



Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

CONTRÔLE DU BÉTON DE PEAU PAR ACOUSTIQUE NON LINÉAIRE ET ONDES DE SURFACE

CONTROL CONCRETE SKIN CONTROL USING NONLINEAR ACOUSTIC SURFACE WAVE

Q.A. VU⁽¹⁾, V. GARNIER, J.F. CHAIX, C. PAYAN

LMA CNRS UPR7051, Université d'Aix-Marseille, LCND, Av. Gaston Berger 13625 Aix-en-Provence Cedex

* auteur correspondant : vincent.garnier@univ-amu.fr

RÉSUMÉ

Le béton de peau a un rôle essentiel dans la durée de vie d'une structure de génie civil. Il doit faire face aux agressions chimiques, environnementales et mécaniques. Il est important de connaître son état de vieillissement et ses capacités à remplir ses fonctions. De nombreuses techniques permettent d'ausculter la première couche de matière, mais les ondes ultrasonores ont la particularité de pénétrer à des profondeurs équivalentes à la longueur d'onde. Ces ondes peuvent donc être adaptées en fréquence pour varier la profondeur d'auscultation. Il devient alors possible de proposer la caractérisation du matériau et ses gradients par ondes de Rayleigh. Les paramètres liés à l'acoustique non linéaire sont largement plus sensibles aux évolutions du matériau que la vitesse et l'atténuation obtenue par acoustique linéaire. Le niveau de non-linéarité dans la réponse élastique des matériaux dépend fortement du niveau d'endommagement par microfissuration ou des différentes pathologies et de leurs évolutions telles que l'alcali réaction ou la carbonatation. Nous proposons dans ce travail d'associer l'acoustique non linéaire aux ondes de surfaces afin d'ausculter la surface du matériau sur une profondeur déterminée. Cette technique offre une réelle possibilité de contrôle par une face unique d'une structure ce qui ouvre des voies à la transposition sur site. L'objectif final est de faire des essais sur des structures en exploitant des vibrations naturelles de celles-ci telles que le passage d'un camion sur un pont. Cette étude est faite en collaboration avec l'Université de Sherbrooke.

ABSTRACT

Concrete cover has an essential role in the life of a civil engineering structure. It faces to chemicals, environmental and mechanical. It is important to know its aging condition and its ability to perform its functions. Many techniques are able to listen the first layer of material, but the ultrasonic waves have the particularity to penetrate equivalent to the wavelength depths. These waves can be adjusted to vary the frequency monitoring depth. It then becomes possible to propose the characterization of the material and its gradients by Rayleigh waves. The parameters related to the nonlinear acoustic are more sensitive to changes of the material as the velocity and attenuation obtained by linear acoustics. The level of non-linearity in the elastic response of materials strongly depends on the level of damage by microcracking or different pathologies and their developments such as alkali reaction or carbonation. We propose in this work a study of combining the nonlinear acoustic with the surface waves in order to auscultate the material surface to a predetermined depth. This technique offers a real possibility of test by a single face of a structure which opens up possibilities for transposition on site. The ultimate goal is to make experiments on structures by exploiting natural vibrations such as the passage of a truck on a bridge. It is done in collaboration with the University of Sherbrooke.

Mots-clés : Acoustique Non-Linéaire, Onde de surface, Modulation, Béton



1. CONTEXTE DU TRAVAIL

Les essais non destructifs et plus spécifiquement les ondes ultrasonores sont mises en œuvre fréquemment dans les contrôles des structures en béton. Les méthodes linéaires apportent des informations qui sont la vitesse et l'atténuation. Les grandes et moyennes longueurs d'ondes interagissant avec le matériau à l'échelle du granulat, sont sensibles à leurs évolutions. L'acoustique non linéaire permet d'ausculter le béton à l'échelle mésoscopique et les interactions mises en évidence sont alors à l'échelle de la microfissure. D'un point de vue structurel, le béton étant un matériau très hétérogène, poreux et microfissuré de par sa réalisation et son vieillissement, son comportement est fortement non linéaire et évolue avec l'état pathologique du matériau. De nombreux auteurs ont travaillé sur le développement des méthodes acoustiques pour chercher et évaluer la non-linéarité dans les roches, puis enfin le béton. Les auteurs [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] ont montré la possibilité de mettre en œuvre de nombreuses méthodes de mesure de paramètres non linéaires (NRUS, NEWS, DAET, Dynamique lente). Leur sensibilité est souvent décuplée par rapport aux techniques linéaires et ceci notamment dans le cas d'un matériau endommagé. En outre, pour chaque méthode expérimentale nous devons nous poser la question de l'application de la mesure sur site. Notre travail a pour objectif de mettre en œuvre l'évaluation des propriétés mécaniques du béton par ondes de Rayleigh se propageant en surface et acoustique non linéaire. Cela autorise d'une part d'effectuer la mesure par une seule face et d'autre part de faire varier la profondeur d'investigation en balayant une gamme de longueur d'ondes données en raison de la propriété de celles-ci de pénétrer dans le matériau sur une profondeur de l'ordre de la longueur d'onde. Il devient alors possible d'ausculter la non-linéarité du béton de peau (2 à 5 cm) qui est la couche la plus affectée par les sollicitations mécaniques et environnementales et qui est en charge de la protection des armatures. Nous présenterons ici les premières avancées de nos travaux.

