

Suivi, détection et caractérisation d'un front de lixiviation par techniques destructives et non destructives

Charles Ciccarone^{1,2}, Bogdan Piwakowski², Frederic Skoczylas¹, Jean-Marie Henaut³

¹Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LAMCube, F-59651 Lille, France

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

³EDF-R&D-STEP, 6 Quai Watier, BP 49, 78401 Chatou, France

ABSTRACT L'objectif du travail présenté est la détection, la caractérisation et le suivi d'un front de lixiviation sur une structure en béton. Pour cela, les conditions de lixiviations in situ ont été reproduites sur des éprouvettes en laboratoire, et 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. Des méthodes destructives de mesures matériaux ont été employées afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par méthode destructive et non destructive. Ces résultats, convergents, démontrent que la méthode acoustique proposée est capable de détecter, caractériser et suivre un front de béton lixivié sur plusieurs centimètres de profondeur.

Keywords Contrôle Non Destructif, lixiviation, béton, onde de surface

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 lixiviation sur une structure en béton, à l'aide d'une méthode non destructive. La lixiviation du béton va entraîner, par la dissolution progressive de la pâte cimentaire, une perte considérable des propriétés mécaniques et de transfert, telle que la chute du module élastique, l'augmentation de la porosité et de la perméabilité au gaz [Agostini et al, 2007].

La détection du phénomène recherché a été conduite en utilisant une méthode ultrasonore, non destructive, grâce à un scanner ultrasonore automatique sans contact, fonctionnant avec des ondes de surfaces [Piwakowski & Safinowski, 2009, Abraham et al, 2012]. Ces ondes ont la propriété de se propager le long de la surface du matériau inspecté sur une profondeur dépendant de la fréquence émise, et étant proche de la longueur d'onde. Les ondes acoustiques de surface sont sensibles à ces changements de propriété : lorsqu'un matériau perd ses propriétés mécaniques et de transfert, la vitesse des ondes diminue et l'atténuation augmente.

II. DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

L'approche utilisée est illustrée sur la figure 1. Il a été décidé de mener une attaque lixivante accélérée sur des éprouvettes de béton et d'effectuer des mesures acoustiques non destructives

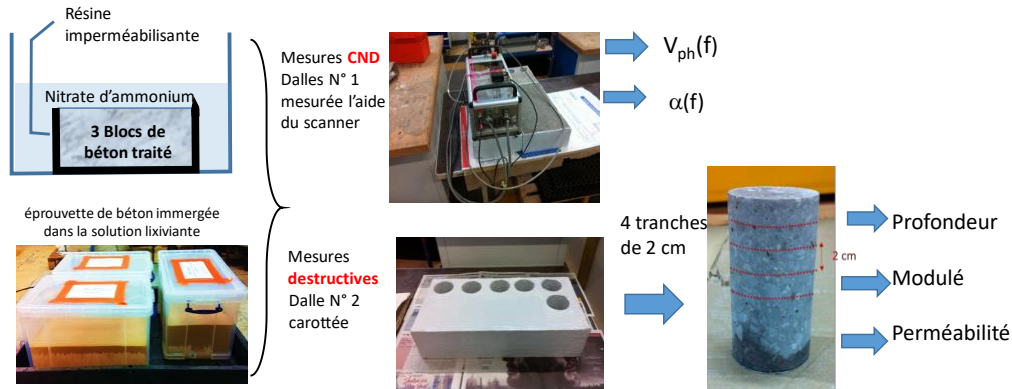


FIGURE 1. Schéma du dispositif expérimental

pour ensuite les corréler à trois mesures destructives. En prenant en compte le fait qu'in situ, seul un versant de la structure est attaqué, il a été décidé qu'une seule surface serait mise au contact de la solution lixivante. Les autres surfaces ont été imperméabilisées grâce à une résine époxy. La solution lixivante choisie est une solution de nitrate d'ammonium à 6 moles par litre de solution. Elle permet de considérablement accélérer le processus de lixiviation qui existe naturellement avec l'eau. [Agostini et al, 2006].

En considérant uniquement le temps total cumulé que les éprouvettes ont passé au contact du nitrate d'ammonium, les temps de contact correspondent respectivement à 7, 14, 19, 24, 26 et 28 jours d'exposition au NH_4NO_3 . (y compris le cas sans exposition au produit, à 0 jours).

