B1-9

ESTIMATION DE LA TENEUR EN EAU PAR RADAR

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE	
OBJECTIF	Le diagnostic des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint nécessite souvent de connaître la teneur en eau du béton au niveau de la peau (dans les 5 à 10 premiers centimètres). La teneur en eau est un paramètre qui intervient dans un certain nombre de pathologies comme les réactions de gonflement interne du béton et la corrosion des aciers, ou dans des phénomènes comme le retrait et le fluage.
PRINCIPE	Les ondes électromagnétiques étant sensibles à la teneur en eau du béton, la technique radar est un des outils non destructifs pouvant caractériser cette teneur en eau. Toutefois, les matériels radar usuels n'étant pas dédiés à cette application, il est nécessaire de développer des méthodes d'acquisition et de traitement particuliers pour relier certains paramètres radar (observables mesurés ou déduits) à une estimation moyenne de la teneur en eau du béton de peau. Ces paramètres peuvent être : – soit la vitesse de propagation des ondes radar, qui est reliée à la constante diélectrique du milieu elle-même dépendante de la teneur en eau, – soit l'amplitude des signaux reçus, qui est reliée à la constante diélectrique et au facteur de pertes (affecté à la fois par la teneur en eau et par la présence d'ions en solution, comme les chlorures par exemple). La technique radar utilisée consiste à mesurer le signal direct émis depuis l'antenne émettrice vers l'antenne réceptrice à travers le béton. L'avantage de cette approche est de ne pas être dépendant d'un réflecteur noyé (armature, parement opposé) dont on ne connaît pas la position exacte. La méconnaissance de l'instant d'émission du signal par les systèmes radar classiques impose d'avoir recours à des procédures particulières, dont le principe consiste à modifier l'écartement entre antennes pour remonter à la connaissance de la vitesse (ou variations d'amplitude) des ondes radar. La taille des antennes fait que la zone investiguée dépasse 15 cm latéralement, et donc, cette méthodologie n'est applicable qu'au centre de mailles d'armatures de dimensions nettement supérieures en donnant une information moyennée sur les 5 à 10 premiers centimètres de béton. Sur l'ouvrage même, au droit des zones d'intérêt, on positionne, par marquage directement sur le parement, le ferraillage et autres anomalies détectées. L'objectif de cette étape est de localiser des points de mesures loin de ferraillage ou objet/anomalie en profondeur, et dont les échos radar viendraient interférer avec la mesure des ondes directes. Pour détecter le ferraillage et les objets/anomalies en profondeur, on peut utiliser des matériels tels que le pachomètre, le profomètre, le scanner électromagnétique ou le radar (en utilisation classique) en suivant la procédure E2-1. À noter que les trois premiers systèmes ne sont sensibles qu'à des éléments métalliques. Pour une auscultation complète, la technique radar est la plus adaptée, en utilisant des très hautes fréquences pour une meilleure résolution (fréquence centrale de préférence supérieure à 1,5 GHz). Si une phase de calibration est nécessaire, il est possible de relier, en chaque point, les constantes diélectriques mesurées et la teneur en eau du matériau béton ausculté. Pour cela, une démarche possible est de prélever une ou deux carottes du matériau béton sur la structure auscultée, de les conditionner à différents taux d'humidité homogènes contrôlés puis de mesurer leur constante diélectrique. Une courbe de régression peut alors relier la constante diélectrique d'une mesure à une estimation de teneur en eau moyenne sur les 5 à 10 premiers centimètres de béton.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non (hors phase de calibration éventuelle par carottage)
MATURITÉ	Méthodologie validée fin des années 2000 (projet ANR SENSO)

MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	La méthodologie reposant sur la mesure d'un signal directement transmis d'une antenne émettrice vers une antenne réceptrice, l'opérateur utilise généralement deux antennes indépendantes, via l'émetteur de la première antenne et le récepteur de la deuxième. Il est possible d'utiliser une seule antenne en dissociant l'émission de la réception pour pouvoir travailler à plusieurs écartements entre les éléments antennaires (Figure 1).

