

COMPLÉMENTARITÉ DE TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES POUR DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS DE DIFFÉRENTS BÉTONS HYDRAULIQUES

COMPLEMENTARY OF NON DESTRUCTIVE TECHNIQUES TO DETERMINE THE PROPERTIES OF VARIOUS CONCRETES

G. Villain, X. Dérobert, O. Abraham, M. Chekroun, O. Coffec et O. Durand
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) - Centre de Nantes
BP 4129 -44 341 BOUGUENAIS Cedex - E-mail : geraldine.villain@lcpc.fr

Résumé

Différentes techniques non destructives ont été mises en œuvre pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques de bétons de porosité comprise entre 12,5 et 18%. En ce qui concerne les ondes mécaniques, une technique innovante fondée sur la propagation d'ondes de surface détectées par interférométrie laser permet de mesurer une vitesse de phase en fonction de la fréquence et d'en déduire l'évolution liée à la densité et aux modules en fonction de la profondeur jusqu'à 5 cm. Les résultats obtenus sont rapprochés de ceux mesurés par impact écho, technique qui intègre les propriétés mécaniques sur toute l'épaisseur des dalles de béton. Les fréquences de résonance impact écho et vitesses des ondes de surface expérimentales (petites déformations) sont corrélées à celles calculées à partir des mesures destructives en grandes déformations. En ce qui concerne les ondes électromagnétiques, la permittivité diélectrique mesurée en surface par différentes sondes capacitives, permet d'évaluer la teneur en eau des bétons entre la surface et 1/2, 3 ou 8 cm. Un radar émettant autour de 1,5 GHz fournit en écartant les antennes, des mesures plus précises de la constante diélectrique. Bien que les fréquences centrales des 2 dispositifs soient différentes, les permittivités diélectriques sont cohérentes, les gradients obtenus sont corrélés aux mesures destructives de porosité et de teneur en eau.

Abstract

Various non destructive techniques were implemented to evaluate the mechanical and physical properties of concretes whose porosity is ranging between 12.5 and 18%. With regard to the mechanical waves, an innovative technique founded on surface wave propagation detected by laser interferometry makes it possible to measure the phase velocity as a function of frequency, related to the evolution according to the concrete density and moduli versus depth until 5 cm. The results obtained are compared to those measured by impact echo, a technique which integrates the mechanical properties on all the thickness of the concrete slabs. The recorded impact echo resonance frequencies and surface wave velocities are correlated with those calculated from destructive measurements corresponding to great deformations. With regard to the electromagnetic waves, the dielectric permittivity is measured from the slab surface by various capacitive probes. Thus, it makes it possible to evaluate the concrete water content between the surface and 1/2, 3 or 8 cm. A radar emitting around 1,5 GHz provides, by drawing aside the antennas, more precise measurements of the permittivity. Although the centre frequencies of the 2 devices are different, the dielectric permittivities are coherent, the gradients obtained are correlated with destructive measurements of porosity and water content.

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet ANR-SENSO (2006-2008) visant une stratégie d'évaluation non destructive pour la surveillance des ouvrages en béton, les équipes de recherche développent et appliquent diverses méthodes d'évaluation non destructives sur des dalles de béton de petites dimensions dont la porosité et le taux de saturation sont maîtrisés en laboratoire avant d'ausculter des éléments d'ouvrage d'art en béton armé in situ. Cet article présente les résultats obtenus par 4 des techniques mises en œuvre par le LCPC : méthode par impact-écho, par propagation d'ondes de surface, par des sondes capacitatives de surface et par radar à écartements multiples. L'objectif est d'analyser les résultats obtenus en fonction de la porosité des bétons, du module d'Young et de leur teneur en eau et de montrer la complémentarité de ces techniques pour évaluer porosité et teneur en eau, paramètres indispensables pour caractériser le béton, et dans l'avenir, évaluer la durabilité du béton d'enrobage des ouvrages en béton armé.

DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE EXPERIMENTALE

Caractérisation des bétons et déroulement de la campagne expérimentale

Dans le projet SENSO [1], 9 formulations de béton ont été fabriquées, caractérisées mécaniquement et testées par différentes méthodes non destructives. Dans cette étude, nous présentons les résultats relatifs à 6 bétons (nommés G1, G2, G3, G3a, G7 et G8) formulés avec le même ciment, les mêmes granulats mais de rapport eau sur ciment E/C différents. Notons que le béton G1 comporte des fumées de silice. Les caractéristiques des bétons, présentées dans le tableau 1, ont été déterminées sur des éprouvettes cylindriques coulées ou carottées dans une dalle dédiée. Les mesures non destructives ont été réalisées sur des dalles de 50x25x12 cm³ pour chacun des bétons à différents taux de saturation (S), l'état sec étant atteint par séchage en étuve à 80°C pendant 2 mois minimum et l'état saturé par immersion en piscine pendant 3 mois environ [1] :

- 8 dalles testées à l'état sec en juillet 2006 (S=0%),
- 8 dalles à l'état saturé en octobre 2006 (S=100%),
- 3 dalles à S=40%, 3 à S=60% et 3 à S=80% en juillet 2007.

