

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Localisation d'un petit changement en milieu multiplement diffusant (LOCADIFF):

Application à la localisation d'un défaut millimétrique dans le béton

Eric Larose¹, Vincent Rossetto², Ludovic Margerin³

¹Lab. de Géophysique Interne et Tectonophysique, CNRS & Univ. J. Fourier, BP 53, 38041 GRENOBLE Cedex 9. Eric.Larose@ujf-grenoble.fr

²Lab. de Physique et Modélisation des Milieux Condensés, CNRS & Univ. J. Fourier, BP 166, 38042 GRENOBLE Cedex 9.

³Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, CNRS & Univ. Aix Marseille Europôle Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix en Provence.

Nous présentons une technique d'imagerie qui permet de localiser une petite perturbation apparue dans un environnement multiplement diffusant. Cette technique se base sur une formulation directe de la décorrélation spatio-temporelle de la coda diffuse induite par l'apparition d'un diffuseur supplémentaire (le défaut à imager). La localisation du défaut, qui constitue le problème inverse à résoudre, est obtenue par une approche de maximum de vraisemblance. La technique LOCADIFF est appliquée à la localisation expérimentale d'un défaut millimétrique dans le béton par des ondes ultrasonores. Dans le domaine de fréquence 100-500 kHz, la précision obtenue est centimétrique. Nous démontrons la robustesse de la technique vis-à-vis des incertitudes de mesure.

1 Introduction

Les structures en béton ont une durée de vie qui parfois est très inférieure à 100 ans. Ainsi, de nombreuses structures en Europe, aux Etats-Unis, mais aussi partout dans le monde, risquent d'arriver en fin de vie sans que toute fois il soit possible de connaître leur état réel, faute de solution de diagnostic fiable et non destructive. Ces structures étant partout présentes, l'enjeu sociétal est considérable. Cela pose d'une part la question de la sécurité pour les usagers, en particulier pour les infrastructures de transport ou de production d'énergie. Cela pose d'autre part la question de l'optimisation des investissements, souvent public, dans ces structures qu'il faut choisir de démolir ou de réparer au bon moment. Le but de la technique décrite ici est de proposer un outil d'aide à la décision dans le domaine de la gestion durable des infrastructures en béton. Dans la section 2, nous rappelons les limites des techniques ultrasonores de contrôle non-destructif des bétons et détaillons le problème que pose la présence diffusion multiple dans ce matériau multi-composite. Dans la section 3, nous démontrons que la coda ultrasonore est ultra-sensible à l'apparition de défaut, et proposons un modèle théorique pour quantifier l'effet de l'apparition d'un défaut sur la décorrélation des formes d'onde. Dans la section 4, nous présentons le principe de localisation de la technique LOCADIFF, et la validons sur un exemple synthétique issu de simulations numériques 2D. Dans la section 5, la technique est appliquée à une expérience réelle sur un bloc de béton de taille métrique. La section 6 résume les différents avantages de cette technique.

2 Le problème de la diffusion multiple des ultrasons dans les bétons

2.1 Etat de l'art

Toutes les méthodes ultrasonores (acoustiques ou élastiques) pour le contrôle des bétons butent actuellement sur l'un, l'autre ou les deux verrous suivants [1-6] :

- En dessous de 50 kHz (ultrasons basse fréquence), les techniques d'imagerie classique s'appliquent bien (régime de diffusion simple), mais elles ne détectent que des défauts de taille importante (taille liée à la longueur d'onde de plusieurs centimètres). Cette taille de défaut détectable est souvent supérieure à la taille critique des défauts pour la maintenance préventive de la structure. Si ce défaut est plus petit, il n'est pas détecté.

- Au-delà de 50 kHz, les ultrasons subissent de multiples diffusions liées à la présence du granulat constitutif de la plupart des bétons [7-11]. Dans ce régime, les défauts de plus petite taille (mm) deviennent détectables. En effet, en régime de diffusion multiple, les ultrasons sont beaucoup plus sensibles à des petits défauts car ils interagissent plusieurs fois avec eux. Par contre, compte tenu de la complexité des trajets effectués dans ce régime, il devient impossible de localiser ces défauts.

