

# ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE LA PROPAGATION DE L'ONDE DE SURFACE DANS UN MILIEU POREUX SEC ET SATURÉ

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROPAGATION OF THE SURFACE WAVE IN DRY AND SATURATED POROUS MEDIUM

Fethi Soltani<sup>1</sup>, Zoubeir Lafhaj<sup>1</sup>, Marc Goueygou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LML UMR CNRS 8107, Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France.

[fethi.soltani@ec-lille.fr](mailto:fethi.soltani@ec-lille.fr), [Zoubeir.lafhaj@ec-lille.fr](mailto:Zoubeir.lafhaj@ec-lille.fr)

<sup>2</sup>IEMN DOAE UMR CNRS 8520, Ecole Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, France.

[Marc.goueygou@ec-lille.fr](mailto:Marc.goueygou@ec-lille.fr)

### Résumé

L'objectif de cet article est d'étudier la relation entre la porosité et la vitesse de l'onde de surface dans un matériau à matrice cimentaire. L'étude consiste à mesurer la vitesse de l'onde de surface à l'aide d'un scanner ultrasonore sur des dalles du mortier sec et saturé. Le modèle théorique proposé prédit un comportement linéaire entre la vitesse et la porosité. Les résultats expérimentaux confirment les prévisions théoriques et montrent une corrélation entre la vitesse ultrasonore de l'onde de surface et la porosité. Bien que cette corrélation soit réduite par l'influence de plusieurs facteurs extérieurs, les résultats présentés mettent en évidence la sensibilité de l'onde de surface à la variation de la porosité. Cette sensibilité laisse envisager la possibilité de quantifier les propriétés du transfert dans les matériaux à matrice cimentaire, notamment la porosité, à partir d'une mesure non destructive.

### Abstract

*The objective of this article is to study the relationship between porosity and surface wave velocity in a cement-based material. This study consists in measuring the velocity of surface waves in mortar samples, either dry or fully saturated with water. The theoretical model, proposed for longitudinal and shear waves, predicts a linear behavior between velocity and porosity. The experimental results obtained confirm the validity of the model. Moreover, experimental results show a linear correlation between the surface wave velocity and porosity. The presented results highlight a significant sensitivity. The latter may be useful for quantifying some key parameters considered as indicators of durability –mainly transport properties – of cement-based materials using a non-destructive ultrasonic measurements.*

**Mots clés** : Onde de Rayleigh, vitesse, durabilité, porosité, mortier, NDT, ultrasonore.

### I-INTRODUCTION

La durée de vie des ouvrages en béton est liée souvent à la capacité du béton à empêcher la pénétration d'agents agressifs (sulfates, chlorures ou gaz carbonique...) dans sa structure poreuse. L'aptitude de la peau du béton à résister à ces attaques chimiques externes est conditionnée par ses propriétés de transfert (porosité, perméabilité et diffusivité). Ces propriétés physiques sont liées aux caractéristiques du milieu poreux (forme des pores, répartition des tailles des pores et tortuosité) [1]. Ces différents paramètres peuvent être qualifiés d'indicateurs de durabilité, sous réserve toutefois que l'on dispose de méthodes adéquates pour les déterminer [2]. Plusieurs méthodes de mesure in situ de ces grandeurs physiques ont été développées. On peut citer à titre d'exemple la méthode de Figg qui permet de mesurer la perméabilité de surface dans le béton [3], le BTCRIS (LCPC) qui

permet de déterminer l'amplitude des échanges hydriques et gazeux entre le béton et le milieu ambiant pour estimer la vitesse d'altération des propriétés de la peau du béton [4]. Ces méthodes présentent des avantages (reproductibilité des mesures, mesures in situ...) mais restent cependant limitées en termes de précision, et présentent un aspect semi-destructif. Il est donc nécessaire de développer des nouvelles méthodes d'investigation capable de quantifier d'une façon plus précise les propriétés du béton, notamment les propriétés du transfert.