	Etat		G1	G2	G3	G3a	G7	G8
Rapport eau sur ciment		E/C (-)	0,31	0,47	0,59	0,57	0,63	0,9
Résistance à la compression	sec	RC _{sec} (MPa)	77,2±1,5	55,6±8,7	-	45,8±4,9	44,3±3,3	27,5±1,5
	saturé	RC _{sat} (MPa)	72,9±1,4	43,3±0,8	43,8±1,5	40,5±0,7	38,3±0,8	20,2±1,0
Module élastique en grandes déformations	sec	E _{sec} (GPa)	35,8±0,4	30,9±1,6	29,5±0,3	28,9±1,0	29,2±1,2	22,9±1,3
	saturé	E _{sat} (GPa)	35,5±0,9	28,4±0,9	27,7±3,1	27,9±0,4	27,4±2,8	21,3±1,1
Densité moyenne des dalles	sec	ρ _{sec} (kg/m ³)	2381±13	2335±12	2316±13	2302±8	2312±12	2252±7
	saturé	ρ _{sat} (kg/m ³)	2441±8	2469±11	2457±13	2447±7	2455±12	2405±11
Porosité acc. à l'eau		φ (%)	12,5±0,3	14,3±0,2	15,5±0,5	16,0±0,7	15,9±0,8	18,1±1,0
Porosité globale par intrusion de mercure		φ _{Hg} (%)	10,3	15,7	15,8	15,1	16,9	19,1

Tableau 1 : Caractéristiques des bétons étudiés

La microstructure des bétons a été caractérisée par porosimétrie par intrusion de mercure. La figure 1 montre que les bétons G2, G3, G3a et G7 présentent des distributions de pores similaires alors que les pores de G1 sont beaucoup plus fins et ceux de G8 plus grossiers, en accord avec les rapports E/C des bétons et la présence de fumées de silice dans G1.

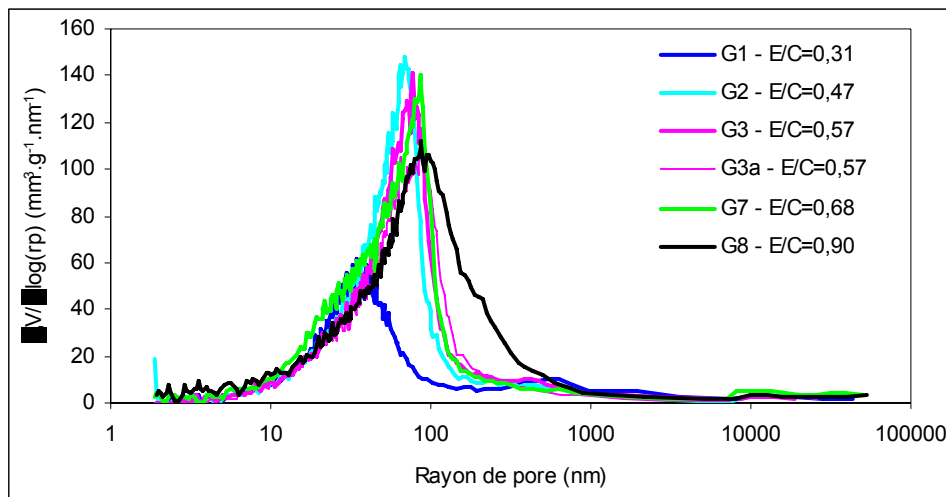


Figure 1 : Distribution volumique des pores des bétons

Mesures non destructives par propagation d'ondes mécaniques

Les **ondes de surface** ont été utilisées en vue de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau en fonction de la profondeur à partir d'un dispositif expérimental de surface. Les vitesses de propagation (ici les vitesses de phase) varient avec la longueur d'onde, qui est reliée à la profondeur d'investigation [2]. Les ondes de surface sont générées avec un transducteur piézo-électrique IMASONIC au contact, centré sur la fréquence 120 kHz [3]. La source est fixe et située à une extrémité de la dalle. La réception est assurée par un interféromètre laser POLYTHEC (OFV-505 + OFV-5000 + VD-02) mesurant une vitesse particulière. Grâce à un robot conçu spécialement pour le projet, l'interféromètre laser se déplace sur l'axe de la face supérieure de la dalle avec un pas de mesure de 5 mm sur une longueur de 0,43 m. L'analyse des signaux permet de calculer la vitesse de phase (V_{ϕ_3}) correspondant à la longueur d'onde égale à 3 cm, et une profondeur d'auscultation de l'ordre de 1,5 à 2 cm.

