

Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

ÉVALUATION DE LA PEAU DU BÉTON À L'AIDE DE LA TECHNIQUE DES ONDES ULTRASONORES DE SURFACE

EVALUATION OF CONCRETE COVER SKIN USING ULTRASONIC SURFACE WAVE TECHNIQUE

**B. PIWAKOWSKI^(a*), J.-P. BALAYSSAC^(b), G. VILLAIN^(c), V. GARNIER^(d),
M. KACZMAREK^(e), R. DRELICH^(e)**

a. Ecole Centrale de Lille (IEMN, TPIA UMR 8520 CNRS), Villeneuve d'Ascq Cedex, France,

b. Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex 4, France

c. LUNAM Université, IFSTTAR Nantes, MAST, CS4, F-44344 Bouguenais Cedex, France

d. Aix Marseille Université, LCND, LMA, Avenue Gaston Berger, 13 625 Aix en Provence Cedex 1, France

e. Institute of Mechanics and Applied Computer Science,

Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland

* bogdan.piwakowski@ec-lille.fr

RÉSUMÉ

Au stade le plus précoce, la dégradation du béton est amorcée à l'interface béton-atmosphère par des agents agressifs contenus dans l'air (CO₂, pluies acide), par l'humidité et les changements de température. Elle se traduit par une couche de quelques millimètres d'épaisseur présentant des paramètres comme la porosité et le module d'élasticité différents de ceux du béton sain en profondeur. Pour cela, l'évaluation non destructive sur site de la peau de béton semble être indispensable afin de pouvoir de surveiller l'état des ouvrages et prévenir leur dégradation. Dans ce papier, la technique Multichannel Analysis of Surface Waves, connue en géophysique, est introduite afin d'évaluer le module en fonction de la profondeur de la peau du béton. La mesure consiste à générer et recevoir des ondes ultrasonores de surface à l'aide d'une paire de transducteurs sans contact déplacés automatiquement. La caractéristique de dispersion de la vitesse de phase en fonction de la fréquence est ensuite extraite puis inversée

à l'aide du programme CLOUD, qui permet de retrouver la variation de la vitesse transversale en fonction de la profondeur.

ABSTRACT

Concrete cover degradation is induced by aggressive agents in ambience, chemicals, moisture, or temperature variations. Due to these degradations, a thin inhomogeneous surface layer usually appears. Its porosity and its elastic modulus are different from the properties of deeper sound concrete. Therefore, the on-site nondestructive evaluation of concrete cover is important to monitor the integrity of concrete structures and prevent irreversible damage.

In this paper the methodology applied is the technique, classical for geophysics, called Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). It is used as the NDT tool to characterize the depth and elastic modulus of concrete cover.

The procedure consists in generation and reception of surface waves, using the non-contact transducers which move automatically. Then the phase velocity dispersion characteristic $V(f)$ is extracted and inverted using the CLOUD inversion software in order to obtain the variation of shear wave velocity as a function of depth.

Mots-clés : Concrete, surface waves, dispersion, inversion, non-contact measurements, ultrasound, NDT

* * *

1. INTRODUCTION

Ce papier s'inscrit dans la problématique des besoins croissants de contrôle des structures et des ouvrages d'art en génie civil. La prise en compte du vieillissement des parcs ainsi que de la connaissance des risques attachés aux changements environnementaux deviennent des éléments prépondérants pour prévoir et gérer la maintenance des structures.

L'objectif principal des méthodes non destructives (ND) appliquées au béton est de fournir une évaluation correcte de la qualité du matériau dans sa structure même, quels que soient son âge et son état de dégradation. Parmi ces méthodes, le contrôle par ultrasons occupe une place importante grâce à sa commodité d'emploi et à son coût raisonnable [1].

