

Méthode impact-écho basse fréquence pour la détection de vide dans les gaines de précontrainte

Odile ABRAHAM
Philippe CÔTE

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Un des problèmes majeurs des ouvrages d'art est la détection de vide dans les gaines de précontrainte. Les méthodes couramment utilisées pour leur détection sont la radiographie X et la gammagraphie. Ces techniques requièrent malheureusement des zones de protection étendues contre les radiations.

Depuis la fin des années 80, la méthode impact-écho est aussi proposée. Deux indicateurs de présence de vide sont décrits dans la littérature : le changement de la fréquence de résonance liée à la gaine elle-même quand elle présente un vide, et le décalage vers le bas de la fréquence caractéristique de l'épaisseur de la dalle. Ce dernier indicateur sert plutôt à confirmer le diagnostic qu'à le poser.

L'objectif de ce travail est de déterminer dans quel cas le décalage de la fréquence de résonance caractéristique de l'épaisseur peut être utilisé comme indicateur principal de vide dans les gaines de précontrainte.

Après une étude paramétrique fondée sur une modélisation numérique avec la méthode des éléments finis, une nouvelle procédure expérimentale est détaillée.

DOMAINE : Ouvrages d'art – Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

The detection of voids in grouted tendon ducts in concrete structures is of key importance to the civil engineer. The method commonly used for such detection is gamma- or X-ray radiography. These powerful techniques unfortunately have the disadvantage of requiring a large security zone for radiation protection.

Since the end of the 1980s, the impact-echo method, among other non-destructive testing methods, has also been proposed. Shifts in the frequencies associated with the duct depth and in the frequency associated with the slab thickness have been used as indicators of voids in ducts. Usually, the shift in the thickness frequency of the concrete slab thickness serves as a confirmation factor rather than a distinct diagnostic tool.

The objective of this paper is to study the relevance of a detection method based primarily on a shift in the slab thickness resonant frequency above partially empty tendon ducts. One advantage of this criterion, when it proves effective, is that both metal and plastic ducts lead to practically the same behavior.

Following a study of the parameters influencing the effectiveness of this criterion through an extensive finite element approach, a systematic experimental set-up is proposed to improve this detection method's range of application.

FIELD: Structural engineering - Engineering sciences.

Introduction

La méthode impact-écho a été développée au National Institute of Standards (États-Unis) et à l'université Cornell (États-Unis) au milieu des années 1980 [1-3]. Cette méthode repose sur l'analyse fréquentielle de la réponse d'une structure soumise à un choc. La méthode impact-écho est bien adaptée à la mesure d'épaisseur de dalles et à la recherche de délaminages ou, plus généralement, à la détection de contrastes d'impédance mécanique*.

En ce qui concerne la détection de vide dans les gaines de précontraintes, un des problèmes majeurs du génie civil [4], la principale conclusion des travaux numériques et expérimentaux menés à l'université Cornell [5-8] est que la technique ne peut pas être appliquée dans tous les cas (par exemple quand les gaines sont trop proches ou quand les vides sont trop petits). Des vides de dimension inférieure au tiers de leur profondeur restent invisibles. Une autre limite est la nécessité de localiser pré-

* L'impédance mécanique Z est définie par $Z = \rho v_p$ (ρ : masse volumique ; v_p : vitesse des ondes de compression).

cisement la gaine avant la mesure. Finalement, l'amplitude des réflexions sur la gaine est assez faible et l'interprétation des signaux est souvent complexe.

D'autres études [9,10] concluent que des vides de dimension supérieure à la longueur d'onde divisée par 2,5 sont détectables. Le facteur déterminant est le choix de la source qui doit contenir de l'énergie dans un domaine fréquentiel proche de la fréquence recherchée [11]. Toutefois l'utilisation de fréquences élevées conduit à un amortissement rapide du signal utile [12].

Finalement, toutes les études numériques et expérimentales relèvent un décalage en fréquence de la fréquence caractéristique de l'épaisseur au-dessus d'un vide. De plus, si l'utilisation des réflexions sur la gaine est toujours décrite dans la littérature, beaucoup d'études s'accordent à dire que son suivi n'est pas évident.

Ces constatations nous ont conduits à réaliser une étude approfondie sur le décalage en fréquence de la fréquence caractéristique de l'épaisseur. Dans la première partie, les résultats d'une étude paramétrique fondée sur la méthode des éléments finis sont décrits. Des résultats expérimentaux sont ensuite présentés, de même qu'une procédure expérimentale.

Les résultats de cette étude sont généralisables à toutes les structures contenant des tubes localisés entre deux surfaces parallèles.

