

Proposition d'une méthodologie de calibration de la vitesse de propagation des ondes radar pour la mesure de la teneur en eau du béton

C. GOMEZ-CARDENAS^(a), J.P. BALAYSSAC^(b), G. KLYSZ^(b)

a. I2M, dpt GCE, Université Bordeaux 1, CNRS, INRA, 351 cours de la libération, 33405 Talence cedex

b. LMDC Université de Toulouse ; UPS, INSA ; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135 av de Rangueil, Toulouse, France

Résumé :

Le radar de type GPR est très utilisé en Génie Civil pour le repérage des armatures de renforcement du béton. La technique s'est imposée face à des appareils d'un prix de revient plus faible grâce, d'une part à son rendement élevé et d'autre part à ses capacités d'investiguer des profondeurs importantes. Ce rendement élevé peut également être mis à profit pour la caractérisation physico-chimique du béton, en particulier pour la mesure de sa teneur en eau. Des travaux en laboratoire ont montré qu'un des observables les plus sensibles à la teneur en eau volumique est la vitesse de propagation du signal direct qui se propage en surface. Une base de données conséquente entre cet observable et la teneur en eau a été constituée et elle devrait permettre de déterminer la teneur en eau à partir d'une mesure de vitesse. Sa mise en œuvre sur ouvrages réels a révélé les limites de cette approche. En effet, même si la teneur en eau est le paramètre le plus influent, la vitesse de propagation est sensible à d'autres facteurs, en particulier la nature des granulats. Il paraît donc nécessaire de calibrer la mesure pour chaque ouvrage, de façon simple et rapide. Une méthodologie de calibration est proposée sur la base d'une mesure de la vitesse en transmission des ondes radar sur une carotte de béton prélevée dans l'ouvrage et conditionnée à différentes teneurs en eau. Un dispositif simple de mesure de la vitesse en transmission sur carottes est testé et son efficacité est démontrée. Les vitesses mesurées en transmission et en surface étant bien corrélées, il est possible d'établir le modèle de corrélation entre vitesse de l'onde transmise et teneur en eau volumique propre au matériau testé qui pourra être utilisé pour la calibration des mesures réalisées en surface sur l'ouvrage réel.

Abstract :

GPR is more and more of interest as a NDT method for the assessment of civil engineering structures. One of the main usual applications of GPR is for the localisation of metallic reinforcement inside concrete structures. Its rapidity of implementation enables to use it in large structures, which is convenient in comparison with less expensive methods but more limited for large scale soundings. This advantage of GPR can also be used for other topics such as moisture concrete assessment. An interesting feature regarding this topic is the velocity of the direct wave propagating directly from the transmitter to the receiver at the surface of the structure. An important database involving a large range of concretes was realised and empirical laws between direct wave velocity and moisture content were built. The idea could be to use these laws for in situ assessment of moisture content. But even if moisture is the most influent parameter some other ones can modify the measurement (nature of aggregate for instance). So it is relevant to provide a methodology for calibrating the measurement for each structure by a simple and fast procedure. Different ways can be proposed. In this study we propose to calibrate the measurement on a core taken from the structure. The velocity of radar waves is measured in transmission on these cores by means of a very simple methodology at different moisture contents. Then a calibration law is drawn which can be used for on site assessment of moisture content from the velocity measured at the surface. The methodology is validated on full-scale models.