Dans la mesure où l'on s'intéresse essentiellement à la durabilité du matériau, la zone inspectée correspond aux premiers centimètres sous la surface de la structure. Typiquement, la dégradation du béton commence à partir de la surface et pour cela la peau d'un béton ancien n'est plus homogène et peut être considérée comme ayant des paramètres mécaniques qui varient en fonction de profondeur. Afin de retrouver ces variations, la technique connue en géophysique *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)* [2], est utilisée. La mesure consiste à générer et recevoir des ondes ultrasonores de surface (OS) le long d'une ligne (profil de mesure), dans une bande fréquentielle comprise entre quelques dizaines et quelques cen-

taines de kHz, à l'aide d'une paire de transducteurs sans contact. Le scan B des impulsions OS reçues est illustré sur la figure 1.b. La mesure est effectuée automatiquement, à l'aide d'un scanner ultrasonore montré sur la figure 1.a [3]. Lorsque l'effet de peau apparaît, le béton n'est plus homogène et l'OS devient dispersive : sa vitesse $V(f)$ n'est plus constante selon la fréquence. La mesure consiste à retrouver la caractéristique de dispersion $V(f)$ puis à appliquer la procédure d'inversion [4] qui permettra de retrouver la vitesse transversale V_s en fonction de la profondeur d .

2. ANALYSE DES VITESSES DE PHASE DES ONDES DE SURFACE ET DES INVERSIONS

La vitesse ultrasonore dans le béton dépend de sa formulation (type de ciment, type et taille des granulats, rapport eau sur ciment E/C), de sa porosité, de sa teneur d'eau. La dégradation du béton est amorcée à l'interface béton-atmosphère par des agents agressifs contenus dans l'air comme le CO₂, l'humidité, les pluies acides, le sel de déverglaçage et les changements de température (gel-dégel). Ces facteurs peuvent modifier la porosité, la teneur d'eau, le module d'élasticité et l'état de carbonatation ou de microfissuration. Ces phénomènes de peau peuvent être encore renforcés par la technique de fabrication de béton, le type de coffrage ou la cure au jeune âge. Par conséquent, la vitesse de l'OS est aussi modifiée. Les résultats obtenus dans le projet SENSO [5, 1] permettent de prévoir que pour le béton typique d'un ouvrage, ayant une porosité $P > 13\%$, et une teneur d'eau $W > 10\%$ une augmentation de P provoque la diminution de la vitesse, par contre l'augmentation de W provoquent une augmentation de la vitesse [3]. Tous ces facteurs agissent ensemble et la vitesse $V(f)$ finale dans la peau résulte de leurs effets combinés. Pour simplifier la discussion, nous proposons de supposer que le béton est composé de plusieurs couches : la couche de surface dont la vitesse est V_{surf} et de la couche profonde de vitesse V_{prof} . En fonction des relations entre V_{surf} et V_{prof} : trois cas peuvent être distingués :

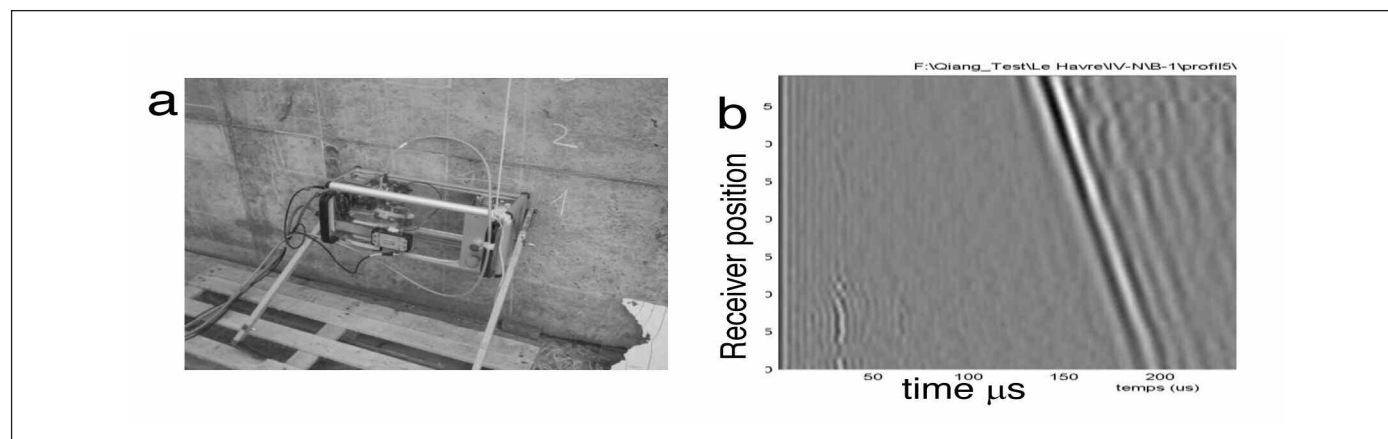


Figure 1. (a) Scanner ultrasonore sans contact utilisé sur un mur en béton - (b) Scan B des impulsions OS reçues le long d'un profil de mesure