2. PRINCIPE

La non-linéarité provient soit du comportement des liaisons atomiques soit des comportements locaux attachés aux évolutions des contacts au sein de toutes les discontinuités du matériau. Ces dernières sont de grandes tailles lorsque nous considérons des macro fissures. Leur non-linéarité est alors mesurée par différentes techniques dans le verre ou les roches [8] et le béton [9], [10]. Dans le cas d'un endommagement diffus, l'échelle mésoscopique considérée est microstructurale et locale. Les discontinuités sont alors les microfissures et pores du réseau du béton. La sommation des contributions non linéaires locales peut se mesurer à l'échelle globale. La loi de comportement phénoménologique décrit ces phénomènes et intègre une forme quadratique (β et δ non-linéarité atomique dite classique) ainsi qu'une composante hystéritique (α dite non classique) décrivant la non-linéarité totale du matériau :

$$\sigma = E\varepsilon [1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \dots] - \alpha(\varepsilon, \text{sign}(\dot{\varepsilon})) \quad (1)$$

L'intensité de la non-linéarité hystéritique dépend de la densité des hétérogénéités du matériau et de l'amplitude de la sollicitation. Plus le matériau est microfissuré et plus l'amplitude de sollicitation est importante, plus son comportement est non linéaire. Les interactions non linéaires de l'onde se propageant dans le matériau génèrent sur les composantes fréquentielles du signal, des harmoniques, ou encore des bandes latérales dans le cas d'une modulation d'ondes.

Dans le cas d'une analyse temporelle, l'onde voit sa vitesse modulée et donc le temps de vol en fonction de l'état de sollicitation du matériau évolue. Ces évolutions de la vitesse peuvent être analysées par fréquence de résonance ou de temps vol et déphasage des signaux. Nous utilisons dans nos travaux ce principe de mesure.

La sollicitation du matériau peut se faire de façon continue par une oscillation forcée ou instantanément par un impact temporel. Elle est généralement de forte amplitude et liée à des ondes de basse fréquence. Dans les deux cas, le matériau est dans un état non équilibré continu ou instantané [11]. Un principe de mesure de la non-linéarité généralement employé est d'ausculter le matériau dans cet état hors équilibre au cours ou après la sollicitation par une onde de haute fréquence. Cet état et les variations de vitesse qui y sont attachées sont directement liés à l'état pathologique du matériau qui est conditionné à un état dit « hors équilibre ». Le retard temporel de l'onde haute fréquence dans un milieu hors équilibre est exploité [12] pour évaluer l'état du matériau et ceci juste après l'impact d'une masse. Il montre la possibilité de suivre l'état du matériau atteint par la RAG. Ce décalage temporel est calculé par l'intercorrélation des signaux de haute fréquence entre deux états différents, non perturbé et perturbé par la basse fréquence. D'autres auteurs suivent le retour à l'état non perturbé de la matière au cours du temps pour caractériser le matériau (dynamique lente) [13], [14].

L'objectif final est d'ausculter la non-linéarité des ondes d'une façon itératives en profondeur par une variation de la longueur d'onde des ondes de surface. Il sera ainsi possible de déterminer les gradients dans le béton de peau. Dans le travail présenté ci-dessous, nous décrivons la méthode expérimentale mise en place et la démarche proposées pour évaluer le décalage temporel dans le cas d'une éprouvette de laboratoire et nous présentons les premiers résultats.

3. CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE

Nous développons l'analyse du décalage temporel instantané d'une onde haute fréquence modulée par une basse fréquence. L'éprouvette parallélépipédique (0,15m x 0,15m x 0,6m) est de composition (Granulats 4/14 silice, sable 0/4, Ciment CEM 52,5, E/C=0,57). Elle est mise en résonance (fréquence 1,46 kHz) par un pot vibrant sur son premier mode de flexion entre deux appuis.

Cette basse fréquence a pour but de générer les contributions non linéaires. L'onde de haute fréquence qui sonde le

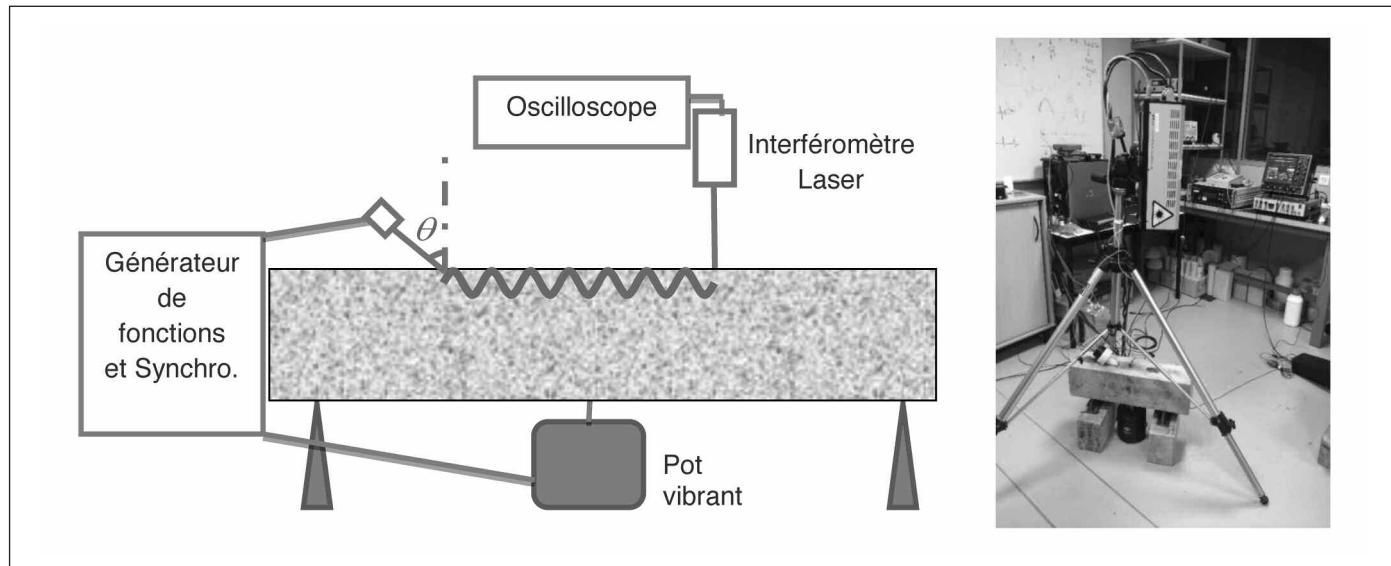


Figure 1 : Montage expérimental

matériau perturbé est une onde de surface générée par un traducteur et un coin en PVDF d'angle d'incidence 50°. La fréquence retenue est 150 kHz. Elle se propage sur une profondeur de l'ordre de 2 cm. Un accéléromètre mesure les déplacements. En réception, nous utilisons un interféromètre laser (0 – 250 kHz) qui mesure la vitesse de déplacement. La Figure 1 montre l'ensemble expérimental. L'onde de haute fréquence est générée par un générateur Tektronik amplifié 50 fois, celle de basse fréquence est issue d'une carte ARB qui pilote le générateur de fréquence du pot vibrant.

4. PROCÉDURE

Les ondes HF et de résonnance BF sont synchronisées et moyennées sur 64 signaux pour diminuer fortement le rapport signal à bruit. La figure 2 donne l'enregistrement du signal Haute Fréquence HF, Basse Fréquence BF et le signal HF modulé par la BF. Les signaux BF et HF servent de référence lors du traitement de signal.