L'expérimentation était programmée avec deux blocs de béton. Un bloc a été consacré aux mesures ultrasonores avec le scanner. Le deuxième bloc a été affecté aux mesures destructives. Un carottage était réalisé après chaque étape de lixiviation, chaque carotte a été coupée en 4 tranches de 2 cm à partir de la surface en contact avec la solution de nitrate, et chaque tranche était auscultée par trois techniques décrites dans la section suivante

III. RESULTATS

A. Résultats de mesures destructives

La profondeur du front de lixiviation, est détectée par la phénolphthaléine qui est un indicateur coloré. Ainsi un béton sain est identifié par les zones roses tandis que les zones incolores (hors granulats visibles) indiquent un béton lixivié. Les résultats obtenus sont montrés sur la Figure 2 : le front de lixiviation a avancé de 5 mm en 7 jours, puis jusqu'à 10 mm de profondeur au bout de 28 jours (Fig.2b).

La perméabilité au gaz, était mesurée à l'aide de la cellule de perméabilité développée par le laboratoire de Génie Civil de l'Ecole Centrale de Lille [Loosveldt-Claudot et al, 2002] Les résultats obtenus sur chaque tranche de chaque carotte sont présentés sur la figure 2.c. On peut donc dire que la lixiviation est caractérisée par l'augmentation de la perméabilité qui se limite à la couche de surface d'une profondeur de 2 cm environs.

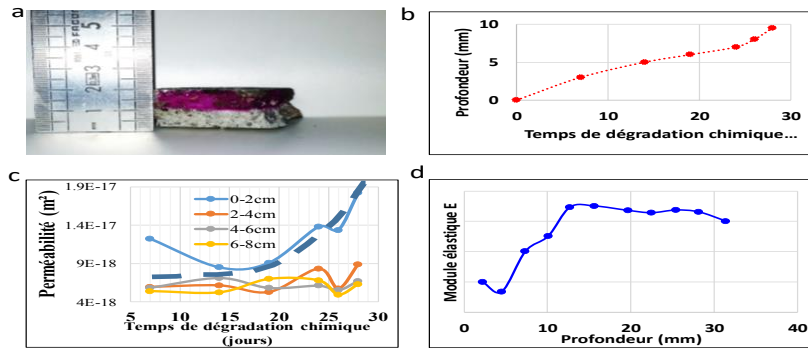


FIGURE 2 (a) Photo d'une tranche par la phénolphthaleïne, (b) La profondeur du front de lixiviation obtenue par approche (a) ; (c) Évolution de la perméabilité apparente à l'argon en fonction du temps d'exposition à la solution lixiviante, pour chaque tranche issue des carottages, pour une pression de confinement de 50 bars ; (d) Évolution du module en fonction de profondeur

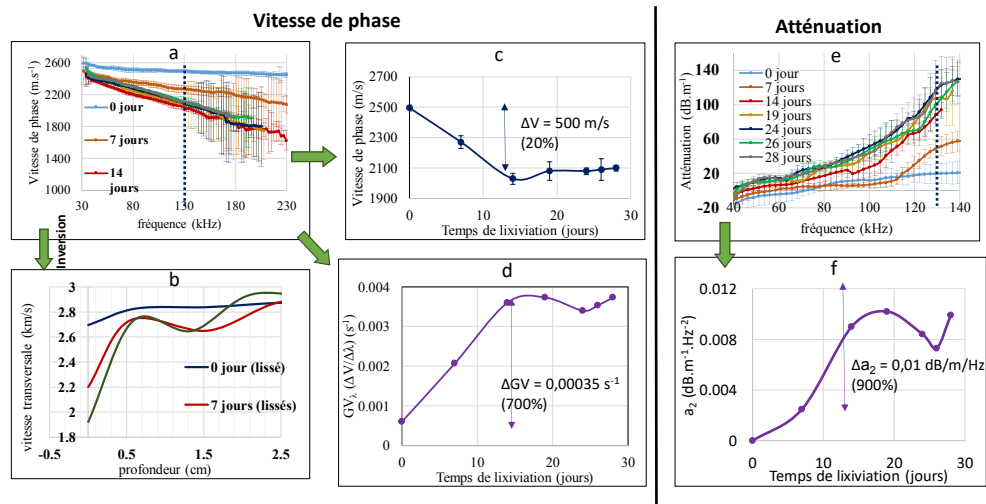


FIGURE 3. (a) Vitesses de phase $V_{ph}(f)$ en fonction de la fréquence (b) $V_{ph}(f=130\text{kHz})$; (c) Vitesse transversale en fonction de profondeur ; (d) Gradient de vitesse $\Delta V/V$; (e) Coefficient d'atténuation α en fonction de la fréquence , (f) Coefficient a_2 du développement quadratique des courbes (e)

Le module d'élasticité local en fonction de profondeur est obtenu par la technique qui repose sur l'enfoncement d'un indenteur dans l'échantillon [Ibrahim, 2008]. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 2.d et indiquent que au bout de 28 jours d'attaque chimique, le front de lixiviation est allé jusque 12 mm de profondeur environ.

