

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Caractérisation Ultrasonore de Fissures dans les Bétons

Méthodes Linéaires et Non Linéaires

Audrey Quiviger^{1,2}, Jean-Philippe Zardan², Jean-François Chaix², Cédric Payan², Vincent Garnier²,
Joseph Moysan², Jean Salin¹

¹ EDF R&D – STEP - 6 Quai Watier, BP 49, 78401 CHATOU Cedex 01 - Tel : + 33 (0) 1 30 87 76 75 - Fax : + 33 (0) 1 30 87 81 20

² LCND - Laboratoire de Caractérisation Non Destructive, Université de la Méditerranée - IUT d'Aix, département Génie Mécanique et Productique,
Avenue Gaston Berger, 13625 Aix-en-Provence Cedex – Tel : + 33 (0)4.42.93.90.55 – Fax : + 33 (0)4.42.93.90.84

La caractérisation non destructive des bétons est un enjeu important pour l'évaluation de la durée de vie des structures actuelles et futures du génie civil. Les modes critiques de dégradations des structures passent souvent par la macro-fissuration des bétons, dont la présence de fissures débouchant en surface. Il s'agit alors de détecter, identifier et caractériser ces fissures dans les meilleurs délais. Les méthodes ultrasonores peuvent répondre à la fois au besoin de caractérisation de celles-ci ainsi qu'à leur suivi rapide et pratique sur site. Seulement, si ces méthodes présentent un fort potentiel, elles restent limitées par des difficultés liées à la maîtrise de la génération des ondes et de l'extraction des paramètres d'intérêts contenus dans les signaux obtenus. Les perturbations proviennent essentiellement de l'hétérogénéité du matériau. Cette complexité du milieu implique des phénomènes de diffusion des ondes ainsi qu'un comportement mécanique non linéaire du béton. Les bases théoriques de la propagation et les méthodes utilisées sont présentées. L'interaction ondes fissures sera développée. Une étude expérimentale a été réalisée sur la base de 5 éprouvettes fissurées à différentes profondeurs. Elle traite de la propagation d'ondes de surface ou de volume interagissant avec les fissures. L'évolution des paramètres linéaires et non linéaires est montrée. La sensibilité des ultrasons est mise en évidence et en particulier le paramètre non linéaire hystérétique α . Les résultats expérimentaux montrent ainsi une voie d'auscultation in situ par ondes de surface à développer afin de parvenir à des solutions industrielles robustes.

1 Introduction

Le béton est un matériau qui présente des évolutions dans le temps. Celles-ci peuvent conduire à des variations des propriétés mécaniques. Ainsi, plusieurs facteurs, tels que le chargement mécanique de la structure, l'environnement, ou encore les attaques subies au cours du temps vont dégrader le matériau. Les endommagements observés peuvent alors être d'ordre chimiques (alcali-réaction, carbonatation...), physiques (cycles gel-dégel, érosion...) ou mécaniques (fluage).

Les dégradations se caractérisent essentiellement par de la corrosion d'armatures, mais également par une évolution de la fissuration de la micro-fissuration à la macro-fissuration.

La capacité à détecter, positionner et dimensionner ces fissures macroscopiques par des techniques non destructives est un enjeu capital dans le domaine du génie civil. En effet, leur présence est identifiée comme un facteur critique vis-à-vis de l'intégrité des ouvrages.

De nombreuses études ont été réalisées en vue de permettre la détermination de la profondeur des fissures dans le béton par le biais de l'évolution des paramètres, linéaires ou non, liés à la propagation des ondes et leurs interactions avec les fissures [1-4]

Cette étude vise à présenter l'évolution de ces paramètres, linéaires et non linéaires pour des fissures de différentes profondeurs débouchant en surface.

2 Ondes de surface

L'utilisation des ondes de surface, et en particulier les ondes de Rayleigh, pour la caractérisation des fissures semblent très prometteuse, notamment dans le cadre d'une auscultation in situ lorsque seul l'accès à une face est possible.