La sollicitation en basse fréquence de 1,46 kHz est générée sur 50 cycles par le pot vibrant sur 5 niveaux de tension croissants de façon à augmenter l'amplitude de la résonance et par la même augmenter d'une part le déséquilibre de l'état du matériau et d'autre part le nombre de contributions non linéaires. La haute fréquence de 150 kHz est générée sur 7000 cycles. Elle se propage à la vitesse mesurée de 2400 m/s. La fenêtre de sollicitation et d'acquisition est de 50 ms pour 2.5M points.

Le traitement consiste à soustraire au signal modulé la porteuse basse fréquence de façon à ne conserver que le signal HF modulé. La mesure du décalage temporel du signal HF modulé par rapport au signal de haute fréquence qui est la référence se fait par l'intercorrélation entre ces deux signaux sur la base d'une fenêtre glissante de 2000 points ce qui correspond à 6 alternances de la haute fréquence.

5. RÉSULTATS

Deux exemples de résultats normalisés pour faciliter la représentation sont donnés ci-dessous.

La figure 3a correspond au niveau le plus faible de sollicitation par le pot vibrant (BF). La figure 3b correspond au niveau 4 sur 5 des sollicitations BF. La courbe bleue correspond à l'évolution du déplacement normalisé de la poutre dû à sa sollicitation en flexion (BF) sur une durée de 40 ms. Elle est séparée en trois temps : le délai nécessaire au conditionnement du matériau (environ 10 ms), le maintien dynamique de l'état « hors équilibre » et enfin l'amortissement de la vibration. La courbe rouge trace l'évolution normalisée du décalage temporel entre le signal modulé et le signal de référence (HF seule). Ce décalage augmente avec l'amplitude de la vibration BF ce qui indique le conditionnement du matériau donc le niveau de l'état hors équilibre. Nous retrouvons aussi les trois phases (conditionnement, maintien et amortissement). Ce décalage s'explique par la modification du module du matériau et donc de la vitesse des ondes pour des conditions hors équilibre données. Il est pour nous une information de la non-linéarité du matériau révélée lors de l'essai. Il est en forte augmentation entre les niveaux 1 et 5 de sollicitation proposés.

Dans le cas de la plus forte amplitude de vibration (5) de la poutre, la figure 4a montre l'évolution des écarts temporels entre le signal HF modulé par la BF et le signal HF de référence non modulé sur la totalité du signal. La phase de conditionnement passée, le niveau de décalage temporel lié au conditionnement est de 2.5×10^{-8} s. Un agrandissement en figure 4b de 9 alternances de flexion basses fréquences montre l'évolution de ce décalage temporel en cours de ces 9 cycles. Les évolutions de l'alternance de ce décalage au cours de chaque cycle peuvent être approximées par une fonction sinusoïdale (figure 4b) afin de déterminer les valeurs maximale, minimale et moyenne. Ces données sont directement liées à la variation de vitesse générée entre les états extrêmes de sollicitation lors du cycle de flexion par