La technique LOCADIFF présentée ici tire partie de la diffusion multiple des ultrasons dans le béton pour améliorer la sensibilité de détection, tout en permettant la localisation du défaut apparu. Elle permet donc d'améliorer le diagnostic d'un ordre de grandeur en sensibilité (seuil de détection du défaut) mais aussi en résolution (précision spatiale sur la localisation).

2.2 Illustration numérique du problème de la localisation en diffusion multiple

Dans la simulation numérique suivante, une série de sources (croix rouges numérotées 1 à 10 sur la fig. 1) émettent une impulsion brève (deux arches de sinusoïde). L'impulsion se propage dans le milieu, est éventuellement réfléchi par les perturbations, puis est enregistrée sur une série de capteurs (croix noires, numérotées 1 à 9). Nous plaçons dans ce milieu acoustique 2D 800 diffuseurs aléatoirement répartis. Les diffuseurs sont des diffuseurs forts au sens de leur section de diffusion par rapport à la longueur d'onde : $\sigma/\lambda = 1.1$. Le libre parcours moyen de transport, c'est-à-dire la distance au-delà de laquelle

l'onde incidente a perdu la mémoire de sa direction initiale, est : $\ell^*/\lambda = 2.8$. Cela signifie qu'entre chaque source S et chaque capteur R , l'onde est multiplement diffusée. La configuration géométrique de l'expérience numérique est présentée fig. 1. Les unités sont adimensionnées : les longueurs sont normalisées par la longueur d'onde centrale λ , les temps par la période centrale T , et la vitesse moyenne dans le milieu est $c=1$.

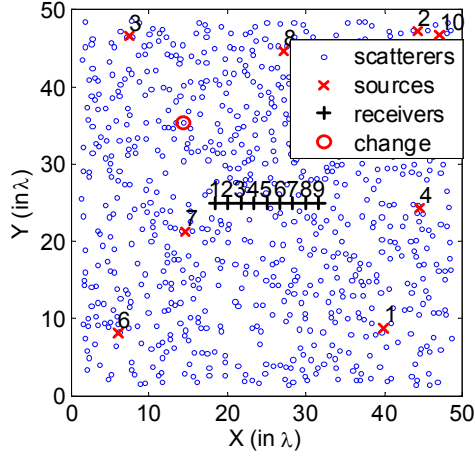


Figure 1 : Simulation numérique de la propagation d'une onde acoustique dans un milieu 2D multiplement diffusant. Parmi 800 diffuseurs, seul le diffuseur entouré en rouge est rajouté au milieu entre deux séries d'acquisitions.

Une première série de simulations numériques fournit une collection de 10×9 réponses impulsionnelles $h_0(R, S, t)$. Ces réponses impulsionnelles ont les caractéristiques suivantes : 1) L'onde directe, la première arrivée, est très fortement atténuée par la diffusion dans le milieu. 2) La diffusion engendre un train d'onde très long qui caractérise la « coda » ultrasonore, constituée d'ondes multiplement diffusées par les hétérogénéités du milieu. Cette coda constitue l'empreinte ultrasonore du milieu.

Ensuite, un petit changement est opéré dans le milieu au moyen de l'ajout d'un diffuseur isolé, dont la position est entourée en rouge sur la fig. 1. Une nouvelle série de simulations numériques est réalisée, les réponses impulsionnelles sont maintenant notées $h_1(R, S, t)$. Nous analysons ensuite la différence entre les deux séries de réponses impulsionnelles :

$$d(R, S, t) = h_0(R, S, t) - h_1(R, S, t) \quad (1)$$

Le principe d'imagerie du petit changement consiste à attribuer à chaque pixel (x, y) une valeur proportionnelle à l'intensité rétrodiffusée par ce point par la différence des signaux. Pour chaque couple, cette intensité s'écrit :

$$I(x, y) = \left(\sum_{R, S} d(R, S, \tau = \Delta / c) \right)^2 \quad (2)$$

Avec c la vitesse de l'onde, et Δ la distance source-diffuseur-récepteur :