Mots clefs : contrôle non destructif, GPR, teneur en eau, calibration

1 Introduction

Dans le contexte très actuel où l'on se préoccupe de plus en plus sérieusement du patrimoine bâti au cours des trente dernières années, l'intérêt d'évaluer l'état des structures construites en béton devient de plus en plus important. La connaissance de l'état du matériau apparaît désormais comme une tâche nécessaire, en particulier s'il s'agit de situer l'ouvrage dans son cycle de vie. Devant l'importance et la diversité de ce patrimoine les coûts engendrés par ce besoin sont quasiment rédhibitoires. Jusqu'à aujourd'hui, les moyens de reconnaissance les plus éprouvés sont basés sur l'inspection visuelle et sur l'analyse de prélèvements sur l'ouvrage. Pour l'inspection visuelle, même si elle doit demeurer un préalable indispensable, elle ne permet pas de fournir des informations quantitatives sur l'état de la structure. En outre, elle est largement insuffisante dans une démarche préventive où l'on souhaite éviter que les dommages subis par l'ouvrage ne deviennent irréversibles et dans ce cas, ils ne sont que rarement visibles. En ce qui concerne l'analyse de prélèvements, elle apparaît comme la solution idéale car elle permet de caractériser de la façon la plus précise l'état du matériau, à condition toutefois que les moyens d'investigation soient bien maîtrisés. Mais elle présente l'inconvénient d'être intrusive, ce qui peut dans certains cas altérer l'intégrité d'une des fonctions de l'ouvrage. De plus, les coûts conjugués du prélèvement et de la caractérisation en laboratoire spécialisé ne permettent pas de multiplier les points de mesure. Pourtant, face à un matériau aussi hétérogène que le béton et à des structures parfois complexes de par leur géométrie ou les procédés constructifs, cette multiplication des points de mesure est inévitable pour accéder à la variabilité du matériau. Le recours à des techniques non intrusives et permettant la multiplication des points de mesure à moindre coût, s'avère donc incontournable. Ce qui peut paraître comme une évidence conduit pourtant à constater que le secteur du Génie Civil et en particulier celui des structures en béton, est le plus en retard dans la mise en œuvre de l'évaluation non destructive (END) pour la caractérisation du béton sur ouvrages.

Pourtant des moyens existent et pour la plupart leur potentiel vis-à-vis d'un nombre assez étendu de problématiques a été démontré en laboratoire mais aussi sur ouvrages réels [1]. Des méthodes par propagation d'ondes ultrasonores de surface particulièrement adaptées à la caractérisation mécanique du béton ont été développées, testées et validées [2]. Des méthodes électriques et électromagnétiques, dont l'usage premier a souvent été détourné, ont également prouvé leur efficacité pour la caractérisation des propriétés physiques (porosité, teneur en eau et en sels) du béton [3, 4]. Des développements visant à proposer une méthodologie pour la combinaison de ces techniques ont également été réalisés [1].

Des progrès doivent encore être accomplis pour transposer les méthodologies qui ont été développées en laboratoire ou sur des maquettes, aux conditions réelles des ouvrages. Outre le potentiel démontré de l'END, la question centrale demeure de savoir comment extraire des observables issus des mesures de l'END, les indicateurs d'état du matériau pertinents pour les modèles d'ingénierie. La solution la plus immédiate consiste à utiliser les modèles empiriques développés en laboratoire pour relier les observables aux indicateurs et pour les recalibrer afin de pouvoir les mettre en œuvre sur ouvrages. Diverses alternatives sont proposées pour certains indicateurs dans le cadre d'un projet national. La méthode la plus fiable semble être de procéder à un recalage des lois déterminées en laboratoire par des mesures effectuées sur des prélèvements. Une des voies possibles consiste à reconstruire la loi reliant l'observable à l'indicateur mesuré directement sur le prélèvement, ce qui pourrait s'apparenter à une procédure de calibration de la technique. L'objectif de cette communication est de proposer un exemple d'application. L'observable étudié est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques radar qui est pertinente pour la mesure de la teneur en eau du béton [5]. Nous allons tout d'abord montrer le principe de mesure de la vitesse de propagation des ondes radar à partir d'antennes couplées puis nous montrerons comment cet observable est affecté par la teneur en eau du béton. Ensuite nous présenterons la méthodologie de calibration de la technique. Nous décrirons le dispositif expérimental et nous quantifierons l'incertitude de la mesure utilisée pour effectuer cette calibration.

2 Principe de la mesure de vitesse des ondes radar

L'intérêt de développer le radar comme outil d'aide au diagnostic du béton d'enrobage repose sur le fait que la propagation des signaux électromagnétiques dans le béton est très affectée par la teneur en eau et la présence éventuelle de chlorures, qui sont des indicateurs essentiels par exemple pour la détection de la corrosion. Les antennes sont très facilement manipulables (poids et encombrement faibles, unité de mesure portative et autonome). En outre, le fonctionnement ne nécessite pas l'accès aux deux faces d'une paroi (intérêt pour les murs de soutènement, les barrages, etc...). Enfin, les investigations sont très rapides et ne

nécessitent pas une interruption du fonctionnement des ouvrages, ce qui constitue un avantage notamment pour ceux qui sont liés au trafic routier ou ferroviaire.

