

# Détection et suivi d'un front de saturation à l'aide d'un scanner automatique ultrasonore à ondes de surface

Charles Ciccarone<sup>1,2</sup>, Bogdan Piwakowski<sup>2</sup>, Frederic Skoczylas<sup>1</sup>, Radosław Drelich<sup>3</sup>, Jean-Marie Henaut<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LAMCube, F-59651 Lille, France

<sup>2</sup>Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 8520 – IEMN, TPIA F-59651 Lille, France

<sup>3</sup> Faculty of Mechatronics, Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland

<sup>4</sup>EDF-R&D-STEP, 6 Quai Watier, BP 49, 78401 Chatou, France

**ABSTRACT** L'objectif de la recherche présentée dans cet article concerne la détection et le suivi d'un front de saturation en eau dans un matériau par méthode non destructive (CND). L'étude est menée sur deux matériaux : calcaire qui est le matériel plus simple, perméable, poreux et homogène et plus facile à interpréter pour ensuite revenir sur le cas plus complexe du béton de structure, fissuré, hétérogène par constitution. La technique CND adoptée pour cette recherche est basée sur l'utilisation des ondes ultrasonores de surface. Elle a été mise en œuvre à l'aide d'un scanner qui permet d'ausculter le béton automatiquement et sans contact avec la surface auscultée. Les mesures acoustiques sont analysées pour caractériser la dispersion des ondes de surface, puis après inversion pour déterminer la profondeur du front de saturation. Les résultats obtenus sur le calcaire sont très prometteurs et sont cohérents les analyses destructives obtenus sur des carottes tranchées ce qui valide la technique adoptée. Par contre, pour le béton, les courbes de dispersion sont affectées par l'hétérogénéité du matériau (granulats, microfissurations) ce qui a pour effet de masquer l'effet de la saturation en eau.

**Keywords** Contrôle Non Destructif, saturation, béton, onde de surface, inversion, mesure automatisée

## I. INTRODUCTION

Le présent article porte sur des travaux effectués dans le cadre d'une thèse [Ciccarone, 2020]. Un des objectifs de cette recherche est la caractérisation et le suivi d'un front de saturation sur une structure en béton, à l'aide d'une méthode non destructive.

La détection du phénomène recherché a été conduite en utilisant une méthode non destructive grâce à un scanner ultrasonore automatique sans contact, fonctionnant avec des ondes de surfaces [Piwakowski & Safinowski, 2009, Abraham et al, 2012]. Les mesures sont analysées pour caractériser la dispersion des ondes de surface c'est-à-dire définir la vitesse de phase en fonction de la fréquence  $V_{ph}(f)$  qui est a priori sensible à la sa saturation  $S_r$  du matériel examiné. Afin de déterminer  $S_r$  en fonction profondeur,  $V_{ph}(f)$  est ensuite est inversée [Drelich et al.2018]. Le béton est un matériau particulière, hétérogène, dans lequel les granulats, la microfissuration de surface affectent, a priori, la dispersion des ondes, ce qui peut masquer l'influence de la saturation. Ainsi

il semblait utile de commencer l'étude sur un matériau modèle, plus simple, pour ensuite traiter le cas plus complexe du béton. Le choix s'est porté sur le calcaire, quasi homogène, dans lequel les hétérogénéités sont d'un ordre de grandeur plus faible que dans le béton.

## II. SUIVI D'UN FRONT DE PERTURBATION HYDRIQUE DANS UN MATERIAU HOMOGENE : CAS DU CALCAIRE DE BOURGOGNE

### A. Démarche expérimentale

L'approche utilisée est illustrée sur la Figure 1. L'expérimentation était programmée avec deux blocs de calcaire de Bourgogne de 0.5 m de côté. Un bloc a été consacré aux mesures CND avec le scanner (Fig.1.a). Le deuxième bloc a été analysé par mesures destructives. Afin d'étudier la saturation en fonction de la profondeur, 6 phases d'imbibition (de 0 à 5) par ajout successif, sur la surface de bloc N°1, de couches d'eau d'un centimètre d'épaisseur ont été effectuées. Parallèlement, un échantillon cylindrique a été prélevé sur le bloc N°2 puis ce cylindre a été coupé en tranches. Après chaque mesure de saturation, la colonne était reconstituée et était imbibé avec le même protocole que le bloc N°1.

### B. Calcaire : résultats obtenus

Les mesures de vitesses de phase  $V_{ph}(f)$  à l'état zéro et après chaque imbibition sont montrées sur la figure 1.b. L'analyse de cette figure nous montre un grand contraste entre la partie à l'état sec et la partie comprenant les états saturés. L'imbibition provoque 2 phénomènes : une chute de la vitesse de l'onde de surface, et un changement de pente de  $V_{ph}(f)$ . L'inversion de  $V_{ph}(f)$  donne le profil de vitesse transversale  $V_s$  en fonction de la profondeur (Fig.1.d). Afin d'obtenir la saturation en fonction de la profondeur, il est nécessaire de disposer d'une loi de calibration entre la vitesse transversale  $V_s$  et la saturation  $S_r$  du matériau. Cette relation (Fig.1.c) a été déterminée expérimentalement sur les tranches du bloc N°2, par technique ultrasonore classique en contact.