$$\Delta = |R - x| + |x - S| \quad (3)$$

C'est la technique standard à la base de la plus part des techniques d'imagerie conventionnelles (échographie médicale, imagerie sismique, contrôle non destructif...). L'image I qui résulte de ce traitement est présentée fig. 2. Sur cette image, nous obtenons un ensemble de tache aléatoirement réparties, qui correspondent à des

interférences aléatoires de chemins de diffusion multiple (tavelures). Comme nous pouvons le voir, la zone encadrée (zoom) ne présente pas de réflectivité particulière, malgré la présence du diffuseur rajouté. Cela montre que cette technique d'imagerie, comme la plupart des techniques conventionnelles basées sur l'approximation de Born, n'est pas opérationnelle en milieu très hétérogène et multiplement diffusant. Il est donc nécessaire de développer une autre technique pour détecter, et éventuellement localiser le défaut. C'est ce qui est présenté dans les sections suivantes.

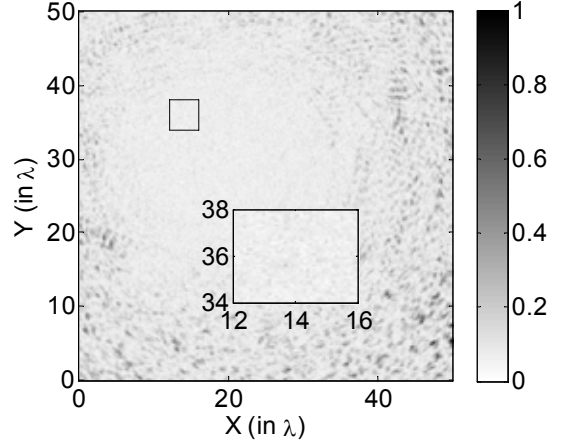


Figure 2 : Tentative de localisation du défaut par rétropropagation de la différence du champ d'onde acquis avant et après l'ajout d'un diffuseur.

L'approximation de diffusion simple n'étant pas valide, la localisation du défaut est impossible.

3 Détection de l'apparition d'un défaut par la coda ultrasonore

3.1 Mise en évidence en simulation numérique

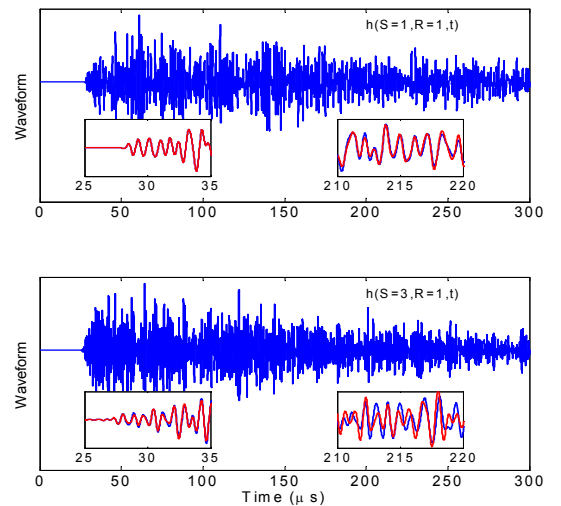


Figure 3 : Deux exemples typiques d'enregistrements de réponses impulsionnelles. Les ultrasons sont fortement diffusés par les hétérogénéités, il en résulte un enregistrement long et complexe, dont l'enveloppe est bien décrite par l'équation de diffusion. Insert : zoom sur les premières arrivées, qui ne sont quasiment pas perturbées par l'ajout d'un diffuseur. Par contre, plus

tard dans l'enregistrement, les formes d'ondes sont légèrement changées.

Sur la fig. 3, nous superposons les réponses impulsionnelles acquises avant et après l'ajout d'un défaut. Il s'agit d'enregistrements reçus sur le capteur numéro 1, provenant respectivement de la source 1 et 3. Dans les quatre graphiques insérés, la forme d'onde de couleur bleue correspond à l'enregistrement *avant* l'addition du diffuseur supplémentaire, et la forme d'onde rouge à l'enregistrement *après*. Nous pouvons constater que :

- Le début du signal n'est quasiment pas sensible à la perturbation engendrée par le déplacement du diffuseur mobile (par exemple, zoom entre les temps 25 et 35).