- Cas 1 : la porosité augmente en surface, par conséquent, la vitesse de l'OS à la surface est plus faible que celle du béton sain, en profondeur : $V_{surf} < V_{prof}$. Cela peut être dû à la microfissuration.
- Cas 2 : la porosité diminue et la teneur d'eau est plus importante et par conséquent la vitesse de l'OS à la surface est plus grande que celle du béton sain en profondeur : $V_{surf} > V_{prof}$.
- Cas 3 : le béton est parfaitement homogène, par conséquent, la vitesse de l'OS est quasi constante $V(f) \approx V_{surf} \approx V_{prof} \approx \text{constante}$.

Ces trois cas donnent respectivement la forme de la courbe de dispersion $V(f)$, comme illustrée sur la figure 1. Afin de quantifier de manière simple et rapide les caractéristiques de la peau du béton ausculté, nous introduisons un paramètre nommé *gradient de vitesse* GV , défini comme la pente moyenne dans l'intervalle $\lambda_s < \lambda < \lambda_p$, de la vitesse de phase en fonction de la longueur d'onde λ $V(\lambda = V/f)$ par :

$$GV = \frac{V_p - V_s}{\lambda_p (V_p) - \lambda_s (V_s)} \quad (1)$$

Les limites $\lambda_s = V(f_{max})/f_{max}$ et $\lambda_p = V(f_{min})/f_{min}$ sont définies de telle manière que GV soit évalué dans une bande fréquentielle $[f_{min}, f_{max}]$ dans laquelle le rapport signal sur bruit de l'OS est suffisant. La bande $[f_{min}, f_{max}]$ dépend de la bande de l'émetteur utilisé dans le scanner. Indépendamment en pratique, f_{max} devrait être inférieure à 250 kHz environ en raison de la taille des granulats et de l'atténuation des ondes.

Etant donné que la profondeur de pénétration de l'OS est de l'ordre de sa longueur d'onde λ , le gradient GV défini ainsi donne une image de la variation de V en fonction de profondeur. L'analyse du gradient GV , permet facilement de visualiser la présence (ou non) d'un gradient, son ampleur et de sélectionner les points les plus sensibles qui peuvent faire vraiment l'objet de l'inversion en fonction de la profondeur d .

Un exemple de la procédure complète d'analyse du gradient GV est illustré sur la figure 3. Les exemples présentés proviennent des mesures in situ décrites dans le paragraphe 3. La section 3.b de cette figure illustre les courbes de dispersion $V(f)$ choisies afin d'illustrer les trois cas définis précédemment. La section 3.c donne les résul-

tats d'inversion sous forme de la vitesse transversale V_s en fonction de profondeur. L'inversion est réalisée à l'aide du logiciel CLOUD, développé au laboratoire, testé et validé sur les structures multicouches connues [4, 6] en cherchant une solution à deux couches. Les résultats d'inversion (Fig. 3.c) indiquent alors la profondeur d de la couche de peau résultant de la forme de $V(f)$ mesurée.

- Le cas 1 correspond au béton âgé de 65 ans, visuellement dégradé. La profondeur de carbonatation obtenue grâce aux prélèvements effectués sur site est de 29 mm (pourtant le GV est positif). En outre, l'inversion donne $d=12$ mm. Ceci pourrait être interprété comme une situation dans laquelle la dégradation de surface domine largement l'effet de carbonatation ou l'augmentation de l'humidité. Il serait souhaitable de mesurer l'état de microfissuration superficielle pour poursuivre l'interprétation.
- Le cas 2 correspond au béton plus jeune, âgé de 10 ans, visuellement en bon état. La valeur négative de GV suggère au contraire que les propriétés de surface sont meilleures. La profondeur de carbonatation obtenue est de 3-4 mm, pourtant l'inversion donne $d=14$ mm. Cette différence pourrait être interprétée comme l'effet supplémentaire de l'humidité de surface qui pénètre à une profondeur plus importante. Cet exemple montre aussi que l'obtention de la profondeur de carbonatation à l'aide de l'inversion est plutôt délicate, si on ne sait pas de découpler les autres phénomènes qui contribuent dans modification de $V(f)$.
- Le cas 3 a été choisi afin d'illustrer la situation où $V(f)$ est quasi constante donc $GV \approx 0$ (sur ouvrage l'obtention de $V(f) = \text{constante}$ est quasi impossible). Il s'agit ici du même mur que celui ausculté dans le cas 2, mais de la maille voisine.