La technique de mesure par **impact-écho** a été utilisée en vue d'obtenir les propriétés élastiques dynamiques des bétons. Le principe de cette technique consiste en une analyse fréquentielle d'ondes mécaniques se propageant dans une structure en béton suite à un choc [4]. Le choc et le capteur à pointe mesurant des déplacements de la surface auscultée sont situés à faible distance l'un de l'autre. Pour une dalle de dimensions infinies, la fréquence de résonance détectée correspond à la fréquence qui annule la vitesse de groupe (la vitesse de phase restant finie) du mode S1 des ondes de Lamb [5]. Ici, les essais étant réalisés sur des dalles de dimension finies, cette fréquence particulière doit être cherchée parmi les différentes fréquences de résonance de la dalle suite à un impact au centre de sa face supérieure. L'analyse de 2 ou 3 (selon l'atténuation du matériau) des fréquences d'amplitudes les plus importantes, permet de calculer la vitesse des ondes de compression se propageant dans toute l'épaisseur des dalles ou le module élastique dynamique (E_{dyn}), en utilisant les densités mesurées sur les dalles (Tableau 1).

Mesures non destructives par propagation d'ondes électromagnétiques

La technique capacitive, longtemps étudiée au sein du réseau technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées pour la mesure de la teneur en eau dans les bétons et maçonnerie, a été récemment testée lors du projet RGCU (Evaluation de la dégradation du béton d'enrobage, 2001-2004) [6]. Le principe de cette technique repose sur la mesure de la fréquence de résonance d'un circuit oscillant (autour de 30-35 MHz) entre deux électrodes posées sur du béton. Si on considère ces deux électrodes métalliques, elles constituent avec

le matériau environnant un condensateur diélectrique dont la capacité exprimée en farad dépend de la géométrie des électrodes et de la valeur de la constante diélectrique relative ϵ_r du matériau. En pratique, cela se traduit par une fréquence de résonance qui varie en fonction de la nature diélectrique du béton, qui est principalement liée à la teneur en eau, à la nature des granulats et au rapport E/C. En augmentant la taille des électrodes, on augmente le volume de matériau ausculté. Ainsi pour les grandes électrodes dont les résultats sont présentés ici, le béton est ausculté sur une profondeur de 7-8 cm.

La dernière technique employée dans cette étude est la technique radar. Elle utilise une antenne bi-statique, de fréquence centrale 1,5 GHz, adaptée de façon à pouvoir modifier l'écartement entre émetteur et récepteur (offset). En étudiant les temps de déplacement de l'onde directe dans le matériau, on peut en déduire la constante diélectrique du milieu, sur une profondeur supérieure à 10 cm. Cette approche vient compléter celle de la technique capacitive à plus haute fréquence [6].