Par ailleurs, les méthodes ultrasonores sont utilisées depuis les années 1940 pour évaluer le béton. Le principe de ces méthodes est d'estimer d'une façon quantitative les propriétés des matériaux par des mesures de la vitesse et de l'atténuation de l'onde ultrasonore dans une gamme de fréquence donnée. Ces techniques sont largement utilisées pour quantifier les propriétés élastiques des matériaux [5], ainsi que pour la détection des cavités et des fissures [6]. Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour étudier la relation entre les propriétés du béton et les propriétés ultrasonores des ondes acoustiques (L et T) [7] [8]. Ces études ont mis en évidence la sensibilité des paramètres de propagation à la structure poreuse du béton.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la peau du béton par des mesures des vitesses ultrasonores des ondes de surface (Onde de Rayleigh). Dans un premier temps, l'étude consiste à proposer une relation entre la vitesse de l'onde de surface déterminée à partir des ondes de volume (L et T) et la porosité des matériaux à matrice cimentaire. Dans un second temps, des mesures de la vitesse de l'onde du Rayleigh sont réalisées sur des dalles de mortier en utilisant un scanner ultrasonore conçu spécifiquement pour cette application [9]. Afin d'étudier l'influence de la teneur en eau, ces dalles sont conditionnées a deux états hygrométriques, sec et saturé. Enfin des corrélations entre vitesse et porosité sont établies pour identifier les paramètres des modèles qui relie la vitesse de l'onde de surface à la porosité.

## II-RELATION ENTRE LA VITESSE ULTRASONORE DE L'ONDE DE SURFACE ET LA POROSITE

Dans un milieu homogène élastique et isotrope et pour des faibles valeurs de porosité la relation entre la vitesse de l'onde de cisaillement et la porosité peut être approchée par la forme linéaire suivante [8] :

$$V_T \cong (1 - bP)V_{T_0} \quad (1)$$

Où  $P$  est la porosité du matériau,  $V_{T_0}$  est la vitesse de l'onde du cisaillement du matériau à porosité nulle et  $b$  est un paramètre empirique.

Selon Shkolnik, [10] ce paramètre empirique ' $b$ ' est constant et dépend du coefficient de Poisson du matériau à porosité nulle ( $\nu_0$ ) :

$$b_{Shko} = 15 \frac{1 - \nu_0}{7 - 5\nu_0} \quad (2)$$

Si on suppose que le coefficient de Poisson varie en fonction de la porosité, l'équation (1) devient sous la forme suivante :

$$V_T \cong (1 - b_T P)V_{T_0} \quad (3)$$

Avec  $b_T$  est un paramètre empirique.

La vitesse  $V_R$  de l'onde de Rayleigh est donnée en fonction de  $V_T$  et  $V_L$  par l'équation suivante [11] [12]:

$$16 \left( 1 - \frac{V_R^2}{V_L^2} \right) \left( 1 - \frac{V_R^2}{V_T^2} \right) - \left( 2 - \frac{V_R^2}{V_T^2} \right)^4 = 0 \quad (4)$$

Bergman [13] propose une solution approchée de l'équation (4). Cette approche définit une approximation de la vitesse de propagation de l'onde du Rayleigh en fonction de la vitesse transversale et du coefficient de Poisson du matériau [12].

$$V_R \cong f(\nu) V_T \quad (5)$$

$$\text{Avec} \quad f(\nu) = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (6)$$

En substituant l'équation (1) dans l'équation (5), l'équation (5) peut être approchée par la forme linéaire suivante :

$$V_R \cong (1 - b_R P) V_{R_0} \quad (7)$$

$V_{R_0}$  est la vitesse de l'onde de Rayleigh du matériau à porosité nulle et  $b_R$  est un paramètre empirique.

### III-ETUDE EXPERIMENTALE

#### III-1 Matériaux étudiés :

Le matériau étudié est un mortier issu d'un mélange du ciment CPA-CEM II 52.5 avec du sable normalisé dont le diamètre maximal des grains est  $D_{\max}=2$  mm. Les échantillons du mortier ont été fabriqués avec différents rapport E /C (variant entre 0.3 et 0.6) afin d'obtenir différentes valeurs de porosité. La composition des échantillons est donnée dans le tableau 1.

Les mesures ultrasonores des ondes de surface ont été réalisées sur des dalles de mortier de dimension  $50 \times 15 \times 5$  cm<sup>3</sup>. Ces dimensions ont été retenues pour offrir une surface d'étude suffisante pour évaluer la variabilité des mesures, ainsi que pour éviter les effets de bord.