Les caractéristiques quantitatives des cas illustrés sur la figure 3 sont résumées dans le tableau 1.

3. ANALYSE DES PROPRIÉTÉS DE LA PEAU DU BÉTON SUR DEUX OUVRAGES

Les auscultations, réalisées dans le cadre du projet français "Analyse et Capitalisation pour le Diagnostic des

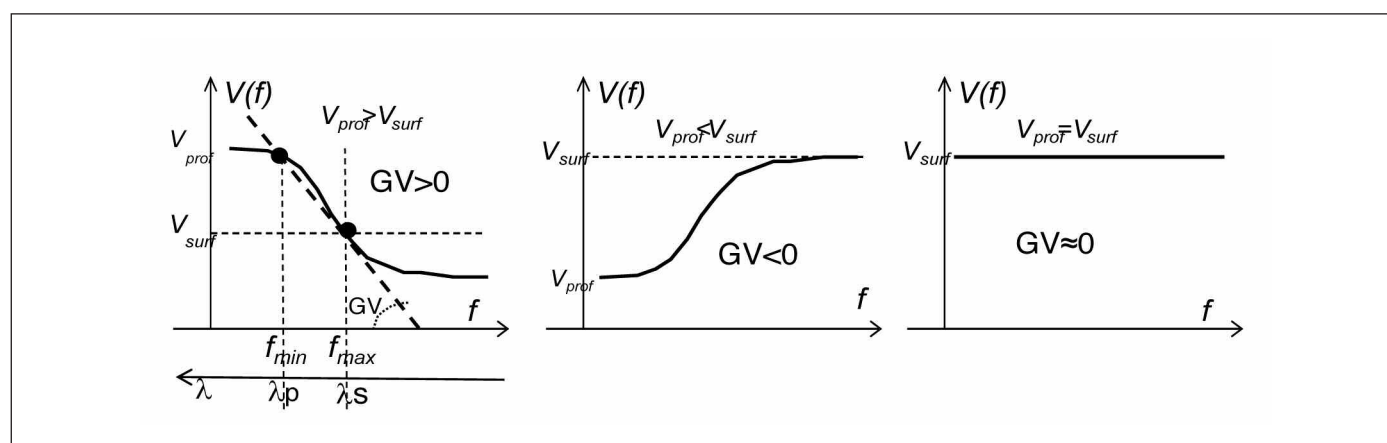


Figure 2. Les caractéristiques de dispersion pour les trois cas et illustration du gradient

	Maille Face a	GV $\lambda_p=50\text{mm}, \lambda_s=20\text{ mm}$ m/s / mm	Résultats de l'inversion				Profondeur carbonatation prélevée mm
			d mm	d mm	V_{surf} m/s	V_{prof} m/s	
Cas 1	IV N A2	4.1	11.8	1.77	2225	2573	29
Cas 2	III N J3	-2.05	14.8	2.5	2406	2254	3-4
Cas 3	III N F3	-0.4	12.9	2.0	2300	2200	Non prélevé 3-4 mm dans la maille voisine

Tableau 1. Caractéristiques des mailles analysées sur la figure 3.