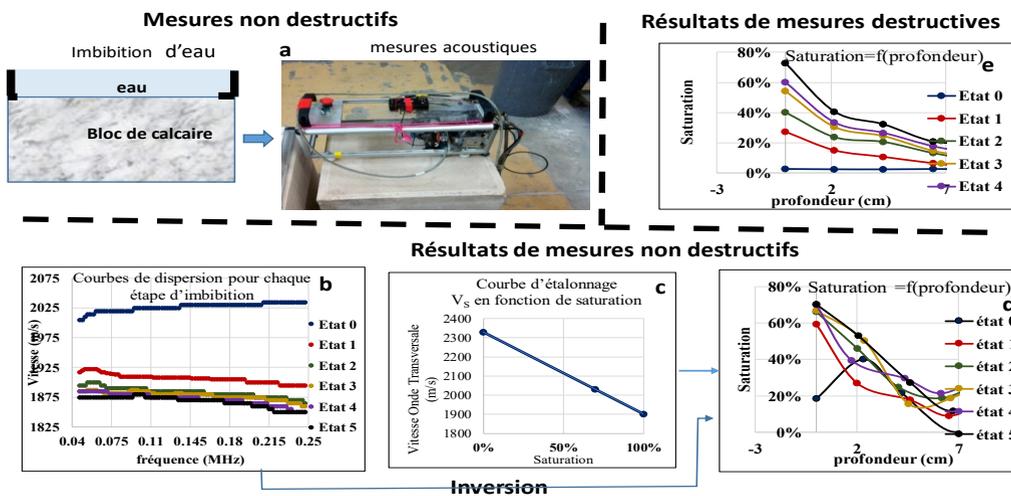


FIGURE 1. (a) Bloc N°1 consacré aux mesures CND avec le scanner ; (b) Courbes  $V_{ph}(f)$  en fonction des états d'imbibition ; (c) Loi de calibration entre la vitesse transversale  $V_s$  et la saturation  $S_r$  du calcaire ; (d) Saturation en fonction de la profondeur obtenue par l'inversion des courbes (b) ; (e) Saturation en fonction de la profondeur obtenue par la technique destructive à partir du bloc N°2.

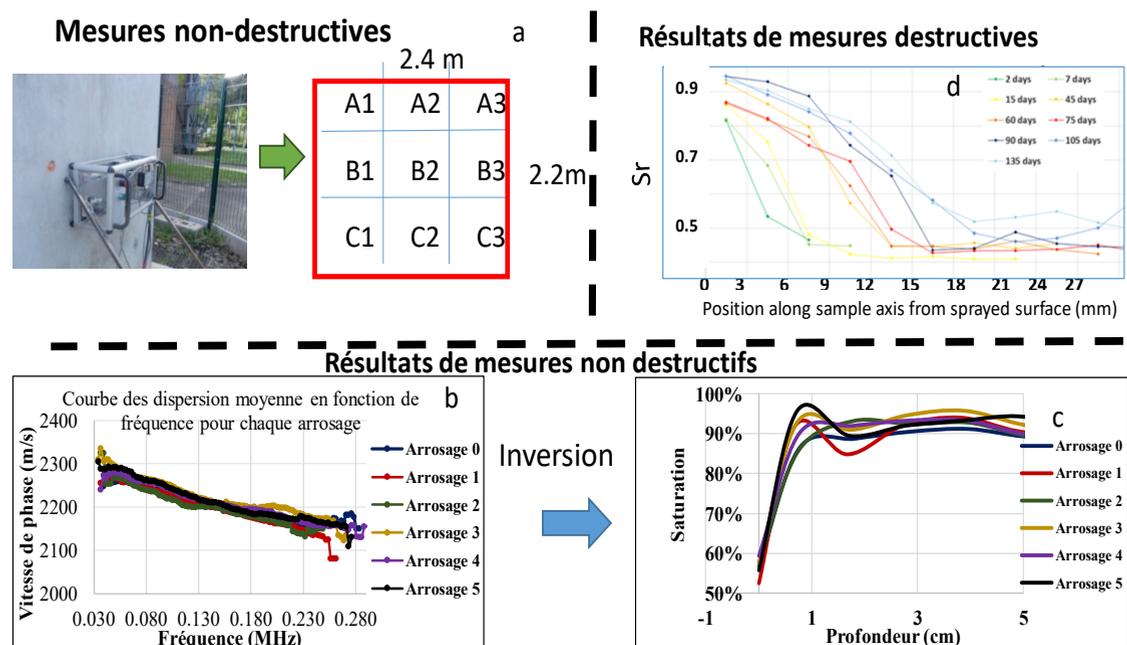
Le résultat final est montré sur la figure 1.d. Les courbes obtenues suivent une évolution logique jusqu'à 5 cm, ce qui nous informe que la saturation augmente de façon monotone (sauf pour le cas « sec »). A l'état sec, il existe une couche de profondeur 2 cm dans laquelle la saturation diminue pour ensuite augmenter en fonction de la profondeur

La saturation en fonction de la profondeur obtenue à partir des tranches du bloc N°2 est présentée sur la figure 1.e. Ces résultats s'accordent généralement avec ceux obtenus par méthode CND : la saturation diminue en fonction de profondeur et augmente en fonction de nombre d'imbibitions. Cependant il faut noter que la technique CND traduit la saturation à la surface avec moins de précision. Cette expérimentation montre que la technique CND appliquée permet d'obtenir la répartition de la saturation en fonction de la profondeur dans le calcaire.