- La fin de la coda est beaucoup plus sensible à cette petite perturbation (par exemple, zoom entre les temps 210 et 220).

$$\langle h_0(S, R, t) h_1(S, R, t) \rangle = g(S, R, t) - c\sigma \int_0^t g(S, x, u) g(x, R, t - u) du \quad (4)$$

où σ est la section de diffusion du diffuseur, c la vitesse de l'onde dans le milieu, et $g(S, R, t)$ la probabilité de transport de l'onde ultrasonore de la source S au capteur R au bout d'un temps t . La fonction g peut aussi être vue comme la fonction de distribution des temps de vols, ou encore comme l'intensité moyenne transmise de R à S en un temps t . Si l'on renormalise la fonction de corrélation par l'énergie totale transmise, c'est-à-dire que l'on calcule le coefficient de corrélation entre les formes d'onde, nous obtenons :

$$\left\langle \frac{h_0(S, R, t) h_1(S, R, t)}{\sqrt{h_0^2(S, R, t) h_1^2(S, R, t)}} \right\rangle = 1 - c\sigma \int_0^t \frac{g(S, x, u) g(x, R, t - u) du}{g(S, R, t)} = 1 - K(S, R, x, t) \quad (5)$$

où $K(S, R, x, t)$ est le coefficient de décorrélation des formes d'ondes observé lorsqu'un changement est introduit en x . Il est nul si les formes d'onde sont identiques (pas de changement), et tend vers 1 si le changement est fort. C'est ce coefficient qui est mesuré expérimentalement. C'est la dépendance spatiale de ce coefficient K , en fonction de la positions des capteurs vis-à-vis du défaut va permettre de le localiser.

4 Principe de l'inversion et de la localisation

4.1 La fonction d'exploration

La fonction d'exploration est la probabilité pour qu'une onde partie de S et arrivée en R au bout d'un temps t soit passée au moins une fois par le point x .

$$G(S, x, R, t) dx = \int_0^t \frac{g(S, x, u) g(x, R, t - u)}{g(S, R, t)} du \quad (6)$$

Il est possible d'évaluer numériquement cette intégrale, en faisant par exemple l'approximation de la diffusion, c'est-à-dire en remplaçant $g(S, R, t)$ par la solution de l'équation de diffusion. Dans un milieu infini, nous avons par exemple :

$$g(S, R, t) dx = \frac{1}{(4Dt)^{3/2}} e^{-\frac{|S-R|^2}{4Dt}} \quad (7)$$

- La force de la distorsion de la forme d'onde induite par l'apparition du défaut dépend de la position du défaut respectivement à la position de la source et du capteur.

Que la coda soit ultrasensible aux petites variations du milieu n'est pas nouveau, cette caractéristique a été exploitée dans de nombreux domaines, de la sismologie à l'optique [12-15]. Par contre, la dépendance spatiale de la décorrélacion a été assez peu étudiée. C'est précisément cette dépendance spatiale que nous allons exploiter par la suite pour localiser l'apparition du défaut.

3.2 Modélisation du problème directe

Il est possible, à partir de travaux théoriques sur la diffusion multiple, et notamment en utilisant une approche diagrammatique [16-17], de montrer que la décorrélacion du champ d'onde induite par l'addition d'un diffuseur s'écrit sous la forme :