Les ondes de surfaces se propagent radialement le long d'un front d'onde circulaire. En conséquence, l'atténuation géométrique de ce type d'onde est bien moindre que celle décrite pour des ondes de volume [4]. Ceci rend l'utilisation de ces ondes très attractive pour une propagation dans un milieu atténuant tel que le béton.

De nombreuses études [1,5-7] ont été menées, visant à dimensionner des fissures par l'utilisation de techniques de mesure de temps de vol. Le temps nécessaire aux ondes pour se déplacer le long de la discontinuité est mesuré, permettant alors une estimation de la profondeur de cette dernière. Elles montrent le succès de cette méthode pour des fissures simulées, des entailles nettes avec une pointe bien définie.

Cette méthode s'avère néanmoins plus difficile à mettre en œuvre lorsque les fissures sont dans un état de fermeture non maîtrisé.

3 Etude expérimentale

3.1 Eprouvettes

Les mesures ultrasonores des ondes de surface sont réalisées sur des épreuves de béton de dimension $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$. La composition de chaque épreuve est identique. Chacune d'elle, excepté une, comporte une entaille, sur sa largeur, de 1cm de profondeur, réalisée par moulage lors de la mise en œuvre du béton. Ces entailles font office d'amorce de fissuration, permettant ensuite de générer des fissures de différentes profondeurs par flexion quatre points. Un système d'asservissement et de contrôle de déplacement permet d'arrêter la sollicitation de l'épreuve une fois la profondeur de fissure désirée atteinte. Les fissures ainsi obtenues sont perpendiculaires à la surface de l'épreuve et fermées, la structure de l'épreuve reprenant sa forme initiale après arrêt de la sollicitation mécanique.

Au final, nous utilisons cinq épreuves : une est saine, sans entaille ni fissure, une est simplement entaillée, puis, enfin, trois épreuves sont entaillées et fissurées, les fissures faisant respectivement 1cm, 3cm et 5,5cm de profondeur (dimensions mesurées sur le bord, figure 1).

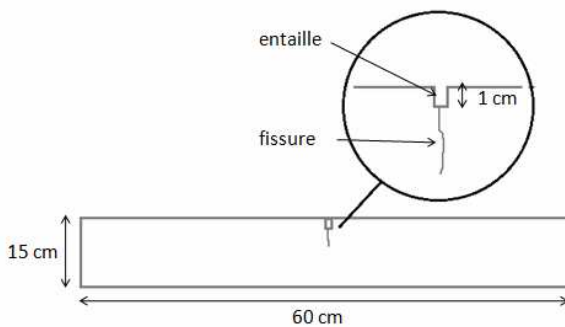


Figure 1: éprouvette entaillée et fissurée

3.2 Mesure de la vitesse ultrasonore des ondes de surface

L'onde de surface est générée par un transducteur de type Panametrics V1011, monté sur un sabot en Téflon avec un angle d'incidence de 40° . Ce matériau a été choisi car il apparaît comme le plus propice à la génération de ce type d'onde [8,9]. Le signal généré (Sofranel 5052PR) est un pulse de fréquence centrale 0,1MHz. Ce choix de cette fréquence est motivé par la forte absorption des hautes fréquences par le Téflon qui limite la bande passante. La réception du signal est assurée par un montage identique, placé en regard de l'émetteur. Il est amplifié au maximum avant d'être visualisé à l'oscilloscope (Lecroy WS424).

