

Introduction

L'essai sonique (ASTM C597) est l'un des principaux essais acoustiques utilisé pour le contrôle de l'état du béton. Cela consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le béton et à estimer son module élastique et sa résistance à la compression à partir de cette mesure. Les amplitudes des ondes générées dans le béton lors de cet essai sont considérées comme très faibles ($\sim 1 \mu\text{m}$). Ainsi, ces ondes ne modifient pas les propriétés élastiques des matériaux lors de leur propagation. On assume que la réponse du milieu à ces faibles sollicitations acoustiques varie proportionnellement à l'amplitude de la source excitatrice, et que la fréquence de l'onde est conservée durant la propagation. Dans ces conditions, la propagation des ondes ultrasonores dans le béton est considérée comme linéaire. L'essai sonique fait partie des techniques de l'acoustique linéaire ainsi que l'essai de résonance (ASTM C215) et l'essai d'impact-écho (ASTM C1383).

L'acoustique non linéaire [Réf. 1]

Dans un certain nombre de situations, l'hypothèse de linéarité n'est plus satisfaite, soit parce que l'amplitude de l'onde générée est trop élevée et provoque l'ouverture et la fermeture des microfissures, soit parce que la réponse du milieu est non linéaire, soit pour ces deux raisons simultanément. Les caractéristiques des ondes en un point dépendront alors de l'amplitude de la source d'émission. Ce type de comportement est constaté dans le béton et dans tout autre matériau solide ou liquide.

Le comportement acoustique non linéaire des matériaux est couramment décrit par l'ajout d'un paramètre de non linéarité β dans la loi de Hooke qui s'écrit alors sous la forme : $\sigma = E\varepsilon(1+\beta\varepsilon)$, σ et ε sont respectivement la contrainte et la déformation, E est le module de Young. Le paramètre non linéaire β est égal à 0 dans le cas où le matériau est sain et homogène.

NUMÉRO 23 Les techniques de l'acoustique non linéaire – Partie 1 Septembre 2019

De multiples techniques de mesure, d'analyse et de traitement du signal exploitant la non-linéarité ont été développées pour l'évaluation de l'état des matériaux. Elles constituent les techniques de l'acoustique non-linéaire et englobent principalement les techniques connues sous les appellations suivantes : (a) la résonance non linéaire, (b) l'émission d'harmoniques, (c) le saut temporel et (d) la dynamique lente. Les tests réalisés sur une large gamme de bétons soumis à des régimes de dégradations divers (ex. réaction alcalis-granulats, gel-dégel, feu) ont montré que la sensibilité de ces méthodes non linéaires vis-à-vis la détection de l'endommagement à l'échelle microscopique (initiation du processus d'endommagement) est nettement supérieure à celle obtenue avec les méthodes de l'acoustique linéaire (ex. mesure de la vitesse de propagation et de l'atténuation des ondes ultrasonores). Le succès de ces méthodes s'explique par le fait que la dégradation interne d'un matériau peut être directement mesurée par une augmentation des paramètres liés aux effets non linéaires (ex. paramètre β).

Le présent bulletin présente les techniques de la résonance non linéaire et de l'émission d'harmoniques. Les techniques du saut temporel et de la dynamique lente seront présentées dans le bulletin Nro 22.

La méthode de résonance non linéaire

Par définition, la résonance est l'augmentation de l'amplitude de vibration d'un matériau lorsque celui-ci est excité au voisinage de l'une de ses fréquences naturelles de vibration. Un des phénomènes non linéaires observables dans les matériaux endommagés est la baisse de la valeur de cette fréquence de résonance (RNL) en fonction de l'amplitude des excitations acoustiques. Cet effet montré sur la figure 1a est appelé "*softening*" ou "*dynamique rapide*". La sensibilité élevée de la méthode de la RNL vis-à-vis la dégradation du béton est illustrée à la figure 1b [Réf. 2]. Cette

NUMÉRO 23 Les techniques de l'acoustique non linéaire – Partie 1 Septembre 2019

figure compare la variation du paramètre de non-linéarité α à celle de la vitesse de propagation des ultrasons dans un béton soumis à des températures élevées. Le paramètre de non-linéarité élastique α est estimées par la relation suivante entre le décalage fréquentiel $(f_0 - f)/f_0$ et l'amplitude $\Delta\varepsilon$ mesurée à la résonance [Réf. 2] :

$$\frac{f_0 - f}{f_0} = \alpha \Delta\varepsilon$$

f_0 est la fréquence de résonance linéaire (fréquence de résonance correspondant aux faibles amplitudes) et f est la fréquence de résonance mesurée aux fortes amplitudes $\Delta\varepsilon$. On constate une baisse de la fréquence de résonance lorsque la température atteint 120 °C. Le paramètre de non-linéarité α déduit de la pente de la figure 1a varie 10 fois plus que la vitesse de propagation des ultrasons mesurée dans le même échantillon de béton [Réf. 2].