ANALYSE DES RESULTATS EN FONCTION DE LA POROSITE DES BETONS

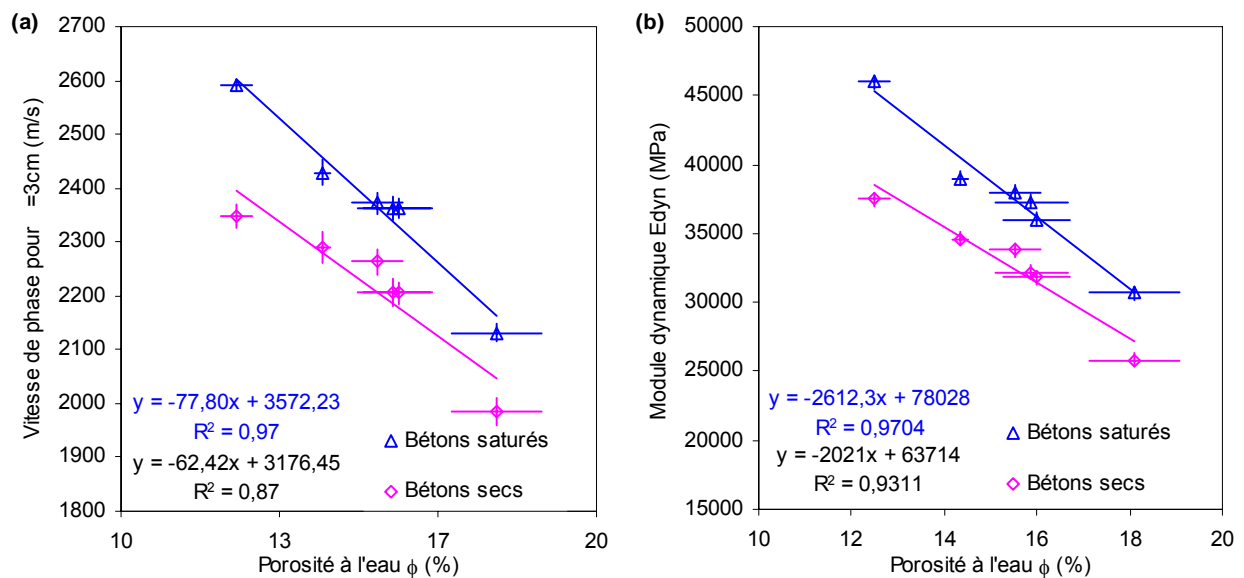


Figure 2 : Corrélation avec la porosité des 6 bétons :

(a) Vitesse de phase correspondant à la longueur d'onde de 3 cm (banc LASER)

(b) Module élastique dynamique (méthode par impact écho)

Les résultats obtenus par **propagation d'ondes mécaniques** sont cohérents entre eux bien que dans un cas il s'agit de la résonance d'un bloc de béton de 12 cm d'épaisseur alors que, dans l'autre, les ondes de surface se propagent dans les 2-3 premiers centimètres des dalles, où l'effet de paroi modifie les propriétés du matériau. Dans l'avenir, l'analyse inverse des vitesses de phase en fonction de la fréquence (correspondant à des profondeurs d'auscultation différentes), doit permettre de déterminer les gradients des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur [7].

Les résultats des mesures ND sur les dalles de béton sèches et saturées ont été comparés aux résultats de porosité accessible à l'eau. La figure 2 montre que la vitesse des ondes de surface $V_{\phi 3}$ (Figure 2-a) et le module élastique dynamique par impact écho (Figure 2-b) sont très bien corrélés avec la porosité du béton, en accord avec les résultats obtenus par pulse écho [8, 9]. De même ces résultats (Figure 3) obtenus par propagation des ondes mécaniques (correspondant à de petites déformations) sont corrélés linéairement avec les modules élastiques obtenus de manière destructive sur des éprouvettes cylindriques

soumises à des chargements cycliques sous presse (correspondant à de grandes déformations). Cependant, le module élastique en grandes déformations du béton saturé est inférieur à celui du béton sec alors que le module dynamique E_{dyn} du béton saturé est supérieur à celui du béton sec.