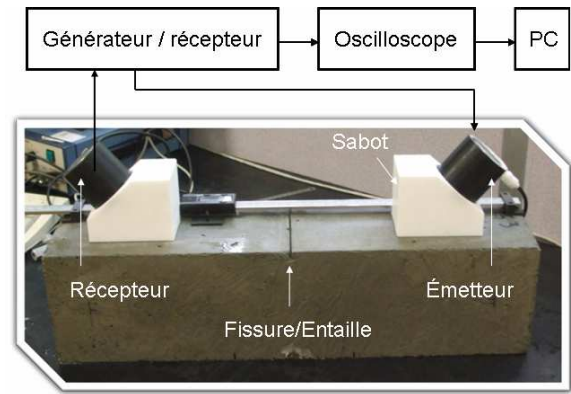


Figure 2 : dispositif de mesure

La mesure de vitesse est effectuée de la manière suivante : l'émetteur est gardé fixe, tandis que le récepteur est déplacé d'une distance connue suivant l'axe d'émission. La première mesure sert de référence afin de s'affranchir de l'erreur de détermination du temps de vol liée à la chaîne de mesure. Les signaux suivants sont ensuite corrélés au premier afin de déterminer la différence de temps d'arrivée de l'onde d'un point de mesure à l'autre. La corrélation est effectuée après fenêtrage du signal temporel. Le fenêtrage permet de limiter volontairement le traitement à la première partie du signal, correspondant à la transmission cohérente et directe, et non pas au signal résultant de la multi diffusion sur les hétérogénéités du béton. Le choix du fenêtrage est un paramètre important de l'étude. Les distances entre chaque point de mesure sont ensuite représentées sur un graphique en fonction des temps d'arrivée. Enfin, une régression linéaire est effectuée, la vitesse étant alors donnée par le coefficient de la pente (figure 3). L'incertitude relative à la vitesse est quand à elle déterminée en tenant compte des incertitudes concernant la position spatiale des capteurs

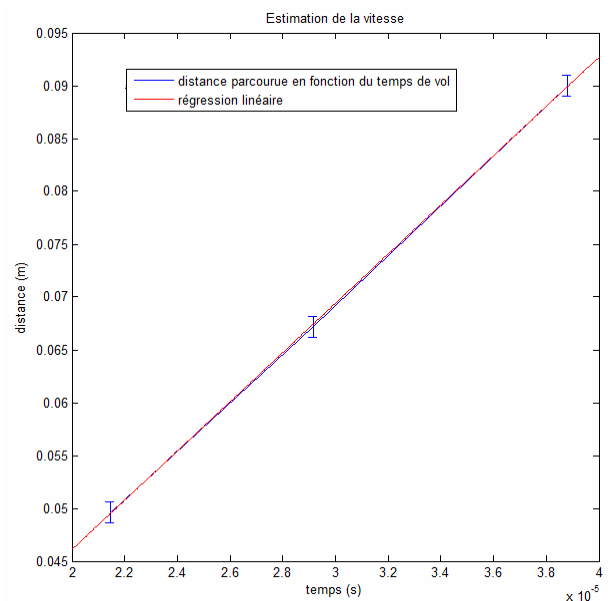


Figure 3 : détermination de vitesse

3.3 Résultats

La figure 4 présente la variation de la vitesse des ondes de surface en fonction de la profondeur de la fissure présente dans l'éprouvette, ainsi que leurs incertitudes respectives.

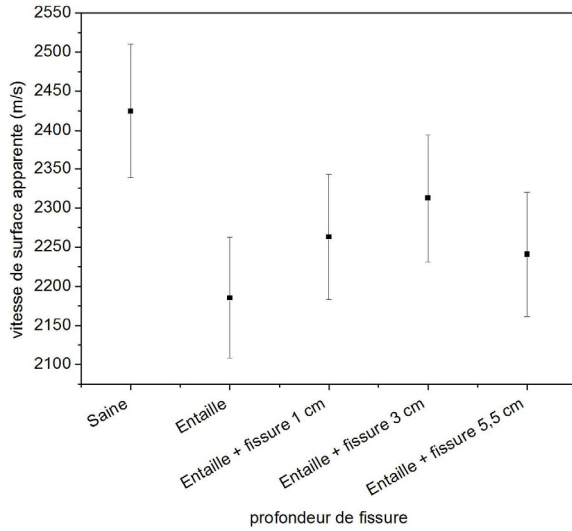


Figure 4: vitesse des ondes de surface en fonction de la profondeur de fissure

Il est dans un premier temps possible de constater une diminution significative de la vitesse apparente de l'onde de surface en présence d'une entaille avec ou sans fissure. Ce procédé permet de détecter la présence d'une entaille plus fissure sans en permettre le dimensionnement. Les d'incertitudes associées à la variation des vitesses mesurées, ne permettent pas une discrimination des différentes fissures. La description de la propagation des ondes dans les milieux linéaires peut donc s'avérer insuffisante dans le cas du béton pour le dimensionnement des fissures centimétriques.