4.2 Inversion et localisation

La première étape de l'inversion consiste à découper le volume étudié en voxel. En chaque voxel x , nous allons évaluer la probabilité de présence du défaut. Pour cela nous calculons la fonction d'exploration $G(S, x, R, t)$ pour tous les couples source-capteurs pour un voxel donné en x . Dans une deuxième étape, nous comparons l'ensemble des données expérimentales $K(S, R, t)$ à cette fonction d'exploration théorique. Cette comparaison peut se faire de deux manières. La première est une approche par maximum de vraisemblance [18] :

$$\chi_n^2(x) = \frac{1}{N} \sum_{S, R} \left(\frac{G(S, x, R, t) - K(S, R, t)}{\varepsilon} \right)^2 \quad (8)$$

où N est le nombre de degré de libertés, et ε l'erreur estimée sur la mesure des coefficients de décorrélacion expérimentaux. $\chi_n^2(x)$ est donc plus petit que 1 là où le défaut est très probable, et plus grand que 1 là où le défaut est très improbable. La deuxième approche est une approche probabiliste qui décrit la distribution de densité de probabilité d'apparition du défaut :

$$p(x) = \frac{e^{-\chi_n^2(x)}}{\int e^{-\chi_n^2(x)} dx} \quad (9)$$

Une carte de densité de probabilité est présentée Fig. 4 appliquée à la simulation numérique présentée plus haut montre que nous sommes capables de relocaliser parfaitement la position du défaut.

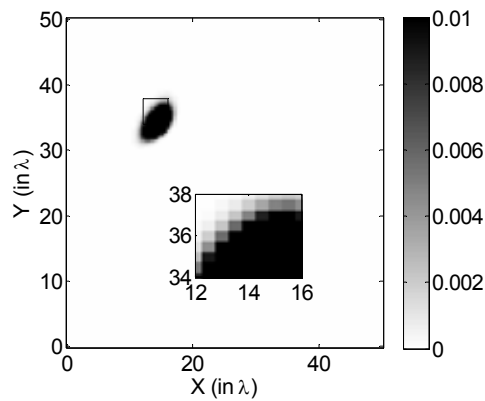


Figure 4 : carte de densité de probabilité d'apparition de défaut obtenue pour la simulation numérique. La tache noire correspond à la densité de probabilité de présence du défaut. Cette tache est plus large que la taille effective du défaut, mais elle est très bien localisée dans l'espace.

5 Application à la localisation d'un défaut millimétrique dans le béton

5.1 Protocol expérimental

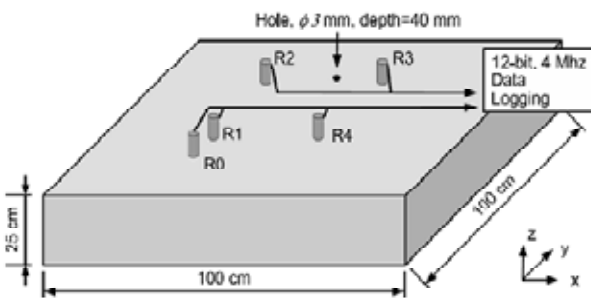


Figure 5 : Montage expérimental sur un bloc de béton de 600 kg. L'objectif est de retrouver la position d'un trou de 3 mm de diamètre percé dans le bloc.

Un bloc de béton de 600 kg, de dimension 100 cm x 100 cm x 25 cm, est équipé de 5 transducteurs piézoélectriques sur sa face supérieure (cf Fig. 8). Les transducteurs émettent une impulsion entre 100 kHz et 500 kHz. L'ensemble des réponses impulsionnelles entre tous les transducteurs est acquise à plusieurs dates, chaque transducteur pouvant être opéré successivement comme source ou comme détecteur. Cela donne à chaque date un ensemble de $5 \times 4 = 20$ réponses impulsionnelles $h(S, R, t)$. Un exemple de réponse impulsionnelle est présenté Fig. 6.

Entre deux dates d'acquisition, un trou de 3 mm de diamètre et 4 cm de profondeur est percé dans le béton. Le coefficient de décorrélation entre les enregistrements aux deux dates est ensuite calculé, pour chaque couple source-capteur possible. L'ensemble de ces données expérimentales est ensuite inversé suivant la procédure présentée en section 4.