La figure 1 présente le système radar utilisé. Il s'agit d'un dispositif commercial (GSSI®) composé d'une unité centrale gérant les acquisitions et d'un ou plusieurs blocs d'antennes, chaque bloc étant constitué à la fois de l'émetteur et du récepteur espacés d'une distance fixe (figure 1a). Sur de tels systèmes la mesure de vitesse implique de travailler avec deux blocs, l'un n'agissant que l'émission et l'autre n'agissant que la réception.



(a) : unité centrale (à gauche) et antennes avec électronique (à droite)

(b) Dispositifs de mesure de vitesse
 - en haut : WARR et CMP
 - en bas : fixed-offset (boîtier ouvert)

Figure 1 : système radar utilisé

La fréquence centrale dans l'air des antennes utilisées est de 1.5 GHz. L'objectif étant de caractériser le béton de surface, on exploite exclusivement le signal direct qui se propage de l'émetteur au récepteur. C'est le premier signal enregistré par le récepteur [4]. Les techniques usuelles de mesure de la vitesse de cette onde directe sont (figure 1b) :

- Ouverture d'angle (WARR pour Wide Angle Reflection Refraction) : l'émetteur reste fixe et le récepteur se déplace ce qui permet de pointer les temps d'arrivée du signal émis pour les différentes positions du récepteur. Le tracé de la droite de régression permet de calculer la vitesse.
- Point milieu commun (PMC) : l'émetteur et le récepteur se déplacent de la même distance par rapport à un point fixe et le temps d'arrivée est pointé pour chaque espacement. Comme dans le cas précédent le tracé de la droite de régression permet de calculer la vitesse.
- Fixed-offset (espacement fixe) : il s'agit de travailler avec un émetteur et deux récepteurs espacés d'une distance invariante et de déterminer l'écart de temps d'arrivée d'une émission entre les deux récepteurs et connaissant la distance entre les deux récepteurs, de calculer la vitesse. La réduction de la taille du dispositif comparée aux méthodes WARR ou PMC permet de s'affranchir plus facilement de la présence des aciers de renforcement.

Des travaux antérieurs ont démontré la sensibilité de la vitesse de l'onde directe à la teneur en eau [5]. La vitesse diminue de façon linéaire avec la teneur en eau à cause des phénomènes de polarisation de la molécule d'eau qui se traduisent par des pertes diélectriques et donc à un ralentissement des ondes.

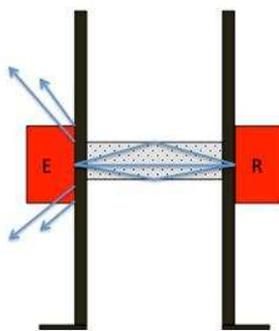
3 Mesure de la vitesse des ondes radar sur prélèvements

3.1 Descriptif du dispositif de mesure

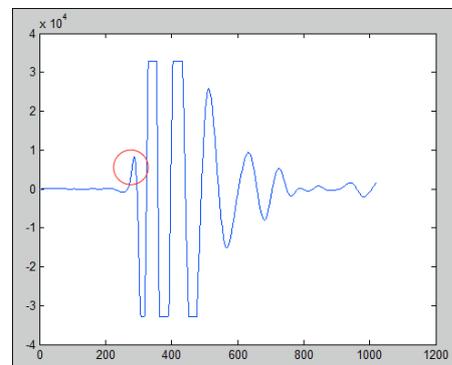
Les prélèvements réalisés sur les ouvrages sont généralement des cylindres obtenus par carottage sous eau avec un outil diamanté. Le diamètre de ces carottes est pris égal à 3 à 4 fois la dimension du plus gros granulats. Pour les ouvrages classiques de Génie Civil (hors très grands ouvrages comme les barrages), la

dimension des plus gros granulats est de l'ordre de 20 mm. Les carottes ont donc généralement un diamètre minimal de 75 mm. Ces carottes peuvent avoir une longueur variable mais s'il est prévu des mesures de résistance en compression la norme prévoit un rapport hauteur sur diamètre égale à 2, ce qui conduit à une hauteur de 150 mm pour les carottes de 75 mm de diamètre. Le dispositif de mesure de vitesse doit donc pouvoir s'adapter à ces dimensions.