4 Approche non linéaire

Il a été montré [10] que le béton présente un comportement fortement non linéaire, qui permet la génération d'un certain nombre d'observables, eux mêmes sensibles à un endommagement [11,12]. Il a par ailleurs été montré que la sensibilité de ces paramètres est bien supérieure à celle des paramètres linéaires [13].

Ce comportement pourrait donc être mis à profit pour la détection et le dimensionnement de l'état de fissuration du béton.

4.1 Principe

Les observations faites dans les roches dans les années 90 montrent que dans les matériaux fortement hétérogènes et micro-fissurés apparaissent des phénomènes non-linéaires, tels l'hystérésis, la mémoire discrète ainsi que les dynamiques lentes et rapides [14]. Ceci se traduit par une dépendance du comportement du matériau à la dynamique

de déformation et donc à la modification de la loi de Hooke (équations (1) et (2)).

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = K_0 \left(1 + \beta \varepsilon + \delta^2 \varepsilon + \dots + \alpha \left(\varepsilon, \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \right) \quad (1)$$

Avec

$$\alpha \left(\varepsilon, \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) = \alpha \left(\Delta \varepsilon + \text{sign} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \varepsilon \right) \quad (2)$$

β et δ étant les paramètres non linéaires classiques et représentant l'évolution du module du matériau avec l'état de déformation aux ordres 1 et 2 respectivement.

Le paramètre α est un paramètre phénoménologique introduit par les Guyer et al. [14] pour rendre compte des observations citées précédemment. Il est nommé paramètre non linéaire hystérétique, et est propre au modèle non classique.

La détermination du paramètre non linéaire hystérétique s'effectue par l'interaction d'ondes dans le milieu à sonder. Cette méthode, dénommée Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS), fut introduite par Abeele et al. [15]. Une première onde, de basse fréquence et de haute amplitude permet d'exciter les sources de non linéarité, comme les fissures. Une seconde onde, de haute fréquence et de basse amplitude va sonder le milieu.

L'interaction de ces deux ondes va entraîner une modulation de la haute fréquence (HF) par la basse fréquence (BF) ainsi que la génération d'harmoniques comme indiqué dans la figure 5

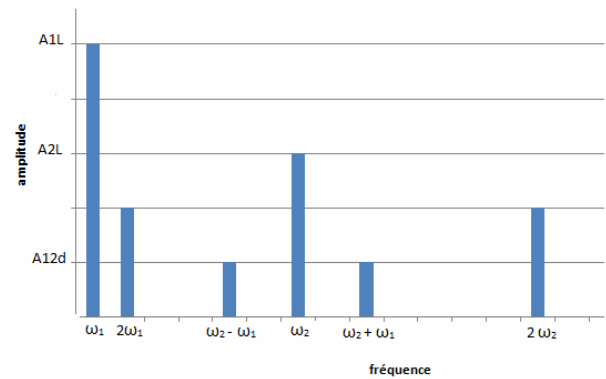


Figure 5 : diagramme de Fourier en interaction d'ondes non linéaires

La détermination du paramètre hystérétique est alors possible par des considérations énergétiques. Il est proportionnel au rapport des énergies des bandes latérales (BL) de la haute fréquence sur le produit des énergies émises (hautes et basses fréquences, respectivement HF et BF).

$$\alpha \propto \frac{\int BL}{\int BF \times \int HF} \quad (3)$$

4.2 Expérimentation

Le protocole expérimental reprend l'utilisation des éprouvettes décrites précédemment. Les échantillons sont placés sur des appuis parallèles, la fissure étant centrée par rapport à ces derniers, avec la partie ouverte dirigée vers le bas.