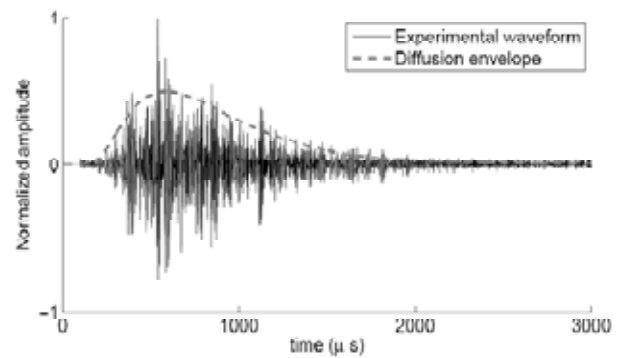


Figure 6 : Exemple de réponse impulsionnelle dans le béton, autour de 200 kHz. L'enveloppe des signaux est bien décrite par l'équation de la diffusion.

5.2 Résultats

Une carte de maximum de vraisemblance est présentée Fig. 7. Sur cette figure, les parties en noire correspondent à un $\chi_n^2 > 10$, elles correspondent aux régions où la présence du défaut est le plus improbable. Elles correspondent aussi aux régions de collage des capteurs, là où la détection est la plus sensible. La région incluse dans la ligne de niveau $\chi_n^2 = 1$ est la zone où l'apparition du défaut est la plus probable. Cette dernière inclue effectivement la position réelle du trou percé dans le béton, ce qui démontre l'applicabilité de la technique LOCADIFF.

6 Conclusion et perspectives

La technique présentée dans ce document est basée sur une analyse fine de la coda ultrasonore, acquise à différentes dates, sur une structure en béton. En inversant les coefficients de décorrélation des coda, il est possible de relocaliser un défaut entre deux dates d'enregistrements. Sur un bloc de béton excité par des ultrasons autour de 200 kHz, nous montrons que nous pouvons localiser l'apparition d'un défaut avec une sensibilité de quelques millimètres (taille du défaut) et avec une résolution de quelques centimètres (taille de la tache de localisation). Des expériences complémentaires et des études numériques ont été menées et permettent de confirmer ces observations. Nous montrons aussi qu'il est possible de détecter l'apparition d'un trou de l'autre côté du bloc (surface sans capteur), et que cette technique est donc totalement 3D.

La technique LOCADIFF présente les avantages suivants :

- Pas de contrainte environnementale lors de la mise en œuvre, procédé durable.
- Les ondes ultrasonores sont directement sensibles aux paramètres mécaniques du matériau (ce qui n'est pas le cas des méthodes radiotomographie X, électrique, etc...)
- Seuil de détection et de résolution inégalée par les autres techniques *in situ* connues.
- Pas d'endommagement de la structure étudiée.

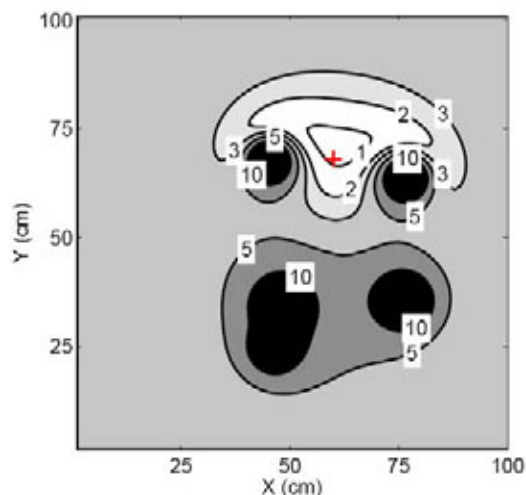


Figure 7 : carte de maximum de vraisemblance χ_n^2 , en ligne de niveau. La position réelle du défaut, repérée par une croix rouge, est incluse dans la zone prévue par LOCADIFF, c'est-à-dire la région où $\chi_n^2 < 1$

La technique LOCADIFF a fait l'objet d'un dépôt de brevet CNRS [19], et est actuellement en phase de transfert de technologie. L'application principale visée est la détection précoce et la localisation d'apparition de fissure dans les structures en béton du génie civil : enceinte de confinement de réacteurs nucléaires, ponts, grandes structures accueillant du public... Mais le concept présenté ici est aussi valide pour d'autres types d'ondes dans d'autres contextes : détection de défauts dans les matériaux composites par ultrasons MHz, détection de cible en mouvement par onde radar en ville ou en forêt, et plus généralement pour localiser un changement dans un milieu où les ondes sont fortement diffusées ou diffractées.