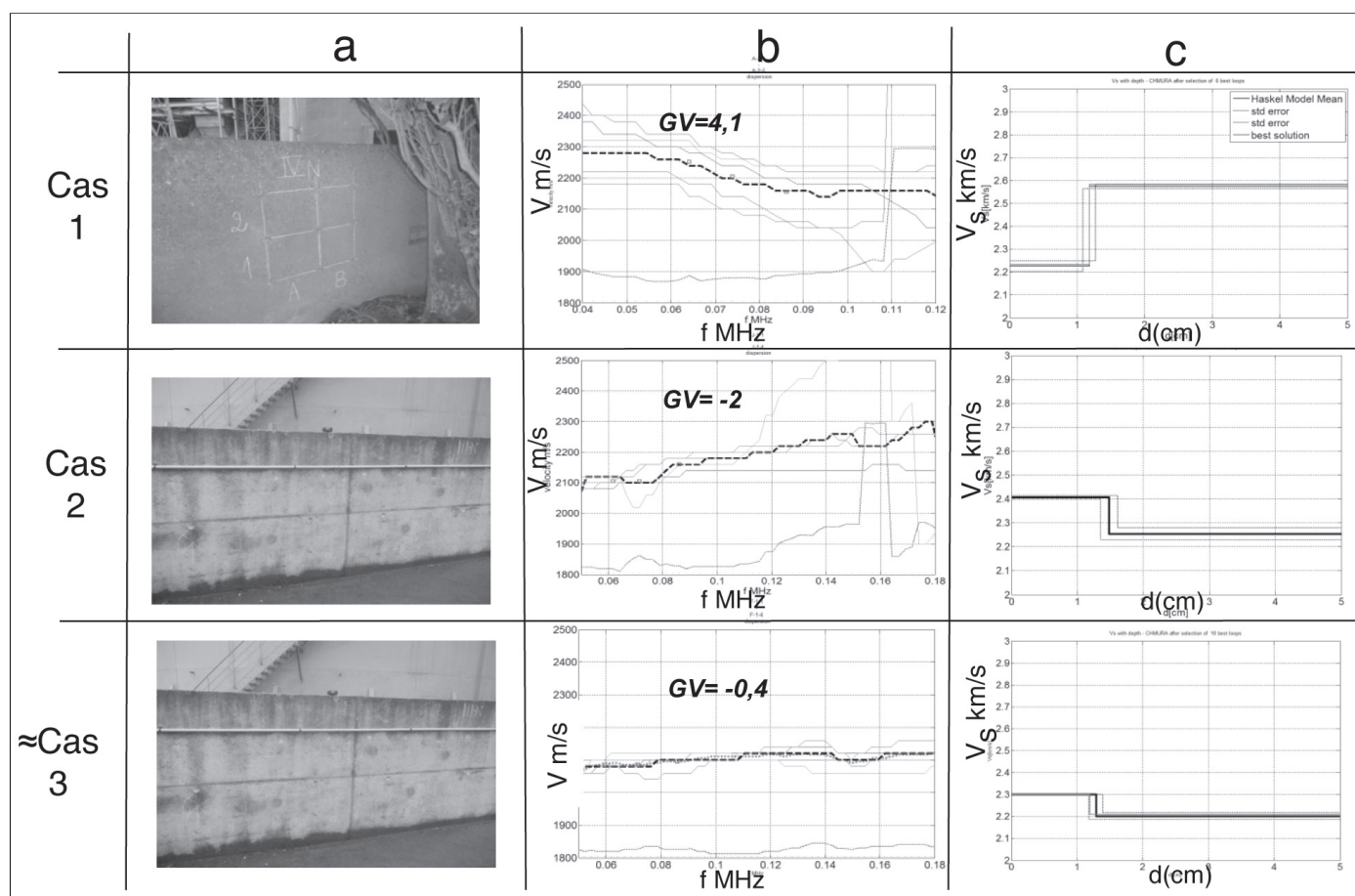


Figure 3. Exemple de la procédure complète d'analyse du gradient (a) Photos des murs auscultés - (b) Courbes de dispersion $V(f)$ illustrant les 3 cas - (c) Résultats de l'inversion donnant la vitesse transversale V_s en fonction de la profondeur d

Constructions » (ACDC) [7] prévoyait des mesures sur deux sites, sur des bétons d'âge et d'expositions différents. Ces campagnes nous ont permis de constituer la base de données de dispersion $V(f)$ des bétons auscultés et investiguer les gradients.