La haute fréquence est assurée par un générateur de fonction arbitraire (EPA ARB 1410) à 48kHz.

La réception est effectuée par un accéléromètre haute fréquence (B&K 8339) via un conditionneur de signaux (B&K 4416B) et relié à un convertisseur analogique numérique 12 bits (Picoscope 4424).

Le générateur, ainsi que le récepteur, sont placés de part et d'autre de la fissure, afin de s'assurer de l'interaction avec cette dernière de l'onde haute fréquence avant la mesure par l'accéléromètre (figure 6).

La génération de la basse fréquence est assurée par la chute d'une bille d'acier de 66g dans l'axe de la fissure. Cette fréquence, de l'ordre de 1,5kHz, permet d'activer la non linéarité de la fissure par la mise en mouvement de cette dernière. En effet, cette fréquence correspond au premier mode de flexion, pour cette géométrie d'éprouvette. Pour chaque éprouvette, la bille est lâchée de sept hauteurs différentes, permettant ainsi de modifier l'amplitude de l'onde transmise. Cette manipulation est répétée pour chacune des éprouvettes.

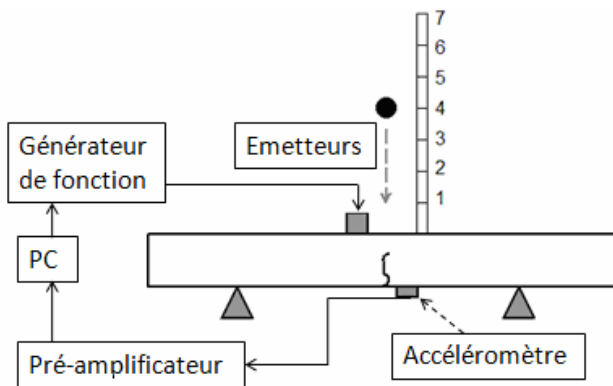


Figure 6 : montage expérimental NWMS

Les signaux acquis nous permettent enfin de déterminer la valeur du paramètre α , qui est la pente de la droite

$$\int BL = \alpha \left(\int BF \times \int HF \right) \quad (4)$$

4.3 Résultats

L'évolution du paramètre hystérétique α en fonction de la profondeur de la fissure est présenté en figure 7.

Il est alors possible de constater une nette influence de la profondeur de la fissure sur le paramètre non linéaire. Sur cette même figure (7), nous présentons également l'évolution d'un paramètre linéaire qui est la fréquence de résonance à faible amplitude correspondant au premier mode de flexion à titre de comparaison. La sensibilité du paramètre non linéaire à la profondeur de fissure est mise en évidence, alors que le paramètre linéaire y reste insensible.

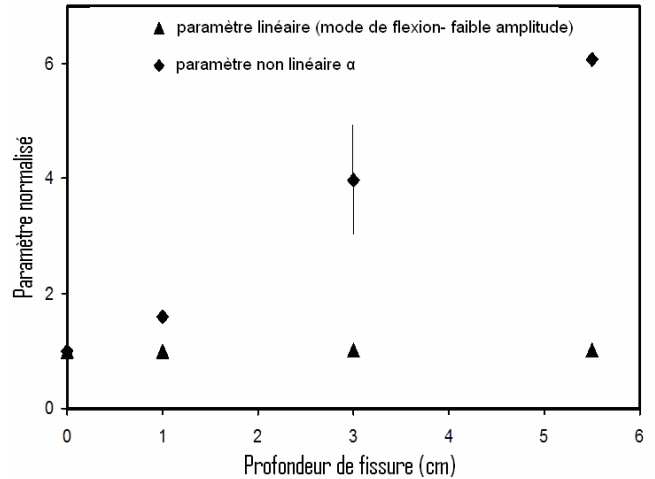


Figure 7 : évolution des paramètres linéaire et non linéaire en fonction de la dimension de la fissure

Une étude de répétabilité sur l'éprouvette entaillée et fissurée à trois centimètres montre par ailleurs un coefficient de variation de 23% sur la valeur du paramètre non linéaire.