Remerciements

Ce programme de recherche est financé par le programme ANR « Jeune Chercheur » n°08_313906 *SISDIF*. Le soutien au développement et au transfert vers l'industrie est assuré par le CNRS et le consortium GRAVIT (<http://www.gravit-innovation.org/>).

Références

- [1] Y. Berthaud, "Damage measurements in concrete via an ultrasonic technique", *Cement and Concrete Research* 21, 73-82 (1991).
- [2] J. S. Popovics et J. L. Rose, "A survey of developments in ultrasonic NDE of concrete", *IEEE Trans. Ultr. Ferr. Freq. Cont.* 41, 140-143 (1994).
- [3] D. M. McCann et M.C. Forde, "Review of NDT methods in the assesment of concrete and mansonry structures", *NDT&E International* 34, 71-84 (2001).
- [4] C. Aubagnac, X. Dérobert et O. Abraham, « Evaluation de différentes méthodes d'auscultation non destructives avant autopsie d'un élément de poutre du Pont Neuf de Foix », *Bull. Lab. Ponts Chauss* 241, 85-97 (2002).

- [5] O. Abraham et P. Cote, « Méthode impact-écho basse fréquence pour la détection de vide dans les gaines de précontrainte », *Bul. Lab. Ponts Chauss.* 239, 41-50 (2002).
- [6] K.L. Rens, C.L. Nogueira et D.J. Transue, "Bridge management and nondestructive evaluation", *J. Perform. Constr. Facil.* 11,58-64 (2005).
- [7] E. N. Landis et S. P. Shah, "Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials", *J. Eng. Mech.* 121, 737-743 (1995).
- [8] J. A. Turner et P. Anugonda, "Scattering of elastic waves in heterogeneous media with local isotropy", *J. Acoust. Soc. Am.* 109, 1787-1795 (2001).
- [9] P. Anugonda, J. S. Wiehn et J. A. Turner, "Diffusion of ultrasound in concrete", *Ultrasonics* 39, 429-435(2001).
- [10] J. Becker, L. J. Jacobs et J. Qu, "Characterization of cement-based materials using diffuse ultrasound", *J. Eng. Mec.* 129, 1478-1484 (2003).
- [11] T. P. Philippidis et D. G. Aggelis, "Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete", *Ultrasonics* 43, 584—595 (2005).
- [12] G. Poupinet, W. L. Ellsworth et J. Frechet, "Monitoring Velocity Variations in the Crust Using Earthquake Doublets: an Application to the Calaveras Fault, California", *J. Geophys. Res.* 89, 5719 (1984).
- [13] R. L. Weaver et O. I. Lobkis, "Temperature Dependence of Diffuse Field Phase", *Ultrasonics* 38, 491 (2000).
- [14] R. Snieder, A. Grêt, H. Douma, et J. Scales, "Coda Wave Interferometry for Estimating Nonlinear Behavior in Seismic Velocity", *Science* 295, 2253 (2002).
- [15] E. Larose, J. De Rosny, L. Margerin, D. Anache, P. Gouédard, M. Campillo, et B. Van Tiggelen, "Observation of multiple scattering of kHz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes", *Phys. Rev. E* 73 016609 (2006).
- [16] T. M. Nieuwenhuizen et M. C. W. van Rossum, *Physics Letters A* 177, 102 (1993).
- [17] M. C. W. van Rossum et T. M. Nieuwenhuizen, "Multiple scattering of classical waves: microscopy, mesoscopy, and diffusion", *Rev. Mod. Phys.* 71, 313 (1999).
- [18] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, et B. P. Flannery, "Numerical Recipes in C", Cambridge University Press, Cambridge, (1992).
- [19] Brevet FR09-50612 déposé le 30 janvier 2009, et étendu aux États-Unis et à l'Europe.