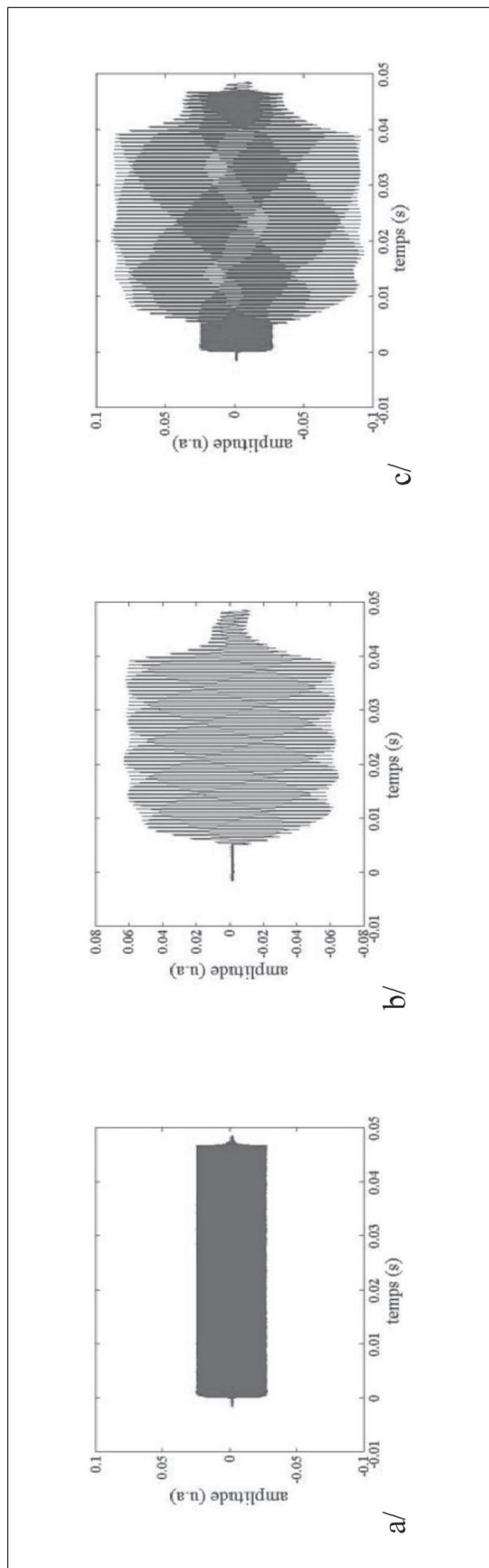


Figure 2 : a/ Onde HF ; b/ Onde BF ; c/ Modulation HF et BF

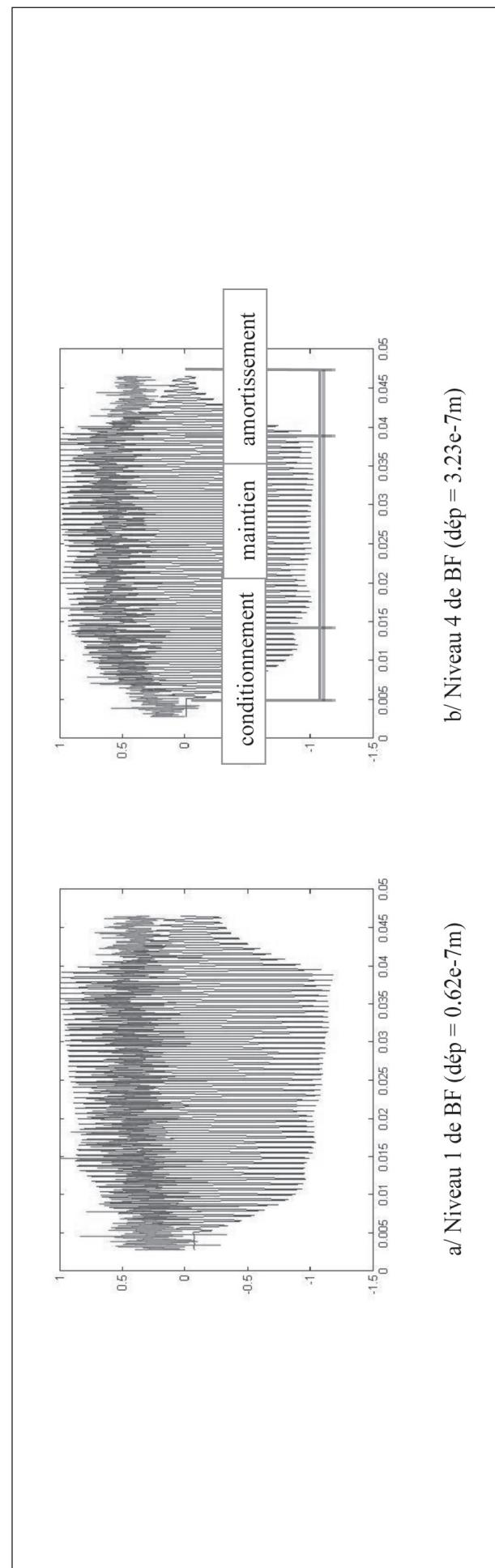


Figure 3 : Signal de sollicitation BF modulé normalisé en fonction du temps et écart temporel entre les signaux HF modulé et non modulé (de référence).