Les mesures sont réalisées dans les mailles définies par les positions du ferrailage et codifiées en fonction de la position de la maille auscultée. Dans chaque maille la $V(f)$ est mesurée sur 5 profils parallèles et la $V_{\text{maille}}(f)$ est obtenue comme la moyenne de ces 5 mesures. Les gradients GV_{maille} sont ensuite déterminés pour chaque maille à l'aide de la formule (1) en prenant toujours, pour ces deux sites, $\lambda_s=20$ mm et $\lambda_p=50$ mm (ceci correspond à la bande fréquentielle de $f_{\text{min}}=40$ à $f_{\text{max}}=110$ kHz environ).

3.1. Site du Havre

Ce site se trouve dans la centrale thermique de l'EDF au Havre, qui se situe à proximité de la mer. Par conséquent,

le béton y subit des conditions climatiques très variées et supporte éventuellement la présence de sel. Les auscultations y ont été effectuées sur les 3 murs. Deux murs, notés I (1 seule face) et IV (faces N et S) sont âgés de 65 ans, un mur noté III (faces N et S) est âgé de 10 ans. Les symboles N et S indiquent l'orientation nord et sud.

La figure 4.a montre la variation de GV_{maille} pour chaque maille de tous les murs auscultés. Nous notons une grande variabilité de GV sur un même mur (voir le paragraphe précédent). Afin d'obtenir la caractéristique globale pour chaque mur, le gradient moyen GV_{face} pour chaque face est la moyenne des valeurs en chaque maille.

Les exemples de la Figure 3 proviennent de ce site. Ces résultats moyens (Fig. 4.b) montrent que les murs anciens affichent un $GV>0$ ce qui suggère que le béton de peau serait dégradé (cas 1 de la Figure 3). En revanche, le mur jeune affiche des caractéristiques de peau meilleures (porosité plus faible, module plus élevé et/ou plus humide) que les caractéristiques à cœur correspondant au cas 2 de la Figure 3.

