, Z. M. (2005). Caracterisation physique du beton par radar, approche neuromimetique de l'inversion, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III et Université de Sherbrooke, Toulouse, 195 p.

Shaw, M. R., Millard, S. G., Houlden, M. A., Austin, B. A. et Bungey, J. H. (1993). "A Large Diameter Transmission Line for the Measurement of the Relative Permittivity of Construction Materials." British Journal of NDT vol. **35**(12), pp. 696.