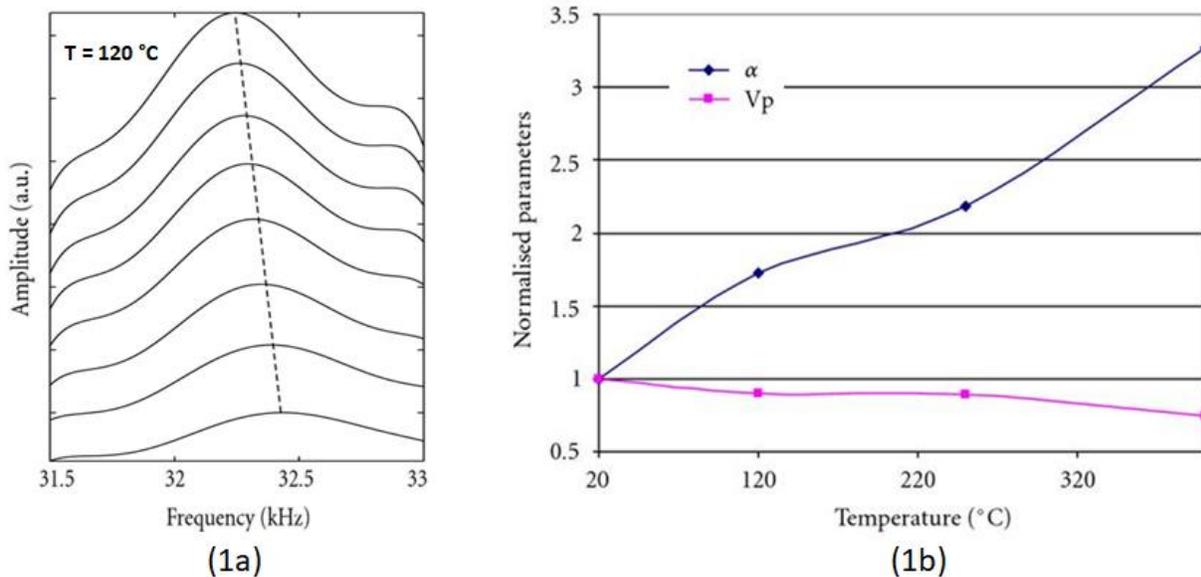


Figure 1 : Décalage fréquentiel (1a) et sensibilité du paramètre α à l'endommagement

La méthode de génération d'harmoniques

Lorsqu'un matériau ne présente pas d'hétérogénéité, les différentes zones excitées par une onde ultrasonore durant sa propagation vibrent à la même vitesse. L'onde ultrasonore ne subit alors aucune perturbation et sa forme demeure inchangée. Par contre, la présence d'hétérogénéité dans le milieu traversé est à l'origine d'une augmentation locale de la densité et du module durant la compression du milieu qui accompagne la propagation de l'onde et d'une diminution locale de la densité et du module durant la dilatation. Cela modifie la forme de l'onde et donc son contenu spectral. L'onde n'est plus sinusoïdale mais contient alors des harmoniques d'ordre supérieur (fréquences multiples de la fréquence fondamentale). Ce phénomène illustré à la figure 2 peut être utilisé comme moyen pour caractériser l'endommagement des matériaux.

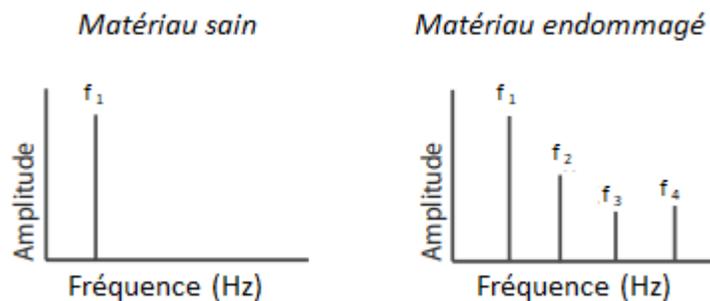


Figure 2 : Illustration de la génération d'harmonique.

L'indicateur d'endommagement généralement considéré est basé sur le coefficient de non-linéarité β défini comme suit :

$$\beta = \frac{8}{k^2 a} \frac{A_2}{A_1^2}$$

Où k est le nombre d'onde, a est la distance de propagation de l'onde entre l'émetteur et le récepteur, A_1 et A_2 sont les amplitudes du mode de vibration fondamental et de la 2ème harmonique respectivement.

La Figure 3 illustre la détection au moyen de cette procédure des dommages dans le béton causés par la réaction alcalis-granulats (RAG). Elle indique clairement que l'indicateur d'endommagement (β) augmente en fonction du temps au fur et à mesure de l'augmentation des dommages causés par la RAG

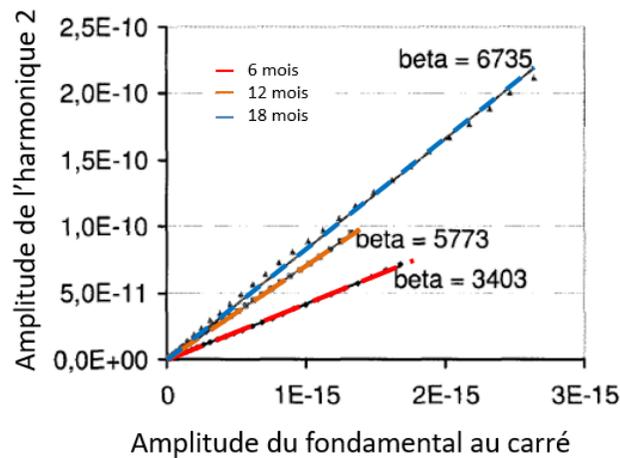


Figure 3 : Sensibilité de la génération d'harmonique aux dommages causés par la RAG [Réf. 3]

Références

1. Leif Bjørnø, *Introduction to nonlinear acoustics*. International Congress on Ultrasonics, Universidad de Santiago de Chile, January 2009
2. Abid Ali Shah, Yuri Ribakov. *Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation*. *Materials and Design* 30(10):2009
3. Kodjo S. *Contribution à l'étude des bétons endommagés par les techniques de l'acoustique non linéaire. Application à la RAG*. Thèse de doctorat, UdeS (2008)