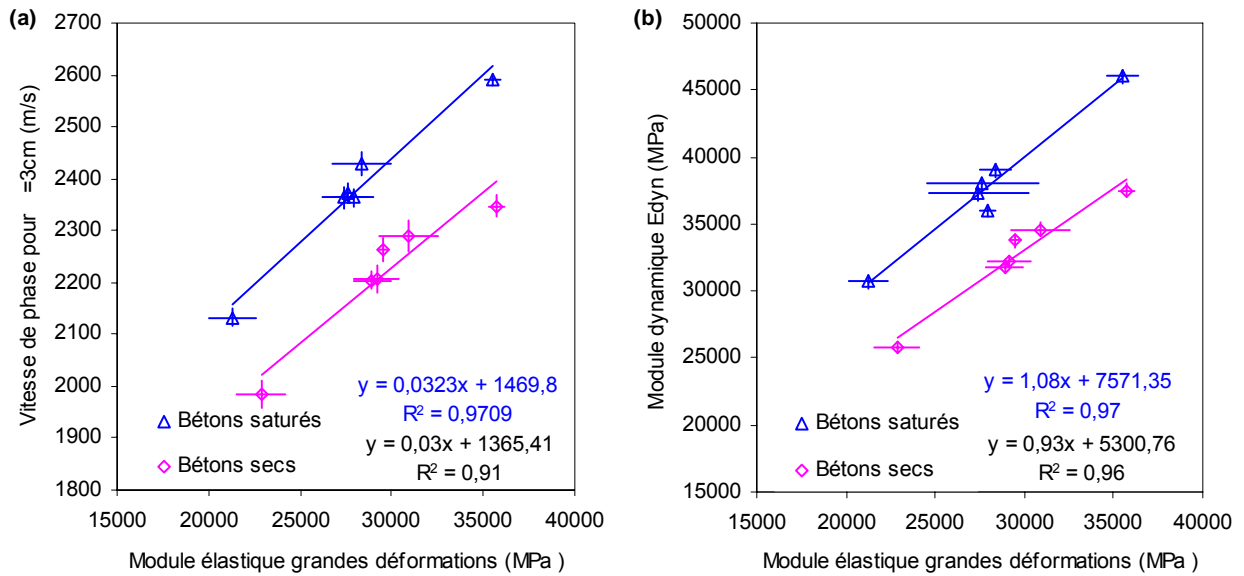


Figure 3 : Corrélation avec le module élastique en grandes déformations :
 (a) Vitesse de phase correspondant à la longueur d'onde de 3 cm (banc LASER)
 (b) Module élastique dynamique (méthode par impact écho)

Les permittivités diélectriques relatives obtenues par les deux **méthodes électromagnétiques** mises en œuvre (radar et sondes capacitives) sont très faiblement corrélées à la porosité du matériau mais elles sont influencées par ce paramètre.

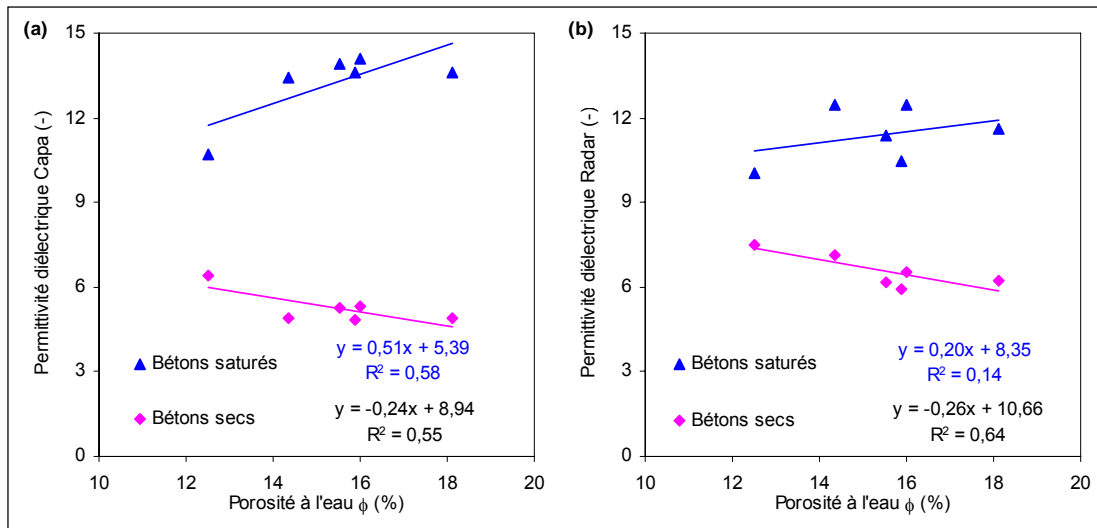


Figure 4 : Corrélation avec la porosité des 6 bétons :
 (a) Permittivité diélectrique réelle (méthode par sondes capacitives : grandes électrodes)
 (b) Permittivité diélectrique réelle (méthode Radar)

ANALYSE DES RESULTATS EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE DES BETONS

Les méthodes par **propagation d'ondes électromagnétiques** donnent des résultats concordants, corrélés à la teneur en eau volumiques (W) des dalles de béton (Figures 5 et 6). Notons que la permittivité ϵ_r du béton G1 évolue différemment en fonction de W que celle des autres formulations. En effet, le béton G1, de faible E/C et contenant des fumées de silice, a une microstructure plus fine que les autres bétons (Figure 1) donc son degré de saturation est plus difficile à maîtriser.

La permittivité ϵ_r déterminée par méthode radar varie linéairement avec la teneur en eau pour les bétons G2, G3, G3a, G7 et G8, formulés avec les mêmes granulats et le même ciment mais de rapport E/C différents (Figure 5) en accord avec [10, 11].