Une prochaine étude sera par la suite consacrée à une détermination du paramétrage de cette technique, tant d'un point de vue expérimental que du traitement du signal.

5 Conclusion

L'étude a porté sur les potentialités des méthodes linéaires et non linéaires avec un objectif à long terme de conduire à une caractérisation in situ de fissure « fermée », débouchant en surface du béton.

Pour les méthodes linéaires, il a été montré qu'une auscultation par ondes de surface est possible pour des fréquences de l'ordre de 100kHz. Cependant elle ne permet pas de conclure quant à la détection et la caractérisation de fissure fermée. Une étude à plus haute fréquence est en cours pour juger du potentiel des méthodes linéaires au contact et de l'influence de l'ouverture de la fissure sur la réponse ultrasonore.

La méthode non linéaire NWMS a montré un fort potentiel de caractérisation de fissures qui peuvent être fermées. Une attention particulière sera portée sur l'amélioration du dispositif de mesure afin de réduire les incertitudes.

Une étude sur d'autres techniques est en cours afin de coupler les méthodes linéaires et non linéaires pour l'auscultation de grandes structures. L'ensemble de ces approches devant en effet permettre de conduire à terme à un procédé d'inspection des ouvrages de génie civil in situ.

Références

- [1] Al Wardany R., Rhazi J., Ballivy G., Gallias J.L., et Saleh K., "Use of Rayleigh Wave Methods to Detect Near Surface Concrete Damage," *16th WCNDT*, 2004.
- [2] Ramamoorthy S.K., Kane Y., et Turner J.A., "Ultrasound diffusion for crack depth determination

in concrete,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115, 523 (2004)

- [3] Song W., Popovics J., Aldrin J., et Shah S., “Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113, 717-725 (2003).
- [4] Hévin G., Abraham O., Pedersen H.A., et Campillo M., “Characterization of surface cracks with Rayleigh waves: a numerical model,” *NDT & E International*, 31, 289-297 (1998).
- [5] Aggelis D., Shiotani T., et Polyzos D., “Characterization of surface crack depth and repair evaluation using Rayleigh waves,” *Cement and Concrete Composites*, 31, 77-83 (2009).
- [6] Lin Y., Chang C., Kuo S., et Liou H., “A simple device for detecting impact time in impact-echo testing of concrete,” *NDT & E International*, 37, 1-8 (2004).
- [7] Liou T., Hsiao C., Cheng C., et Chang N., “Depth measurement of notches as models for shallow cracks in concrete,” *NDT & E International*, 42, 69-76 (2009).
- [8] Goueygou M. et Piwakowski B., “Radiation of surface waves into concrete by means of a wedge transducer: design and optimization,” 2004.
- [9] Piwakowski B., Fnine A., Goueygou M., et Buyle-Bodin F., “Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples”, *Ultrasonics*, 42, 395-402 (2004).
- [10] Payan C., “Caractérisation non destructive du béton: étude du potentiel de l'acoustique non linéaire”, LCND, Université de la Méditerranée, 2007.
- [11] Muller M., Sutin A., Guyer R., Talmant M., Laugier P., et Johnson P.A., “Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy (NRUS) applied to damage assessment in bone,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118, 3946-3952 (2005).
- [12] Johnson P. et Sutin A., “Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117, 124-130 (2005).
- [13] Payan C., Garnier V., Moysan J., et Johnson P.A., “Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete,” *Journal of the Acoustical Society of America*, 121, 125-130 (2007).
- [14] Guyer R.A., TenCate J., et Johnson P., “Hysteresis and the dynamic elasticity of consolidated granular materials,” *Physical review letters*, 82, 3280-3283 (1999).
- [15] Van Den Abeele K.E., Sutin A., Carmeliet J., et Johnson P.A., “Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS),” *NDT & E International*, 34, 239-248 (2001).