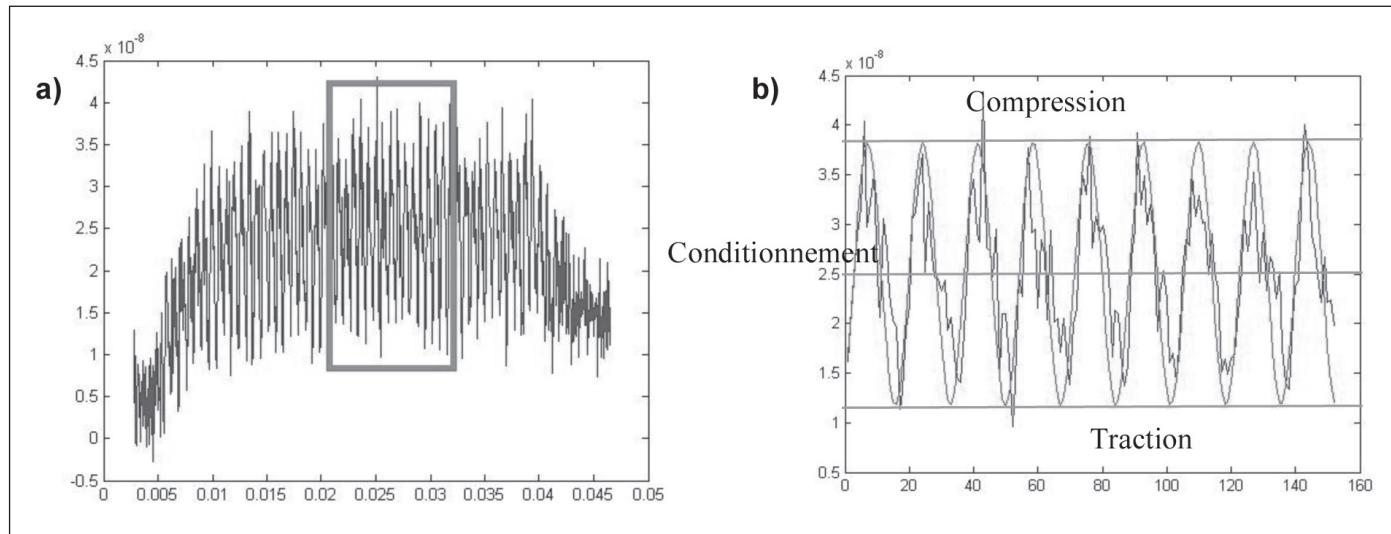


Figure 4 : a) Variation de décalage temporel entre l'onde modulée HF et l'onde de même fréquence non modulée (niveau 5, déplacement = 6.07×10^{-10} m) b) agrandissement dans la zone de maintien (9 cycles BF)

la non-linéarité hystéristique du béton. Lorsque la flexion de l'éprouvette génère de la compression, la vitesse des ondes et le décalage augmentent. A l'inverse lors de la traction, les deux paramètres diminuent.

Il est alors possible de suivre sur tout le signal, les informations temporelles comme le montre la figure 5 en fonction de l'amplitude du déplacement de la poutre sous deux formes : nous retrouvons les valeurs de l'écart temporel moyen (courbe en pointillés) qui est lié au conditionnement pour chaque niveau de sollicitation identifié par l'amplitude des déplacements normal à la surface de la poutre. Cet écart est normalisé par rapport à celui du niveau 1 d'amplitude de vibration de la poutre. La deuxième courbe (ligne continue) correspond à l'amplitude des écarts temporels lors des cycles de basse fréquence.

Les courbes montrent une évolution forte des écarts moyens et de l'amplitude des écarts avec la variation du déplacement. Il apparaît donc clairement que le suivi temporel des informations ultrasonores retenues permet de suivre le conditionnement du matériau et l'intensité de la non-linéarité générée à chaque niveau de sollicitation.

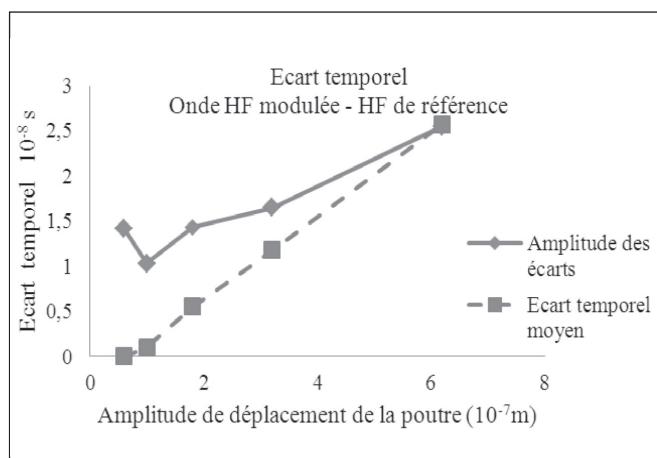


Figure 5 : Ecart temporel moyen et amplitude des écarts entre les ondes HF modulées et HF de référence