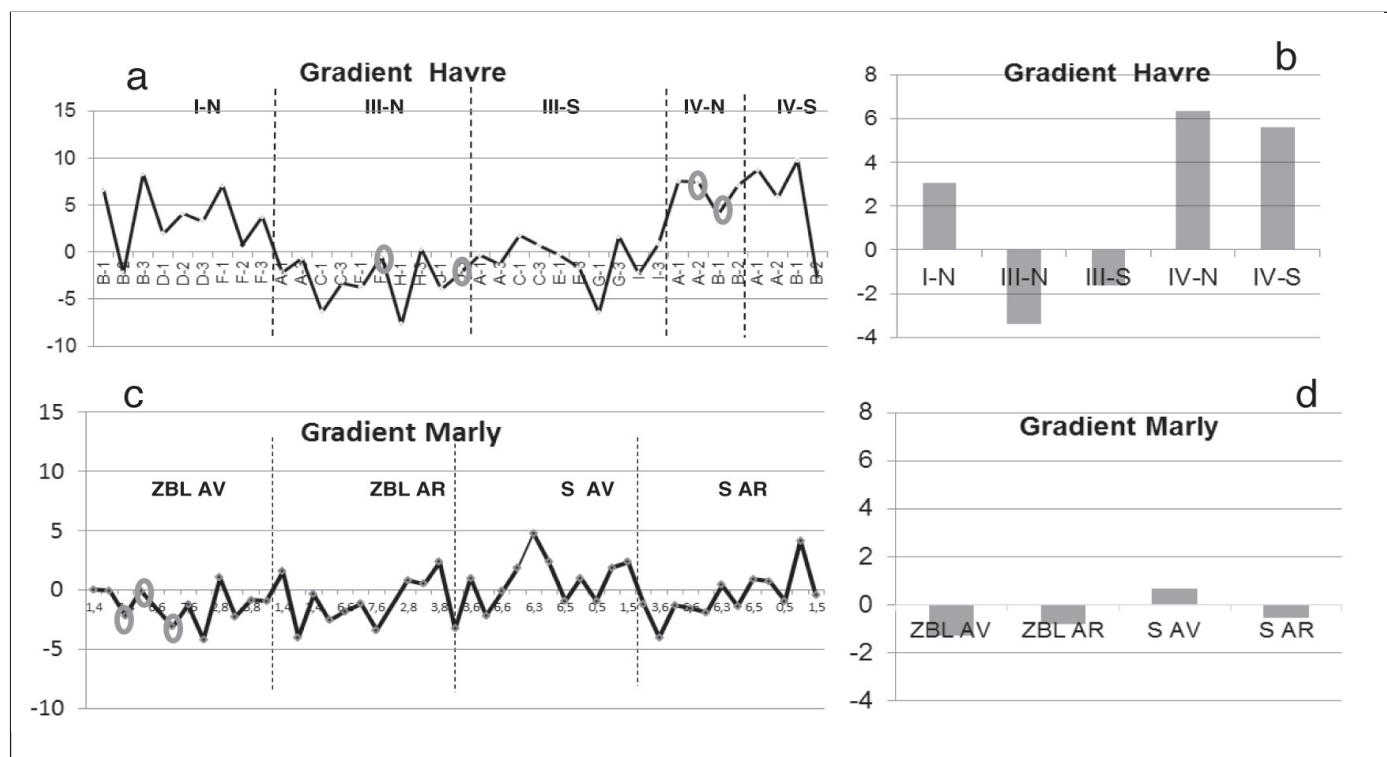


Figure 4. (a) Site de Havre, gradients GV par maille auscultée - (b) Site de Havre, gradients moyens par face auscultée - (c) Site de Marly, gradients GV par maille auscultée (les cercles indiquant les mailles caractérisées dans le tableau 2) - (d) Site de Marly, gradients moyens par face auscultée

(NB les cercles indiquent les mailles caractérisées dans les tableaux 1 et 2)

3.2. Site de Marly

Ce site est un pont autoroutier dans la région du Nord Pas-de-Calais, situé à Marly, âgé d'environ 35 ans et en bon état. Il est composé de trois ouvrages, possédant chacun 6 piles d'épaisseur proche de 60 cm. Quatre faces de piles ont été auscultées, l'avant et l'arrière de deux piles, l'arrière étant du côté du remblai supportant la culée :

- deux faces de la pile nommée S, a priori la plus exposée à des variations environnementales dues au soleil, au vent ou à la pluie notées respectivement SAV (S Avant) et SAR (S Arrière) et

- deux faces de la pile nommée ZBL notées ZBL AV et ZBL AR, s'agissant de la pile centrale de l'ouvrage, la pile ZBL est a priori la moins exposée à ces variations.

Les gradients obtenus sur ce site sont montrés sur les Figures 4.c et 4.d. Notons que les gradients GV sont considérablement plus faibles que ceux obtenus sur le site de Havre. Certaines mailles affichent même un gradient quasi nul $GV_{\text{maille}} \approx 0$, correspondant au cas 3. Les gradients

moyens GV_{face} sont très faibles ce qui indiquerait que les piles sont en bon état. Pour trois faces, les gradients moyens sont faiblement négatifs. Seule la face avant de la pile S présente un gradient moyen GV_{face} légèrement positif ce qui indiquerait un début de dégradation de cette face, ce qui coïncide avec le fait que cette face de cette pile est plus exposée aux variations atmosphériques.

En ce qui concerne la profondeur de carbonatation, elle a été mesurée sur 3 mailles de la pile ZBL. Le Tableau 2 donne les gradients GV pour ces mailles (indiquées par les cercles sur la figure 4.c), les résultats de l'inversion et la profondeur de carbonatation. Ces résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La carbonatation de la face avant de la pile ZBL est d'environ 4.5 mm mais la profondeur d obtenue par inversion varie beaucoup (12 ± 6 mm ou 6 ± 4 mm). Il est donc impossible d'interpréter le gradient GV en lien avec la profondeur de carbonatation.
- L'inversion du cas $GV \approx 0$ est quasi impossible car, si $V_{\text{surf}} = V_{\text{prof}}$, la profondeur d ne peut pas être évaluée. Pour la

Face	Maille	GV $\lambda_p=50\text{mm}, \lambda_s=20\text{ mm}$ m/s / mm	Résultats de l'inversion				Profondeur carbonatation Prélevé mm
			d mm	d mm	V_{surf} m/s	V_{prof} m/s	
ZBL AV	2-4	-2.17	11.6	6.38	2840	2687	4.4
ZBL AV	6-5	-0.005	Inversion incertaine si $GV \approx 0$				4.7
ZBL AV	7-5	-3.08	6.3	4.0	2760	2690	4.5

Tableau 2. Caractéristiques des 3 mailles de la face ZBL AV

même raison, pour de faibles valeurs de GV, l'inversion donne une incertitude sur l'épaisseur λd qui devient importante.