### III. SUIVI D'UN FRONT DE PERTURBATION HYDRIQUE DANS UN MATERIAU HETEROGENE : CAS DU BETON

#### A. Démarche expérimentale

L'approche utilisée est illustrée sur la Figure 2.a. L'expérimentation a été effectuée sur un mur en béton à l'Ecole Centrale de Lille construit pour tester l'efficacité d'un arrosage périodique destiné à restaurer la perméabilité du béton saturé. Le mur a été soumis à 5 cycles d'arrosages, pendant une durée de 1 minute par heure. Les mesures de  $V_{ph}(f)$  ont été effectuées avec le même scanner après chaque arrosage, selon la même procédure que celle utilisée sur le bloc de calcaire. La zone auscultée avait une forme rectangulaire de 2,4 x 2,2 m<sup>2</sup>, et était répartie en 9 mailles (Fig.2.a). Dans chaque maille, 5 courbes  $V_{ph}(f)$  étaient mesurés.



**FIGURE 2.** Démarche expérimentale avec le mur en béton. (a) Le scanner acoustique sur le mur d'essai et le maillage du mur pour les mesures acoustiques. (b) Caractéristiques de dispersion  $V_{ph}(f)$  en fonction de nombre d'arrosages, (c) Résultat final obtenu après inversion des courbes (b) ; (d) Saturation en fonction de la profondeur obtenue par la technique destructive

Indépendamment, les mesures destructives, réalisées selon la procédure similaire à celle utilisée sur le bloc de calcaire, ont été effectuées, ce qui a donné l'information sur la progression de la saturation dans le béton, soumis à la pulvérisation d'eau (Fig2.d). On observe que la saturation diminue en fonction de profondeur et augmente en fonction de nombre d'imbibitions.

#### B. Béton : résultats obtenus

La figure 2.b donne une synthèse des 6 courbes de dispersion (moyenne pour le mur entier) pour les arrosages 0 et 5. Etant donné que l'on a disposé de mesures de vitesses de surface en fonction de teneur en eau [Abraham et al 2012] il était possible d'obtenir, par l'inversion de  $V_{ph}(f)$ , la relation recherchée c'est-à-dire la saturation  $S_r$  en fonction de la profondeur. Le résultat est montré sur la figure 4.c. La comparaison des figures 1.c et 1.d indique que les résultats sont très différents. Comme la pénétration d'onde utilisée ne dépasse pas 5 cm il est possible que l'effet de peau c'est-à-dire la fissuration de surface et indépendamment l'influence des granulats [Métais ;2016] affectent la relation  $V_{ph}(f)$  et masquent l'effet de la saturation. L'interprétation de ces résultats nécessiterait d'approfondir cette recherche.

## IV. CONCLUSIONS

Cette campagne d'essais a été effectuée sur deux matériaux : un calcaire perméable, poreux et homogène et un béton de structure, fissuré, hétérogène par constitution.

Les effets de la saturation sur le calcaire sont bien marqués et en connaissant la relation de calibration  $V_s = f(S_r)$ , la technique CND appliquée permet d'obtenir la répartition de la saturation en fonction de la profondeur.

Le problème paraît beaucoup plus complexe sur le béton. Il est possible que la présence des granulats et de fissuration de surface masquent grande partie les effets de la saturation. Afin de s'affranchir de l'influence des effets de surface, le suivi du front de saturation pourrait être possible en utilisant le scanner qui assure une pénétration des ondes plus importante, en utilisant des fréquences plus basses [Piwakowski et al.2021].

## REFERENCES

- O. Abraham, B. Piwakowski, G. Villain, O. Durand "Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterization of concrete", Construction and Building Materials, Volume 37, December 2012, pp 904-915
- Ch. Ciccarone " Utilisation d'ondes de surface à l'aide de scanners acoustiques sans contact pour le contrôle non destructif de structures en béton ». Thèse de doctorat, Univ. de Lille, (2020)
- R. Drelich, M. Kaczmarek B. Piwakowski "Accuracy of parameter identification using the dispersion of surface waves and the role of data quality for inhomogeneous concrete" NDT and E International (2018), doi: 10.1016/j.ndteint.2018.05.002
- V. METAIS, Auscultation avec les ondes de surface de matériaux très hétérogènes, Thèse de doctorat, IFSTTAR Nantes, mars 2016.
- B. Piwakowski, R. Drelich, Ch. Ciccarone, J. LI, J.M. Henault, V. Garnier "Non-destructive non-contact concrete evaluation using an automated surface wave scanner," (2021), in Proceedings of Meetings on Acoustics. <https://doi.org/10.1121/2.000133> , DOI: 10.1121/2.0001337