Principe de base de la méthode impact-écho

Un impact à la surface d'une dalle génère une onde de surface (Rayleigh), une onde de compression (P) et une onde de cisaillement (S) (fig. 1). Les ondes P et S se propagent à l'intérieur de la structure selon des fronts d'onde hémisphériques. Ces ondes sont réfléchies par des défauts de dimension suffisante ainsi que par le fond de la dalle ; elles effectuent ensuite des aller-retours entre la surface et ces divers réflecteurs. L'onde de Rayleigh, très énergétique, reste au contraire localisée à la surface : son amplitude décroît exponentiellement avec la profondeur. Un capteur placé à côté du point source est utilisé pour enregistrer ces différents trains d'onde. La méthode impact-écho repose sur l'étude des échos liés à l'onde P. Son originalité est de travailler dans le domaine fréquentiel plutôt que dans le domaine temporel.

Dans le cas d'une dalle sans gaine (fig. 2), la fréquence caractéristique de l'épaisseur est :

$$f_e = \beta v_p 2e \quad (1)$$

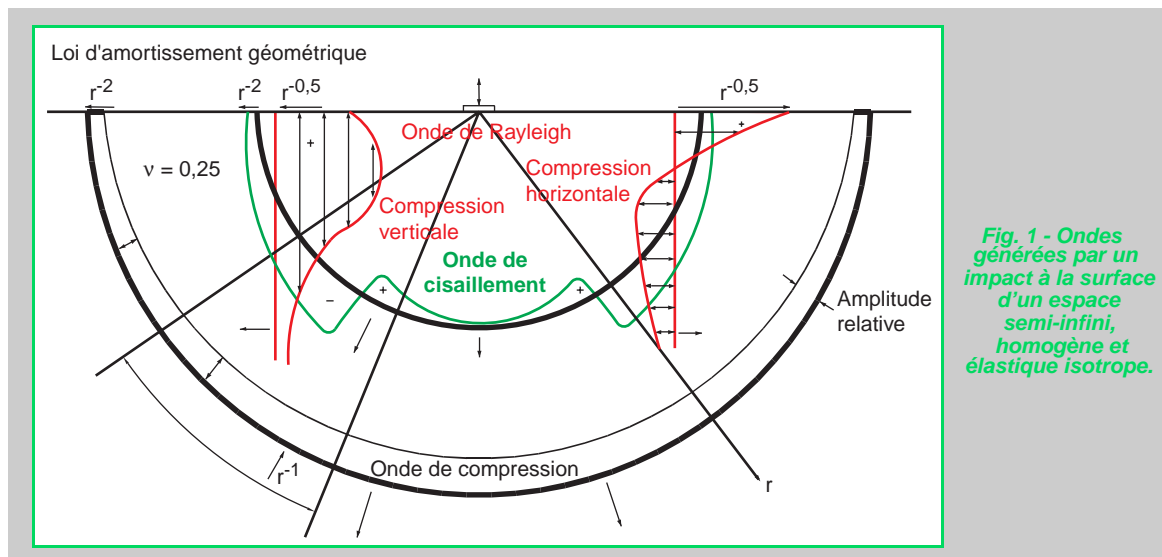
β est un facteur de forme [2] ici égal à 0,96.

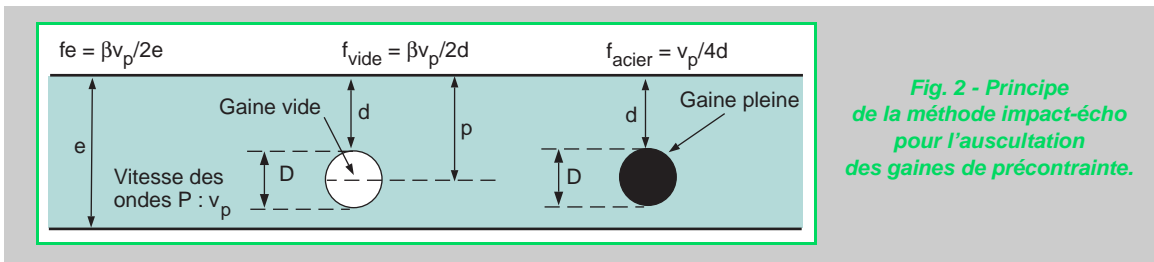
Une gaine remplie d'acier est, quant à elle, caractérisée par la fréquence :

$$f_{\text{acier}} \approx v_p / 4d \quad (2)$$

Cette fréquence, en cas de vide, prend la valeur :

$$f_{\text{vide}} = \beta v_p / 2d \quad (3)$$





Ce phénomène s'accompagne aussi d'un décalage de la fréquence caractéristique de l'épaisseur de la poutre f_e vers une fréquence plus faible notée f_e' . Dans ce qui suit, seul le décalage de f_e vers f_e' sera étudié. L'utilisation de f_{vide} ou de f_{acier} n'entre pas dans le cadre de ce travail.