La méthodologie envisagée consiste à effectuer une mesure en transmission sur la carotte en utilisant un des blocs d'antenne comme émetteur et l'autre comme récepteur. Connaissant la longueur de la carotte, la mesure du temps de vol permet de déterminer la vitesse de propagation. Un porte échantillon composé de deux écrans verticaux carrés de 1 m de côté percés au centre reçoit la carotte (Figure 2a). Le lobe de rayonnement de l'antenne n'étant pas suffisamment focalisé compte tenu du faible diamètre de l'échantillon de béton il est nécessaire de recouvrir les papiers d'un film réfléchissant (papier aluminium auto-adhésif). Ainsi la partie du signal qui ne traversera pas le béton sera réfléchiée vers l'arrière de l'écran. La carotte est également recouverte de papier aluminium auto-adhésif pour guider les ondes à travers le béton et éviter ainsi une perte d'énergie trop importante. La figure 2b montre un exemple de signal reçu par l'antenne réceptrice. On remarque nettement un premier pic de variation d'amplitude du signal que l'on attribue à la réception du signal transmis.



(a) : porte échantillons pour la mesure en transmission avec antenne émettrice (E) et antenne réceptrice (R)



(b) : signal reçu par l'antenne réceptrice (en abscisse le temps en ns et en ordonnée la variation d'amplitude en unité arbitraire)

Figure 2 : dispositif conçu pour la mesure en transmission et signal reçu par l'antenne réceptrice

Une des particularités du système radar utilisé est qu'il ne permet pas de connaître l'instant d'émission du signal transmis par l'antenne émettrice. Pour être plus précis, l'origine de l'axe du temps sur la figure 3b ne correspond pas à l'instant d'émission. Il est donc nécessaire de procéder à un recalage des signaux. Pour cela on procède à la même mesure mais sur un tube de mêmes dimensions que la carotte. Le dispositif est identique et la mesure est effectuée à la suite de celle réalisée sur le béton sans arrêter l'émission du signal. Ainsi l'instant d'émission reste identique même s'il est inconnu. On connaît la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans l'air (3.10^8 m/s ou alors 30 cm/ns) et la longueur du tube est strictement identique à celle de la carotte.

Le calcul de la vitesse à travers le béton $v_{\text{béton}}$ se fait par la relation ci-dessous :

$$v_{\text{béton}} = \frac{d}{t_{\text{béton}} - (t_{\text{air}} - \frac{d}{v_{\text{air}}})} \quad (1)$$

- d : longueur de l'échantillon
- $t_{\text{béton}}$: temps d'arrivée du signal dans le béton
- t_{air} : temps d'arrivée du signal dans l'air
- v_{air} : vitesse de propagation des ondes radar dans l'air

3.2 Résultats.

Le dispositif a été testé sur deux carottes de longueurs différentes (16 et 20 cm) prélevées dans un béton identique et pour différents degrés de saturation. Chaque carotte a été successivement conditionnée à trois degrés de saturation différents (0, 50 et 100%) afin de vérifier la sensibilité de la mesure à la variation de la

teneur en eau. Pour chaque carotte et chaque degré de saturation la mesure a été effectuée six fois afin de vérifier la répétabilité. Les résultats sont présentés sur la figure 3. On remarque que la vitesse diminue avec le degré de saturation ce qui est conforme aux résultats de la littérature. L'écart type obtenu à la suite des six mesures effectuées est toujours très faible et conduit à un coefficient de variation inférieur à 2% quels que soient la longueur de la carotte et le degré de saturation, ce qui montre la bonne répétabilité de la mesure.