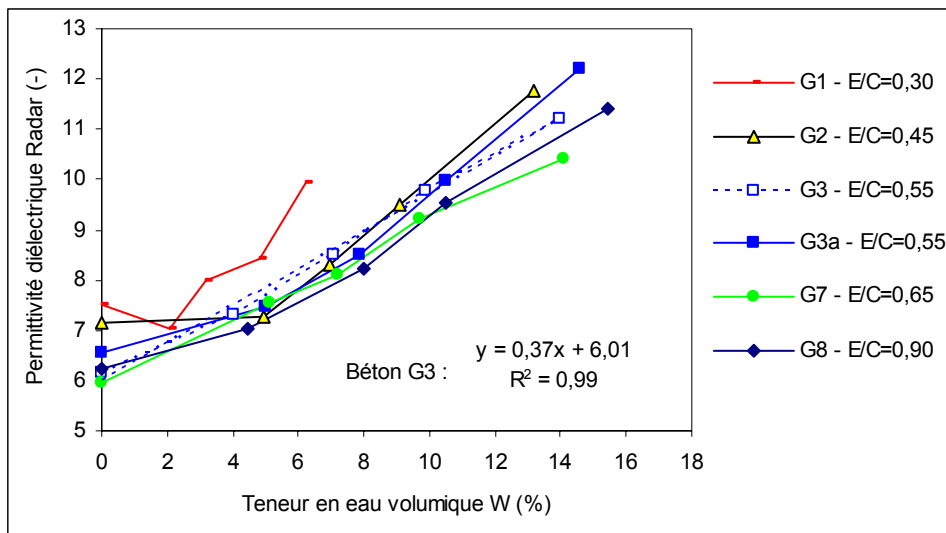


Figure 5 : Permittivité diélectrique réelle en fonction de la teneur en eau volumique (méthode Radar)

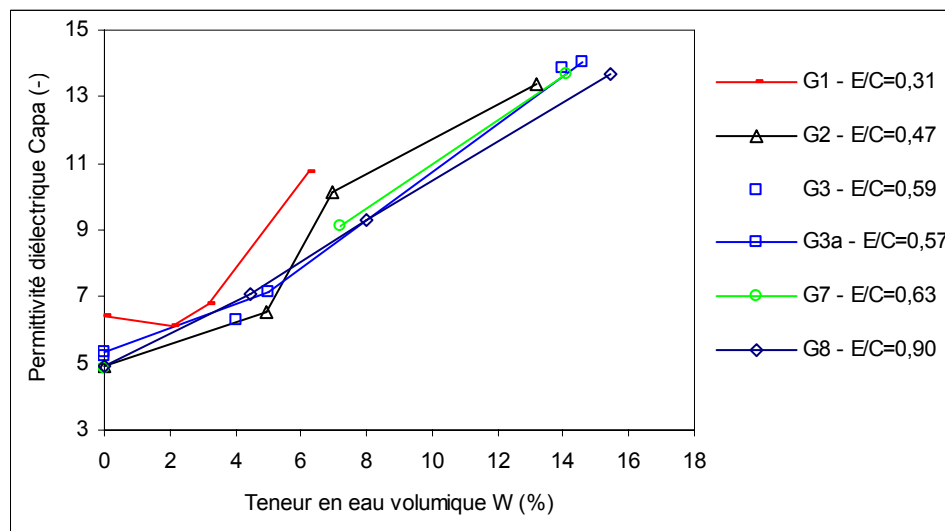


Figure 6 : Permittivité diélectrique réelle en fonction de la teneur en eau volumique (méthode par sondes capacitives : grandes électrodes)

La permittivité ϵ_r mesurée par la sonde capacitive à grandes électrodes semble aussi être une fonction linéaire de la teneur en eau volumique W , mais le dispositif ayant été endommagé au cours de la campagne expérimentale de 2007, il manque une partie des résultats autour de 10% (Figure 6). Des mesures réalisées avec des électrodes de différentes tailles doivent permettre d'évaluer les gradients de teneur en eau en fonction de la profondeur [6].

En ce qui concerne les résultats de **propagation des ondes mécaniques**, on remarque de même, d'une part, que les ondes de surface (Figure 7) et la méthode impact écho (Figure 8) fournissent des mesures concordantes et, d'autre part, que le comportement du béton G1 est différent de celui des autres bétons.

Les mesures par propagation d'ondes mécaniques sont influencées par la teneur en eau volumique [12, 9]. Pour W comprise entre 4% et 14% environ (taux de saturation $40\% < S < 100\%$), la vitesse de phase des ondes de surface et le module dynamique augmentent avec le taux de saturation, sauf pour le béton G8. Par contre, pour les bétons G2, G3, G3a et G7, la vitesse de phase V_{ϕ_3} et le module E_{dyn} du béton sec sont élevés, supérieurs ou égaux au module correspondant à une teneur en eau de l'ordre de 10%, sauf pour G1 et G8. Ce phénomène a été observé pour la vitesse des ondes de compression (V_P) et de cisaillement se propageant dans des sables et des grès [13] ainsi que pour les ondes de compression dans les roches calcaires [14]. Ces auteurs expliquent l'évolution de la vitesse V_P , quand la teneur en eau augmente, par la compétition entre l'augmentation de la densité et celle du module de compressibilité des sols et roches. La forme de cette évolution et la valeur du minimum dépendant du réseau du milieu poreux. Pour les taux de saturation très faibles, la vitesse V_P diminue jusqu'à une valeur minimum du fait de l'augmentation de densité [14], dans les sables et les grès, les forces de liaison capillaires densifient le milieu poreux [13]. Pour les taux de saturation plus importants, au contraire, V_P augmente, car plus les milieux sont saturés, plus ils sont difficiles à comprimer et le module de compressibilité augmente plus vite que la densité. Ce phénomène n'a pas été observé dans les milieux cimentaires par [12, 9], soit parce que les milieux étudiés sont différents, soit, sûrement, parce le taux de saturation intermédiaire correspondant à une vitesse minimale n'a pas été étudié.