- Par ailleurs, l'inversion des caractéristiques du béton de peau (de faible profondeur, de quelques millimètres) nécessite d'utiliser l'OS de longueur d'onde comparable, donc des fréquences élevées de l'ordre de 300-400kHz. La faisabilité d'une telle mesure reste douteuse en raison de la taille des granulats et de l'atténuation des ondes à de telles fréquences.

4. CONCLUSION

1. La forme de la courbe de dispersion des vitesses de phase de l'onde de surface fournit l'information sur la présence de la peau de béton et sur le caractère global de la pathologie.
2. Le paramètre défini comme le gradient GV de vitesse de phase sur la longueur d'onde, proposé dans cet article, permet d'évaluer rapidement l'existence et l'ampleur d'une pathologie éventuelle. Un gradient négatif ($GV < 0$ et $V_{surf} > V_{prof}$) pourrait indiquer que la porosité est plus faible en surface et/ou que la peau est très humide ; le gradient positif ($GV > 0$ et $V_{surf} < V_{prof}$) que la porosité est plus forte en surface ce qui pourrait être dû à une microfissuration de surface.
3. Etant donné que gradient est affecté par plusieurs facteurs, la détermination exacte du type de pathologie est impossible en utilisant uniquement les OS. Ce sujet nécessiterait des recherches complémentaires. Pour découpler les phénomènes qui contribuent à modifier $V(f)$, il sera intéressant de les analyser en les comparant ou en les combinant avec d'autres méthodes comme les méthodes électromagnétiques très sensibles à la teneur en eau du béton [5, 8].
4. Les résultats de l'inversion donnent la profondeur globale de la peau de béton, également sans possibilité de distinguer le type de pathologie. Nous pouvons aussi supposer que ces variations sont liées à l'éloignement des plus gros granulats de la surface coffrée, ce qui reste à vérifier dans l'avenir.
5. L'inversion des très faibles profondeurs est incertaine (mais aussi pas nécessaire). Retrouver une profondeur de quelques millimètres nécessiterait d'utiliser des

ondes de fréquences élevées de l'ordre de quelques 100 kHz, ce que pourrait être difficile, voire impossible en pratique. La profondeur de peau minimale « inversable » avec une bonne précision serait de l'ordre de 1 cm.

RÉFÉRENCES

- [1] V. Garnier, B. Piwakowski, O. Abraham, G. Villain, C. Payan, J.-F. Chaix, Acoustical techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistency, *Construction & Building Materials*, Vol. 43, 2013, pp 598-613
- [2] Parc C.B., Xia J., Miller R.D., Multichannel analysis of surface waves (MASW), *Geophysics*, Vol. 64, 1998, pp 800-808
- [3] O. Abraham, B. Piwakowski, G. Villain, O. Durand, Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterization of concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, December 2012, pp 904-915
- [4] B. Piwakowski, P. Sabinowski, M. Kaczmarek, Surface Wave Technique In Evaluation Of Concrete Cover: Data Processing And Identification Method, *International Congress on Ultrasonics ICU2011*, Gdansk, Poland, September 2011, published by AIP.
- [5] J.P. Balayssac, S. Laurens, G. Arliguie, D. Breysse, 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*, Vol. 35, October 2012, pp. 131-138
- [6] R. Drelich, B. Piwakowski, M. Kaczmarek, Identification of inhomogeneous cover layer by non-contact ultrasonic method – studies for model material, *Congrès Diagonbeton 2014*, Toulouse, France, 19-20 mars, 2014
- [7] Garnier V., Martini D., Salin J., Fardeau V., Sbartaï Z.M, D Breysse, Piwakowski B, Villain G., Abraham O., Balayssac J.P., Non Destructive Testing of Concrete: Transfer from Laboratory to On-site Measurement, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring EWSHM 2014, Nantes, France, 8-11 July, 2014
- [8] Villain G., Sbartaï Z. M., Dérobert X., Garnier V., Balayssac J.-P., Durability diagnosis of a concrete structure in a tidal zone by combining NDT methods: laboratory tests and case study, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, December 2012, p.893-903