Enfin, la relation obtenue est indépendante de la longueur de l'échantillon ce qui démontre encore une fois la fiabilité du mode opératoire. Nous avons également pu définir la longueur minimale de la carotte qui est de 15 cm. En dessous de cette longueur il est impossible de distinguer le pic de variation d'amplitude sur le signal reçu par le récepteur. En effet dans ces conditions, la longueur de la carotte devient trop proche de la longueur d'onde du signal émis.

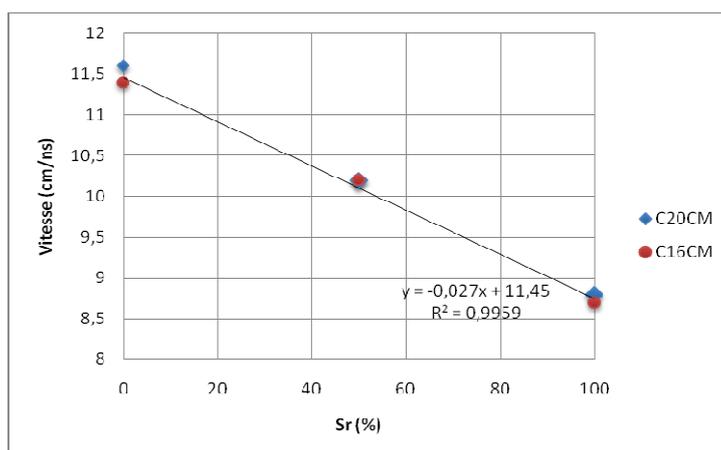


Figure 3 : relation entre la vitesse des ondes radar mesurées en transmission sur les carottes de 16 et 20 cm et le degré de saturation du béton

4 Mise en œuvre de la méthodologie sur des maquettes.

Nous avons mis en œuvre la procédure sur deux maquettes construites durant le projet ANR-SENSO et entreposées au LMDC de Toulouse à l'extérieur [1]. Ces maquettes comportent une partie verticale de 15 cm d'épaisseur, sans ferrailage. Deux maquettes M3 et M8 qui diffèrent par la porosité du béton (respectivement 15% pour M3 et 18% pour M8) sont disponibles. Les constituants du mélange (granulats, ciment) sont en revanche identiques. Des mesures ont été effectuées en surface en mode fixed-offset et en transmission sur 6 points.

Tableau 1 : résultats des mesures de vitesse en surface et en transmission sur maquettes M3 et M8

Points	M3				M8			
	Surface (cm/ns)	E.T. (cm/ns)	Transm. (cm/ns)	E.T. (cm/ns)	Surface (cm/ns)	E.T. (cm/ns)	Transm. (cm/ns)	E.T. (cm/ns)
1	10,92	0,28	10,60	0,11	11,02	0,26	10,79	0,03
2	10,02	0,38	9,69	0,09	10,95	0,34	10,70	0,01
3	9,55	0,29	9,42	0,09	10,32	0,42	10,26	0,15
4	9,81	0,24	10,03	0,14	10,97	0,31	10,78	0,015
5	10,02	0,48	9,86	0,08	10,75	0,29	10,63	0,025
6	10,4	0,24	9,69	0,08	10,95	0,46	10,45	0,17
Moy.	10,12	0,27	9,78	0,23	10,83	0,39	10,60	0,21

Le tableau 1 synthétise les résultats de ces mesures. On remarque tout d'abord que la moyenne des vitesses obtenues sur M8 (en surface ou en transmission) est plus élevée que celle du mur M3. Les conditions de conservation sont strictement identiques les maquettes étant stockées en extérieur avec la même exposition. Dans de telles conditions, le degré de saturation est plus important pour le béton le moins poreux (M3) et on a vu (Figure 3) que la vitesse des ondes électromagnétiques diminue avec le degré de saturation. Les écart-

types sont plus élevés sur les mesures réalisées en surface que sur celles obtenues en transmission. En effet, la détermination du temps d'arrivée de l'onde dans le cas de la mesure en fixed-offset est en effet moins précise que pour la mesure en transmission.

Deux carottes ont ensuite été prélevées sur chaque mur respectivement aux points 2 et 4 pour M3 et 1 et 5 pour M8. Les carottes ont ensuite été conditionnées à différents états de saturation et les mesures en transmission ont été effectuées comme décrit dans la section 3. La figure 4 présente les résultats de ces mesures. On remarque que pour M8 la loi de calibration est unique alors qu'il existe deux lois significativement différentes pour M3. Dans ce cas, le béton n'est donc pas strictement identique aux points 2 et 4.