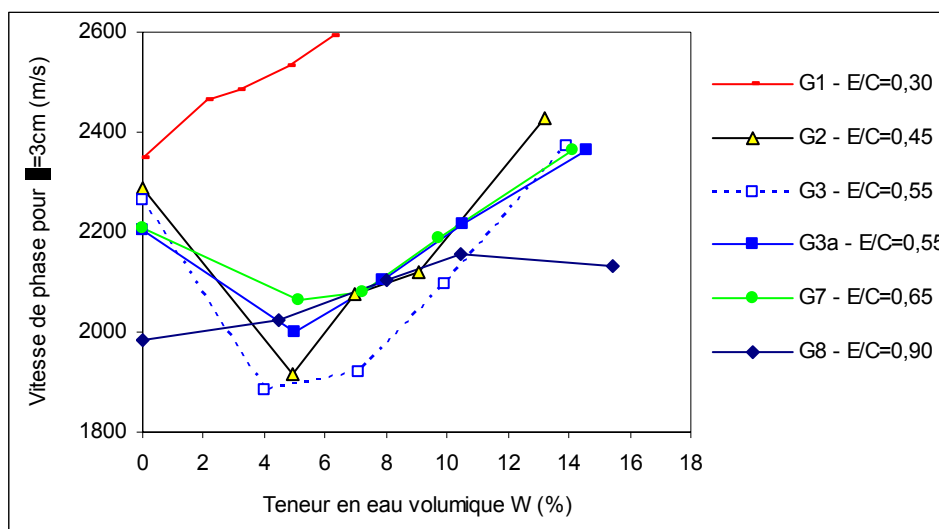


Figure 7 : Vitesse de phase correspondant à la longueur d'onde de 3 cm en fonction de la teneur en eau volumique (ondes de surface mesurées par interférométrie LASER)

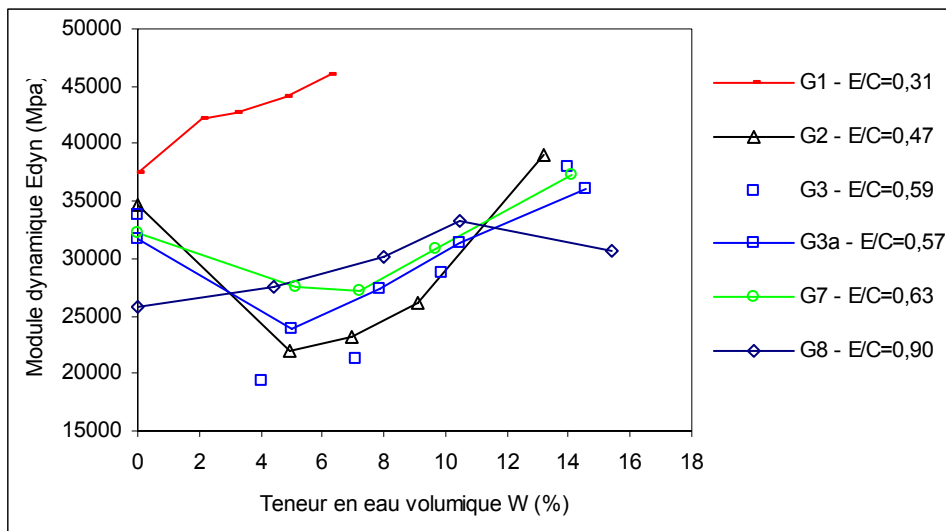


Figure 8 : Module élastique dynamique en fonction de la teneur en eau volumique (méthode par impact écho)