Résultats numériques

Les calculs sont réalisés avec le code CÉSAR-LCPC [13]. Le béton est caractérisé par une masse volumique égale à $2\,400\text{ kg m}^{-3}$, un module d'Young de $42\,003\text{ MPa}$ et un coefficient de Poisson de $0,22$. La vitesse de l'onde P, v_p est alors égale à $4\,470\text{ m s}^{-1}$. L'acier a une densité de $7\,700\text{ kg m}^{-3}$, un module d'Young de $210\,000\text{ MPa}$ et un coefficient de Poisson de $0,285$. L'amortissement intrinsèque des matériaux est négligé.

La dalle a une épaisseur e égale à $0,2\text{ m}$ et une longueur de 4 m . Elle est soumise à une pression $F(t)$ qui, dans le temps, varie comme une gaussienne :

$$F(t) = \exp[-(\pi f_{Ri}t)^2] \quad (4)$$

Le maximum d'énergie de la dérivée seconde de $F(t)$ est centré à la fréquence $f_{Ri} = v_p / 2e = 11\,175\text{ Hz}$. La taille des mailles des modèles 2D en déformation plane est inférieure à $v_p / (2 f_{Ri} \times 20)$. Les calculs sont réalisés avec des éléments triangulaires à six nœuds. Le pas de temps est égal à $2\text{ }\mu\text{s}$ ($\cong 1/45 f_{Ri}$). La durée totale de calcul est de $1,024\text{ ms}$.

Cas d'une dalle sans gaine

La figure 3a présente l'accélération calculée à la surface de la dalle pour des capteurs distants de 0 à 2 m de la source localisée à $x = 0\text{ m}$. L'onde de compression arrive à $x = 2\text{ m}$ à $t = 0,45\text{ ms}$; sa réflexion et celles des ondes de Rayleigh et de l'onde S sur ce bord ne perturbent pas les signaux proches de la source. Avant de calculer les transformées de Fourier des signaux, une fenêtre de Hanning est appliquée au signal pour minimiser l'énergie de l'onde de Rayleigh. La figure 3b représente le spectre de l'accélération à la surface de la dalle pour des capteurs distants de 0 à $0,5\text{ m}$. La fréquence de résonance est égale à $10\,880\text{ Hz}$ pour une valeur attendue de $10\,728\text{ Hz}$ (éq. 1). Cette fréquence est obtenue à $\pm 2\%$ pour des distances source capteur inférieures à $e/2$.

Dans tout ce qui suit la source et le capteur sont situés au même point.

Cas d'une dalle avec une gaine vide

Le résultat des calculs par éléments finis pour des profondeurs p et des diamètres D physiquement acceptables sont présentés sur la figure 4. La profondeur de la gaine p varie de $0,02$ à $0,18\text{ m}$ tandis que le diamètre D de la gaine varie de $0,02$ à $0,16\text{ m}$ (cf. fig. 2).

Soit f_e' la valeur de f_e au-dessus d'une gaine vide. Contrairement à ce que l'on pourrait attendre, la variation $\Delta f_e = (f_e - f_e') / f_e \times 10$ est maximale lorsque la gaine est centrée au milieu de la dalle, c'est-à-dire lorsque le trajet entre les deux faces est minimal. Si une valeur de Δf_e supérieure à 10% est retenue comme seuil de détectabilité, la gaine vide sera détectée dès lors que son diamètre D sera supérieur à $e/5$ (cf. [14] pour une étude paramétrique plus poussée). Δf_e est plus sensible au rapport D/e qu'à la profondeur de la gaine. Les résultats restent pratiquement identiques si la face d'application de la force change.