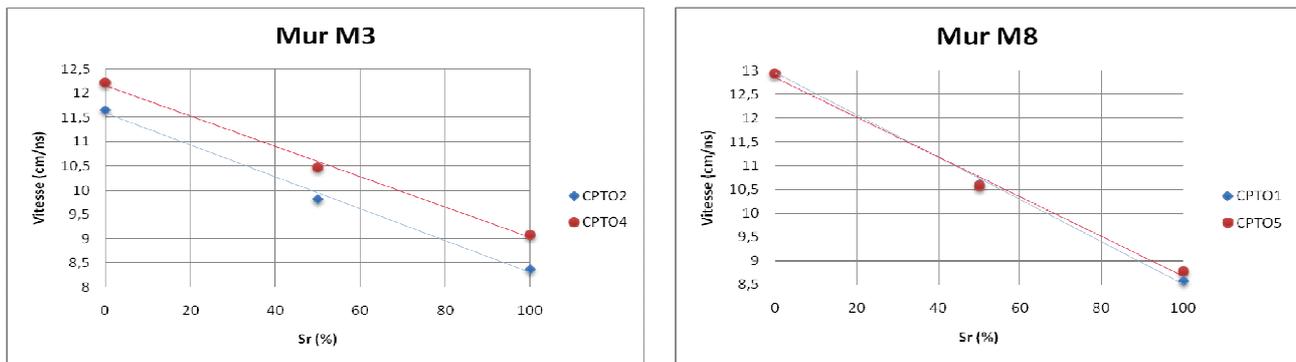


Figure 4 : résultats des mesures en transmission sur les carottes

L'utilisation de ces lois de calibration permet de déterminer le degré de saturation des bétons, en fonction de la vitesse mesurée en surface. Pour M3, on obtient ainsi un degré de saturation égal à 48% (point 2) et 72% (point 4). Une mesure de porosité des carottes permettrait de corroborer ces constatations. Pour M8 le degré de saturation est compris entre 42 et 44%.

5 Conclusion.

L'objectif de cette étude était de proposer une méthode de calibration de la technique radar pour la mesure de la teneur en eau des bétons d'ouvrage. Nous avons pour cela développé un dispositif simple permettant de mesurer la vitesse en transmission sur des prélèvements réalisés sur l'ouvrage. Ce dispositif permet de construire une loi de calibration en fonction du degré de saturation du béton. Cette loi peut ensuite être utilisée pour déterminer la teneur en eau à partir des vitesses mesurées en surface sur l'ouvrage. La procédure proposée a été mise en œuvre avec succès sur une maquette de laboratoire. Il reste encore à la valider sur un ouvrage réel et à déterminer le nombre minimal de prélèvements pour obtenir une calibration suffisamment représentative pour être généralisée à de grandes parties d'ouvrage.

References

- [1] J.-P. Balayssac, S. Laurens, G. Arliguie, D. Breyse, V. Garnier, X. Dérobert, B. Piwakowski, Description of the general outlines of the French project SENSO – Quality assessment and limits of different NDT methods, *Construction and Building Materials*, Volume 35, October 2012, Pages 131-138
- [2] M. Goueygou, O. Abraham, J.-F. Lataste, A comparative study of two non-destructive testing methods to assess near-surface mechanical damage in concrete structures, *NDT&E International*, 41 (6), pp. 448-456
- [3] C. Sirieix, J.F. Latatsté, D. Breyse, S. Naar, X. Dérobert, Comparison of non destructive testing : infrared thermography, electrical resistivity and capacity methods for assessing a reinforced concrete structure, *J. Building Appraisal*, Vol. 3, n. 1, pp. 77-88
- [4] S. Laurens, J.P. Balayssac, J. Rhazi, G. Arliguie, Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal, *Materials and Structures*, Vol.35, N°248, 2002, pp 198-203
- [5] G. Klysz, J.P. Balayssac, Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, N° 8, August 2007, Pages 1164-1171