E/C	Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Sable (Kg/m <sup>3</sup> )	Eau (Kg/m <sup>3</sup> )
0.30	450	1350	135.00
0.35	450	1350	157.50
0.40	450	1350	180.00
0.45	450	1350	202.50
0.50	450	1350	225.00
0.55	450	1350	247.50
0.60	450	1350	270.00

Tableau.1. Composition du mortier

#### III-2 Mesures expérimentales destructives et non destructives:

##### III-2.1 Mesure de la vitesse ultrasonore de l'onde de surface :

La vitesse de l'onde de surface (onde de Rayleigh) est mesurée en utilisant un émetteur et un récepteur sans contact (Figure.1), afin d'assurer un couplage reproductible. L'émetteur est fixe, le récepteur est placé sur un rail automatisé et se déplace à pas constant (0.5 cm) suivant l'axe de l'émetteur. Le signal émis est un sinus modulé de fréquence 150 à 350 kHz ; le signal reçu présente une fréquence dominante autour de 200kHz. La vitesse est estimée à partir d'une dizaine de signaux reçus (Figure 3).



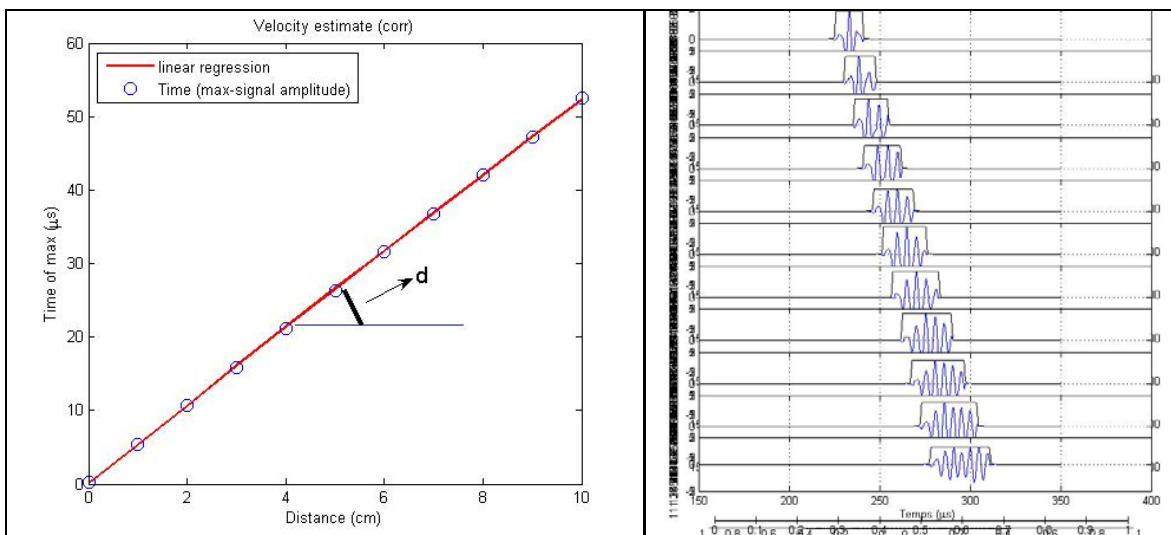
**Figure.1.** Dispositif pour la mesure des paramètres de l'onde de surface (Safinowski et al 2007)

La principale raison pour utiliser des fréquences ultrasonores élevées est d'accroître la sensibilité des paramètres acoustiques aux inclusions (grains du sable, vides) du milieu de propagation (mortier).

La vitesse des ondes de surface est estimée à partir de la pente de la courbe linéaire présentée sur la figure 2 qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et le récepteur) :

$$V_R = \frac{1}{d} \quad (8)$$

Où  $d$  est la pente de la droite qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et la récepteur).