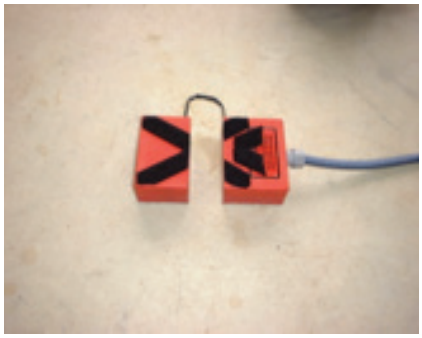


Figure 1. Antenne radar adaptée pour dissocier l'émission de la réception. Seul un câble coaxial relie les deux éléments antennaire pour permettre la transmission des impulsions à émettre. L'ensemble est relié à l'électronique hyperfréquence et au central d'acquisition par l'intermédiaire du câble gris sur la droite de l'image (Ifsttar).

Utilisation d'un logiciel de visualisation et traitement des données radar pour pointer les temps d'arrivée (premier maximum) de l'onde directe pour toutes les mesures (dans l'air comme dans le matériau).

Le calcul des temps de propagation entre antennes émettrices et réceptrices est alors possible, connaissant l'écartement (offset) et les temps d'arrivée. Il est fait l'hypothèse que l'instant d'émission de l'onde t0 est stable entre les mesures dans l'air et celles sur le matériau.

Ce calcul est réalisé à partir de chaque écartement, où t0 est recalculé pour minimiser une éventuelle dérive des mesures. Pour chacune des mailles, une moyenne par écartement est utilisée pour estimer la vitesse de propagation VOD. Sa valeur est la pente de la droite de régression des temps d'arrivée en fonction de l'écartement des antennes (soit VOD = 10,27 cm/ns pour la figure 2).

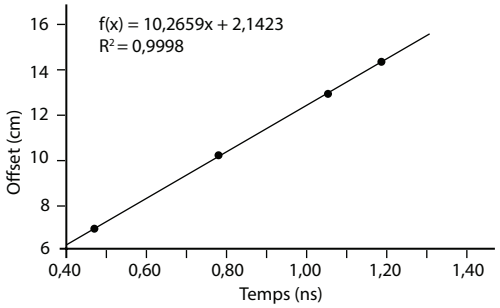


Figure 2. Exemple de calcul de vitesse de l'onde directe radar à partir des mesures de temps d'arrivée pour quatre écartements sur une structure en béton.

MODALITÉS D'APPLICATIONS

DOMAINE D'APPLICATION	Toute structure en béton, béton armé ou béton précontraint
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Il est conseillé de consulter les archives, principalement par l'examen des plans, pour rassembler le maximum d'information sur le ferraillage et la position d'éléments de structure ou cavités d'origine constructive. L'objectif est de vérifier que les zones d'intérêt, pour l'estimation de la teneur en eau, disposent de zones peu denses en hétérogénéités (armatures passives/actives, vides, etc.). La zone de mesure correspond à la surface dans laquelle le béton est considéré comme homogène. Elle est définie par une maille à condition qu'il soit possible de faire plusieurs mesures en des points différents de chaque maille, celle-ci ayant été repérée au préalable sur la structure et sur le plan. Dans chaque maille, pour chaque écartement entre antennes, cinq mesures a minima sont réalisées autour du centre de celle-ci (point de mesure) en déplaçant légèrement l'ensemble des antennes, suivies de deux mesures dans l'air. La moyenne des mesures est affectée au centre de la maille. L'écart-type de ces mesures évalué au centre de la maille est définie sur la totalité des mesures par la relation suivante : $$\sqrt{\frac{\Sigma(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$ La variabilité du matériau est la moyenne des variances (moyenne des carrés des écarts-types) sur toutes les mailles traitées

SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Les réglages initiaux et recommandés du radar sont les suivants : – Acquisition : en mode point. – Échantillonnage des signaux : 1024 points en 16 bits. – Temps d'écoute : 5-6 ns. – Filtres fréquentiels : suivre le manuel d'utilisation du matériel (optionnel), – Exemple pour une antenne centrée sur 1,5 GHz : – FIR-PB = 0 MHz, FIR-PH = 80 MHz, – IIR-PB = 3000 MHz, IIR-PH = 300 MHz. – Pas de gain. – Sommation (stacking): 32. Deux modes d'acquisition sont possibles : – Acquisition maille par maille, sur toute la zone, en fixant l'écartement (entre émetteur et récepteur), du plus petit au plus grand. Acquisition de 5 signaux dans l'air par écartement au préalable des acquisitions sur zone, chaque changement de maille étant séparé par 2 acquisitions dans l'air (pour faciliter le traitement ultérieur des données). – Acquisition écartement par écartement sur une même maille, avant de passer à la suivante. Acquisition de 5 signaux dans l'air par écartement au préalable des acquisitions sur maille.
LIMITES D'UTILISATION	La taille des antennes fait que la zone investiguée dépasse 15 cm, et donc, cette méthodologie n'est applicable qu'au centre de mailles d'armatures de dimensions nettement supérieures. Les mesures peuvent être réalisées sur les surfaces en béton sous les conditions suivantes : – la densité de ferraillage doit être telle que l'espacement des armatures soit supérieur à 20 cm. – l'épaisseur de la structure étudiée doit être supérieure à 15 cm en mode bistatique (antennes indépendantes), et à 12 cm avec une seule antenne. Un béton trop conducteur (saturé, poreux, chloruré, etc.) peut trop atténuer les signaux radar, les rendant inexploitables, principalement pour des configurations bistatiques. Elle est quasi impossible d'utilisation sur des pièces minces fortement ferraillées.
PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	~1 % d'incertitude sur la mesure de vitesse des onde radar
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Chargé d'investigations
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES	
ACCÈS À 1 OU 2 FACES	1 face
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Non
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	Acquisition : ~ 20 mailles par heure (une fois localisées) Traitement des données : 2 jours par jour de chantier
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	Interprétation différée
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Non
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Non, les antennes devant être blindées et au contact du béton
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Non
ENCOMBREMENT – POIDS	Faible encombrement

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS	
AVANTAGES	Technique non destructive permettant de localiser les zones plus ou moins humides dans les 5-10 premiers centimètres. Une étape de calibration permet de remonter à une estimation de teneur en eau à partir des mesures. Matériel qui permet également de détecter des défauts (armatures, vides, etc.) utiles à l'application de la méthode pour la mesure de la teneur en eau.
INCONVÉNIENTS	Les sources d'erreur potentielles sont listées ci-dessous : – mauvais contact des antennes (non planéité du matériau), – cale entre antennes non plaquée contre le matériau, – ensemble des antennes (émetteur-cale-récepteur) trop proche d'une armature, – dérive du signal (au niveau de l'instant d'émission, en cas de préchauffage insuffisant), – étape de calibration nécessaire pour relier la vitesse des ondes radar (ou la permittivité relative) à une teneur en eau. L'hygrométrie et la température ambiantes sont à mesurer lors de la campagne expérimentale.
DISPONIBILITÉ – COÛT	
DISPONIBILITÉ	Rare
COÛT	Moyen
RÉFÉRENCES	
NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	Dérobert X., Balayssac J.P., Sbartaï M.Z., Dumoulin J. (2017), « Méthodes électromagnétiques, dans : Contrôle non destructif pour l'évaluation des ouvrages de génie civil», ISTE ed.; Londre, GB Dérobert X., Villain G. (2017), «EM characterization of concretes, focused on water and chloride contents and carbonation, using multi-linear experimental designs in the radar frequency-band», NDT&E Int., Vol. 92, pp. 187-198, 10.1016/j.ndteint.2017.09.001