6. CONCLUSION

Nous avons montré qu'une approche appuyée sur la mesure des informations temporelles permet le suivi de la non-linéarité du béton par ondes de surface. Ce type d'onde est retenu en raison de leur facilité de mise en œuvre dans le cas de structures difficiles d'accès. Nous comparons une onde modulée avec une onde identique non modulée. Nous mesurons le décalage temporel entre les signaux du conditionnement et l'amplitude des variations de ce décalage autour de cette valeur moyenne dans le cas d'une poutre en flexion. Il apparaît clairement que le décalage moyen est fonction du conditionnement du matériau et que les écarts temporels durant les cycles de sollicitation en flexion sont dépendants du niveau de sollicitation et donc du nombre de contributions non linéaires. Il devient donc possible d'établir le lien entre les décalages de vitesses et la non-linéarité sur la base d'une technique à profondeur d'inspection variable. Les perspectives sont nombreuses pour les inspections sur site tant pour la mesure des gradients en fonction de la profondeur que les variations spatiales des caractéristiques du matériau. Pour la suite des travaux, nous allons appliquer cette procédure dans des essais comparatifs de matériaux endommagés thermiquement. Nous poursuivrons par la mise en application de ces essais sur des éprouvettes de grandes dimensions ayant un gradient de porosité dans le béton de peau et ensuite par la mise en œuvre sur site dans le cadre d'une coopération. Ces travaux sont réalisés en collaboration avec 'Université de Sherbrooke. Il est soutenu par le CFQCU que nous remercions.

RÉFÉRENCES

- [1] Van Den Abeele K., Sutin A. M., Carmeliet, J. and Johnson P.A., "Micro-Damage Diagnostics Using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS)," NDT and E International, Vol. 34, No.4, pp. 239-248, 2001.

- [2] Kyung-Young Jhang, Nonlinear Ultrasonic Techniques for Nondestructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturong*, Vol. 10, No. 1, pp. 123-135, 2009.
- [3] Guyer RA, Johnson PA, Nonlinear Mesoscopic Elasticity ; The complex Behaviour of Granular Media including Rocks and Soil, WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2009.
- [4] Tencate JA, Smith DE, Guyer RA, Universal slow dynamics in granular solids. *Phys. Rev. Lett.*, vol 85, p 1020-1023, 2000.
- [5] Scalerandi M, Gliozi A, Bruno C, Van der Abee K, Nonlinear acoustic time reversal imaging using the scaling subtraction method, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol 41, p 215404-215414, 2008.
- [6] Renaud G, Callé S, Remenieras JP, Defontaine M, Non-linear acoustic measurements to assess crack density in trabecular bone, *International Journal of Non-Linear Mechanics* vol 43, p194 – 200, 2008
- [7] Payan C, Ulrich T.J., Le Bas P.-Y., Guimaraes M., Probing materials damage at various depths by use of Time Reversal Elastic Nonlinearity Diagnostic: Application to concrete Acoustics 2012, LAUR 12-20274, 2012.
- [8] Ulrich TJ, Johnson PA, Guyer RA, Investigating interaction dynamics of elastic waves with a complex nonlinear scatterer applying the time reversal mirror, *Phys. Rev. Lett.*, 98:104-30, 2007.
- [9] Zardan J.-P., Payan C., Garnier V. and Salin J., Effect of the presence and size of a localized nonlinear source in concrete, *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (1), EL38-EL42, 2010.
- [10] Payan C., Quiviger A., Garnier V., Chaix J.F., Salin J., Applying diffuse ultrasound under dynamic loading to improving closed crack characterization in concrete, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013.
- [11] Pasqualini and all, Nonequilibrium and Nonlinear Dynamics in Geomaterials I :The Low Strain Regime, *Journal of Geophysical Research*, vol 112, B01204, 1-16, 2007.
- [12] Moradi-Marani F., Kodjo S. A., Rivard and Lamarche C. P., Application of the mechanical perturbation produced by traffic as a new approach of nonlinear acoustic technique for detecting microcracks in the concrete: A laboratory simulation, *AIP Conf. Proc.* 1430, 1493 (2012).
- [13] Johnson PA, Sutin A, Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamic in diverse solids, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol 177, p 124-130, 2005.
- [14] Gliozi A, Scalerandi M, Antonaci P, Bruno C, Conditioninig-induced elastic nonlinearity in hysteretic media, *Applied Physics A*, 100: 421-424, 2010.