**Figure.2.** Estimation de la vitesse des ondes de surface **Figure.3.** Signaux enregistrés sur un profil

### III-2-2 Mesure de la porosité :

Pour la mesure de la porosité accessible à l'eau, la méthode consiste à saturer en eau et sous vide un échantillon du mortier. Une fois que tous les pores interconnectés sont remplis d'eau, l'échantillon est pesé au centième de gramme et son volume est déterminé par pesée hydrostatique. Ensuite, l'échantillon est placé dans une étuve à une température de  $60 \pm 2$  C. Le séchage est arrêté à la stabilisation de la masse, ceci est obtenu lorsque la variation entre deux pesées successives ne dépasse pas 0.05%.

La porosité  $P$  est déterminée en utilisant la formule suivante :

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{\rho_{eau} V} \quad (9)$$

Avec  $M_{sat}$  est la masse saturée du mortier,  $M_{sec}$  est la masse sèche du mortier,  $V$  est le volume de l'échantillon du mortier et  $\rho_{eau}$  est la masse volumique de l'eau.

Les mesures de la porosité sont réalisées sur des échantillons cylindriques de diamètre 37mm et de hauteur 50mm. Pour chaque composition, trois carottes ont été prélevées. La valeur de la porosité retenue est la moyenne sur les trois prélèvements.

La figure 4 illustre la variation de la porosité en fonction du rapport E/C. Les résultats montrent une variation quasiment linéaire entre la porosité et le rapport E/C. Lorsque le rapport E/C s'accroît de 0.3 à 0.6, la porosité augmente de 7% à 16%.

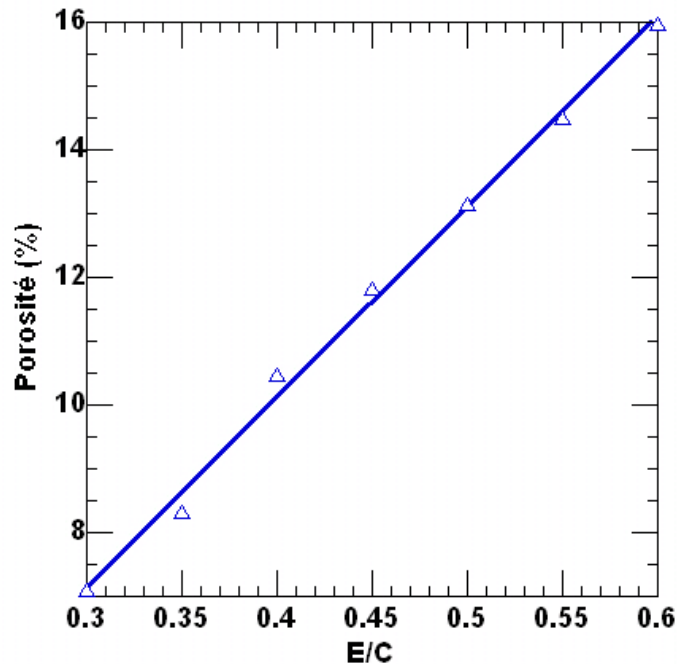


Figure.4. Relation entre la porosité accessible à l'eau d'un mortier et le rapport E/C

#### IV-RESULTATS ET DISCUSSIONS

La figure 5 présente la variation de la vitesse de propagation de l'onde de surface en fonction de la porosité dans un mortier sec et saturé. Les résultats montrent une diminution de la vitesse de surface quand la porosité augmente et ceci est valable pour le deux états hygrométrique sec et saturé.

On peut noter que la vitesse de propagation de l'onde du Rayleigh augmente avec la teneur en eau. Cet accroissement est dû à la présence de l'eau dans les pores entraînant une rigidité plus importante. Ces résultats sont en cohérence avec ceux obtenues par Lafhaj et al.2006 et Yamen et al.2002 [8] [7] pour les ondes du volume (L et T).

A titre d'exemple pour une porosité fixe de 15.98%, la vitesse de l'onde de Rayleigh augmente de 1915.2m/s à 2125.1m/s quand l'état hydrique du mortier passe du sec au saturé.

Sur la même figure, nous avons reporté les résultats de la vitesse de l'onde de surface déterminés à partir des vitesses des ondes du volume (L et T) mesurées. Nous désignons par vitesse de surface théorique, la vitesse calculée à partir des vitesses des ondes longitudinales et transversales et par vitesse de surface expérimentale la vitesse mesurée en utilisant un scanner ultrasonore dédié spécifiquement à cette application. La variation entre

la vitesse expérimentale et la porosité est approximativement linéaire, ce résultat est en bonne concordance avec l'interprétation théorique de l'équation 7.