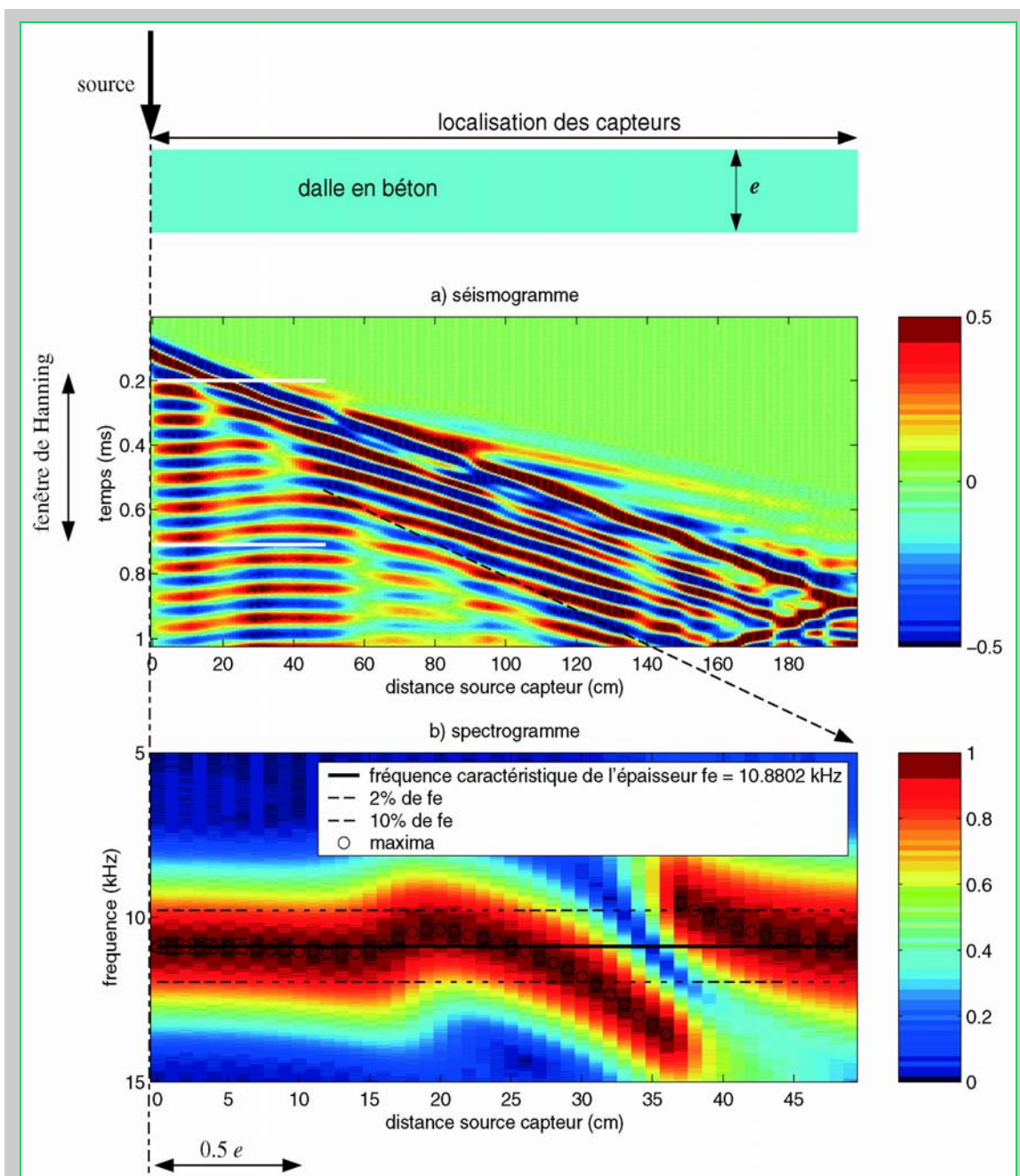


Fig. 3 - Résultats numériques pour une dalle sans gaine de 0,2 m d'épaisseur ($v_p = 4\,470$ m/s).

Cas d'une dalle avec une gaine partiellement remplie

Afin de s'approcher davantage des conditions réelles, la gaine est partiellement remplie d'acier avec en complément soit du béton, pour modéliser une gaine pleine, soit de l'air, pour modéliser une gaine vide (fig. 5). La section de la gaine est séparée en deux par une interface parallèle ou perpendiculaire à la surface de la dalle.

Cas d'une interface parallèle à la surface de la dalle

La figure 6a représente Δf_c en fonction de S_h , qui est le rapport entre la hauteur du remplissage d'acier et le diamètre de la gaine (fig. 5) pour différentes valeurs de D/e . Le choix de la face sur