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats présentés ici ont montré que les mesures non destructives par propagation d'ondes mécaniques et électromagnétiques sont complémentaires. Les ondes électromagnétiques, légèrement influencées par la porosité et la nature des constituants (fumées de silice de G1), fournissent des constantes diélectriques bien corrélées à la teneur en eau. Connaissant un état de référence du matériau étudié, il sera ensuite possible de déterminer la teneur en eau atteinte suite à différentes expositions thermohygro-métriques externes. Les ondes mécaniques, influencées par la teneur en eau, permettent d'évaluer les propriétés mécaniques telles que la porosité et le module élastique dynamique, différent du module élastique en grandes déformations obtenu par les essais destructifs sous presse. Cependant, une plus grande précision sera obtenue sur la porosité et le module, quand l'effet de la teneur en eau sera pris en compte. En outre, l'effet non linéaire de la teneur en eau sur la vitesse de phase des ondes de surface et sur le module dynamique obtenu par impact écho a été mis en évidence sur des bétons ; cet effet non linéaire de la teneur en eau sur la vitesse des ondes longitudinales et transversales avait été déjà observé dans les sols et les roches dans la littérature. Il semble donc indispensable d'ausculter les bétons avec ces techniques complémentaires et d'en combiner les résultats pour en enrichir l'analyse et pour caractériser le matériau.

Remerciements

Nous remercions chaleureusement Michel Valade (LRPC de Lyon) et Ludovic Routhe (LCPC-Paris) pour leur contribution à l'étude expérimentale, Louis-Marie Cottineau (LCPC-Nantes) et son équipe pour la conception du robot LASER et des sondes capacitatives, ainsi toute l'équipe du LMDC intervenant dans le projet ANR-SENSO, en particulier Jean-Paul Balayssac.

Références bibliographiques

- [1] Balayssac, J-P., Laurens, S., Arliguie, G., Evaluation de l'état des ouvrages en béton par combinaison de techniques non destructives, Actes des journées COFREND, Toulouse, France, Mai 2008.
- [2] Bodet, L., van Wijk, K., Bitri, A., Abraham, O., Côte, Ph., Grandjean, G., and Leparoux, D., Surface-wave dispersion inversion limitations from laser-Doppler experiments, Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2005, vol. 10, issue 2, 151-162.
- [3] M. Chekroun, L. Le Marrec, O. Abraham, A. Derode, D. Clorennec, A. Le Brun, M. Campillo, Multiple scattering of ultra-sonic propagation for non destructive evaluation of concrete; first experiment, Proceedings of NDT-CE Conference, St Louis, USA, 2006, pp. 365-370.
- [4] Sansalone M.J., Streett W.B., *Impact echo : non-destructive evaluation of concrete and masonry*, Bullbrier Press, 1997.
- [5] Gibson A, Popovics J., Lamb wave basis for impact-Echo method analysis, Journal of Engineering mechanics, april 2005, pp 438-443.
- [6] Dérobert X., Iaquina J., Klysz G., Balayssac J.P., Use of capacitive and GPR techniques for non-destructive evaluation of cover concrete, NDT&E Int., Vol. 41, 2008, pp. 44-52.
- [7] Chekroun, M., Lu, L., Le Marrec, L., Abraham, Villain, G., O., Durand, O., Diffusion multiple des ultrasons pour l'évaluation non destructive du béton avec des ondes de surface, Actes des journées COFREND, Toulouse, France, Mai 2008.
- [8] Vergara, L., Miralles, R. , Gosálbez, J., Juanes, F. J., Ullate, L. G., Anaya, J. J., Hernández, M. G., Izquierdo, M. A. G., NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar, NDT & E International, Vol. 34, Issue 8, 2001, pp 557-562
- [9] Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., Kaczmarek, M., Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content, Cement and Concrete Research, Vol. 36, Issue 4, April 2006, pp 625-633.
- [10] Soutsos, M. N., Bungey, J. H., Millard, S. G., Shaw, M. R., Patterson, A., Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing, NDT & E International, Vol. 34, Issue 6, 2001, pp 419-425.
- [11] Klysz, G., Balayssac, J.-P., Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar, Cement and Concrete Research, Vol. 37, Issue 8, 2007, pp. 1164-1171.
- [12] Ohdaira, E., Masuzawa, N., Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete - the possibility of NDE, Ultrasonics, Vol. 38, Issues 1-8, 2000, pp 546-552.
- [13] Murphy, W. M., Effects of partial water saturation on attenuation in Massilon sandstone and Vycor porous glass, J. Acoustical Society of America, Vol. 71, Issue 6, 1982, pp1458-1468.
- [14] Homand, F., Duffaut, P., Manuel de mécanique des roches, Tome 1, fondements, Comité français de mécanique des roches, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2000, 267p.