On observe que l'écart entre la vitesse des ondes de surface théorique et expérimentale augmente avec l'accroissement de la porosité. A titre d'exemple quand la porosité s'accroît de 13.14% à 14.49% la variation entre la vitesse de surface théorique et expérimentale augmente de 5.4% à 6.9%.

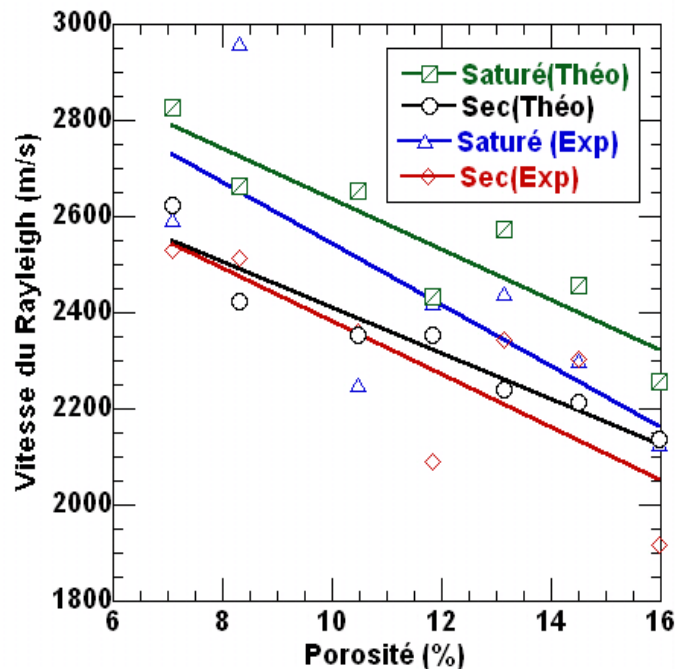


Figure.5. Variation de la vitesse des ondes de surface en fonction de la porosité dans un mortier

Le tableau 2 compare les paramètres ( $b_R$  et  $V_{R0}$ ) déduits à partir d'une régression linéaire des résultats expérimentaux et théoriques, ainsi que la pente ( $b_{shko}$ ) déterminée à partir de l'équation 2.

On observe une différence entre la pente de la droite théorique ( $b_R=1.66$  (saturé),  $b_R=1.65$  (sec)) et la pente de la droite expérimentale ( $b_R=2$  (saturé),  $b_R=1.88$  (sec)). Selon Shkolnik, cette pente ( $b_R$ ) est indépendante de la porosité ; elle est de l'ordre de 2.04 pour l'état saturé et de 2 pour l'état sec.

	V <sub>R</sub> (Théorique)			V <sub>R</sub> (Expérimentale)			b <sub>shko</sub>
	b <sub>R</sub>	V <sub>R0</sub>	R <sup>2</sup>	b <sub>R</sub>	V <sub>R0</sub>	R <sup>2</sup>	
Saturé	1.66	3164	0.81	2.00	3180	0.56	2.04
Sec	1.65	2888	0.90	1.88	2937	0.64	2.00

Tableau.2. Paramètres des modèles théorique et expérimentale

Les valeurs des coefficients de corrélation obtenus sont assez faibles. Cette dispersion est liée à la présence d'une microfissuration superficielle due principalement au conditionnement des dalles (séchage et saturation) [14]. Cette microfissuration superficielle est en effet susceptible de modifier les propriétés du transfert (porosité, perméabilité...) du matériau [2]. En outre, la géométrie de la surface libre des dalles n'est pas parfaitement plane. Ces facteurs difficilement maîtrisables viennent réduire la précision avec laquelle les paramètres du modèle sont estimés.

## CONCLUSION

Dans un premier temps, ce travail a été mené pour étudier la relation entre la porosité, la teneur en eau et la vitesse de propagation de l'onde de surface (onde de Rayleigh) dans un matériau à matrice cimentaire.