B. Résultats des mesures acoustiques sur dalles lixiviées

Les mesures de dispersion de vitesse et d'atténuation de l'onde de surface ont été effectuées dans la bande [30 kHz – 200 kHz] ce qui assure une pénétration de 1 à 6 cm. Les résultats sont présentés sur les Figure 3. La dégradation chimique entraîne une diminution progressive de la vitesse et l'augmentation de l'atténuation surtout au niveau des hautes fréquences. (Figs3.a,e). La profondeur de dégradation recherchée est obtenue par l'inversion de $V_{ph}(f)$ ce qui donne une profondeur de la couche la plus dégradé de 0.5 cm et le fin de dégradation à la profondeur de 1.6 cm.(Fig.3.b). En étudiant l'évolution de la vitesse et l'atténuation pour $f=130$ kHz, on peut

conclure que les variations de la vitesse et de l'atténuation son respectivement de l'ordre de 20 % (Fig.3.c,e) et de 600 %, ce qui indique que l'atténuation est très sensible à la lixiviation. Les paramètres les plus pertinentes pour la détection qualitative de la dégradation de béton sont le coefficient a_2 du développement quadratique de la courbe $\alpha(f) = a_1f + a_2f^2$ (variation de 900%, Fig.3.f) et le gradient de vitesse (variation de 700%, Fig.3.d).

IV. CONCLUSIONS

La profondeur de lixiviation obtenu par toutes les méthodes utilisées, destructives et CND, est résumé sur la figure 4. Les résultats obtenus sont très proches : la couche est dégradée à une profondeur proche de 1 cm. La méthode par ondes de surface, méthode CND, a montré sa pertinence dans l'étude de la lixiviation des surfaces de béton. Sa capacité à détecter un front de lixiviation rend compte de son intérêt pour évaluer la durée de vie des structures affectées par la lixiviation.

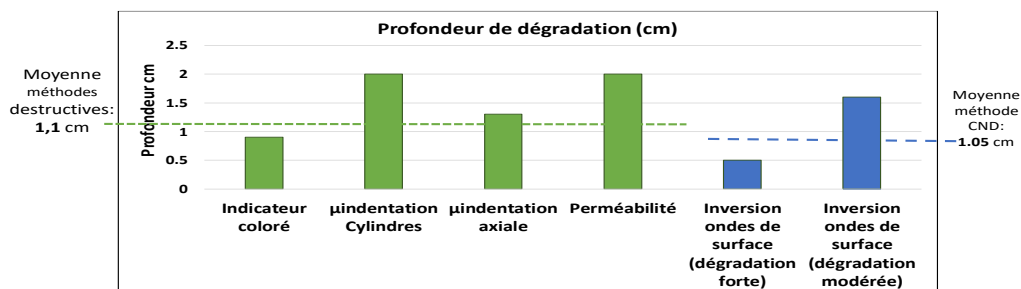


FIGURE 4. Synthèse des résultats : Les profondeurs de lixiviation obtenues pour chaque méthode

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
- F. Agostini, Z. Lafhaj, F. Skoczylas, H. Loodsveldt, "Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar", *Cement and Concrete Research* (2007), Volume 37, Issue 1, Pages 71-78,
- 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, Université de Lille, Centrale Lille, 2020
- N.Ibrahim, « Caractérisation des propriétés mécaniques des géo matériaux par technique de micro indentation », octobre 2008, Université des sciences et technologies de Lille.
- M. Kaczmarek, B. Piwakowski, R. Drelich, "Noncontact Ultrasonic Nondestructive Techniques: State of the Art and Their Use in Civil Engineering". *J. Infrastruct. Syst.* 2016; 23:B4016003. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000312.
- H. Loosveldt-Claudot, Z. Lafhaj et F. Skoczylas, "Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar", *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 9, September 2002,
- B.Piwakowski, P.Safinowski, "Non-destructive non-contact air-coupled concrete evaluation by an ultrasound automated device", 7th Intern. Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, NDTCE09, Nantes 2009 pp 603-608