La vitesse de l'onde de surface a été mesurée en utilisant un scanner ultrasonore dédié spécifiquement à cette étude à une fréquence de 200 KHz. La porosité a été obtenue en utilisant la méthode de saturation sous vide. Deux états hygrométriques sont retenus à savoir l'état sec et l'état saturé

La variation observée de la vitesse des ondes de surface est comme suit :

-Une diminution de la vitesse de l'onde du surface quand la porosité augmente.

-Une augmentation de la vitesse de l'onde de surface quand la teneur en eau s'accroît.

Dans un deuxième temps, les corrélations entre la vitesse de l'onde de surface et la porosité sont étudiées. La relation déduite des modèles empiriques proposées par (Martin et al. 1996), qui relie les propriétés intrinsèques (module d'élasticité et coefficient de Poisson) du matériau et la porosité laisse prévoir une loi linéaire entre la vitesse de l'onde de surface et la porosité

Enfin une comparaison entre les vitesses théorique et expérimentale de l'onde de surface a été étudiée. Les résultats montrent une différence entre la pente de la droite expérimentale et la pente de la droite théorique.

Bien que la corrélation entre la vitesse de Rayleigh et la porosité soit réduite par l'influence de facteurs autres que la porosité, les résultats présentés ont montré une grande sensibilité entre la porosité, la teneur en eau et la vitesse de l'onde de Rayleigh. Cette sensibilité laisse envisager la possibilité de quantifier les propriétés du transfert des matériaux à matrice cimentaire, notamment la porosité à partir d'une mesure non destructive.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Buil M., Ollivier J.P., Conception des bétons: la structure poreuse. La durabilité des bétons, collection de l'association technique de l'industrie des liants hydrauliques. Sous la direction de J. Baron et J-P. Ollivier, 1992
- [2] Baroghel-Bouny V., Ammouche A., Hornain H., Analyse de la microstructure et propriétés de transfert, Revue Française de Génie Civil, n° 2-3, 2001, pp.149-177.
- [3] Figg J.W., Methods for measuring the air and water permeability of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol 25(85), 1973, pp.213-219.
- [4] Lafhaj Z., Richard G., Kaczmarek M., Skoczylas F., Experimental determination of intrinsic permeability of limestone and concrete: Comparison between in situ and laboratory results, Building and Environment, Vol 42, 2007, pp.3042-3050.
- [5] Martin L.P., Dadon D. and Rosen M., Evaluation of Ultrasonically Determined Elasticity-Porosity Relations in Oxide Zinc. The American Ceramic Society, Vol 79(5), 1996, pp.1281-1289.
- [6] Aggelis D.G., Shiotani T., Repair evaluation of concrete cracks using surface and through transmission wave measurements, Cement and Concrete Composites, Vol 29, 2007, pp.700-711.
- [7] Lafhaj Z., Goueygou M., Djerbi A. and 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, 2006, pp.625-633.
- [8] Yaman I.O., Aktan H.M., Hearn N., Active and non-active porosity in concrete: Part II. Evaluation of existing models. RILEM Newspaper of Materials and Structures. Vol 35 (246), 2002, pp.110-116.
- [9] Safinowski P., Piwakowski B., Balayssac J.P., Goueygou M. and Kosecki A., Non destructive testing of the concrete by ultrasounds using an automated device, Diagnobéton 2007, May 10-11, 2007, Aix-en-Provence.
- [10] Shkolnik I.E., Udegbumam O.C. and Aktan H.M., Ultrasonic methods of evaluating concrete permeability, Proc. of the Conference on NDT in Civil Engineering, British Institute of NDT, University of Liverpool, 1997, pp.111-120.
- [11] Rayleigh L., On waves propagating along the plane surface of an elastic solid, Proc. Roy.Soc. London. A 7, 1885, pp.4-11.
- [12] Royer D., Clorennec D., An improved approximation for the Rayleigh wave equation. Ultrasonics, Vol 46, 2007, pp.23-24.

**[13]** Bergmann L., Ultrasonics and their scientific and technical applications, John Wiley Sons. New York, 1948.

**[14]** Khelidj A., Bastien G., Baroghel-Bouny V. and Godin J., Séchage d'une dalle en béton : Etude expérimentale des gradients induits. Revue Française de Génie Civil, n°2-3, 2001, pp.285-305.