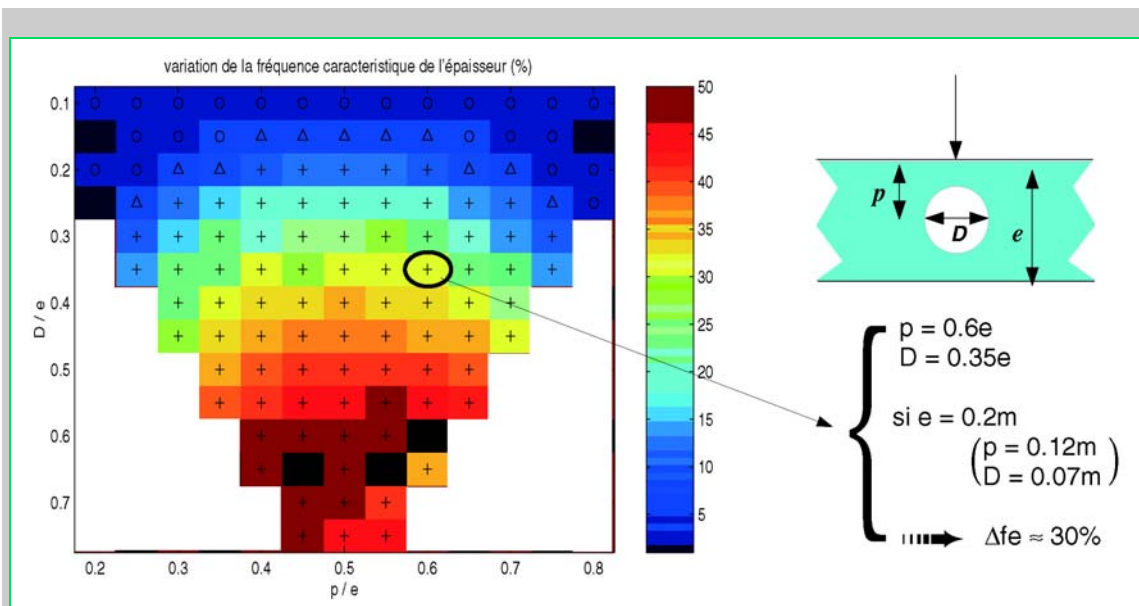


Fig. 4 - Variation de la fréquence caractéristique de l'épaisseur pour différents diamètres (D/e) et différentes profondeurs (p/e).

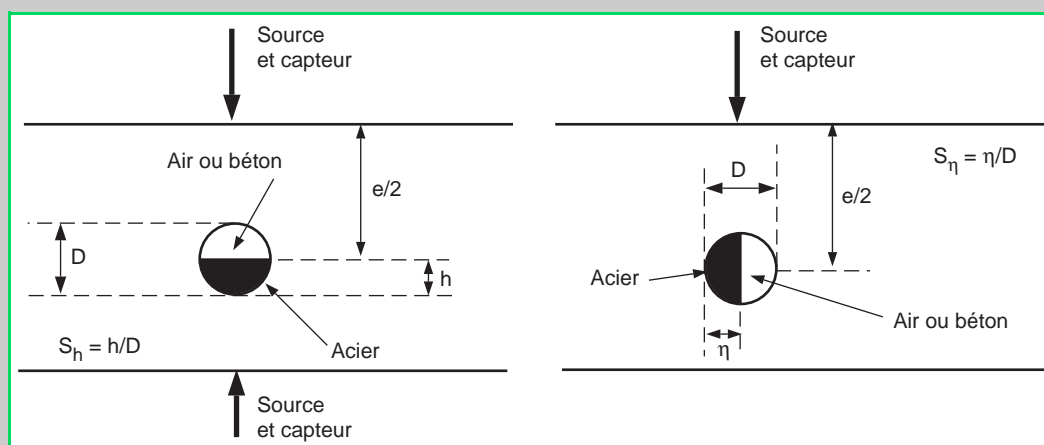


Fig. 5 - Remplissage partiel de la gaine.

laquelle la force est appliquée, comme pour une gaine totalement vide, reste indifférent : cette caractéristique est un avantage par rapport à un diagnostic fondé sur le suivi des réflexions sur la gaine avec f_{acier} et f_{vide} . En l'absence de vide (remplissage béton et acier), Δf_c est légèrement négative. En présence de vide Δf_c devient positive. Δf_c est supérieure à 10 % dès lors que S_h est inférieur à 0,5 pour un diamètre tel que $D/e = 0,2$. Pour un diamètre supérieur $D/e = 0,3$, Δf_c est supérieure à 10 % dès lors que S_h est inférieur à 0,75. La variation de la fréquence caractéristique de l'épaisseur est donc notable quand l'interface qui délimite le vide est parallèle à la surface de la dalle.

Cas d'une interface perpendiculaire à la surface de la dalle

La figure 6b représente Δf_c en fonction de S_η , qui est le rapport entre la hauteur du remplissage d'acier et le diamètre de la gaine (fig. 5), pour différentes valeurs de D/e . En l'absence de vide, Δf_c est négative avec une valeur absolue légèrement supérieure à celle de la configuration précédente tout en restant inférieure à 10 %. En présence de vide, Δf_c reste négative pour des vides aussi étendus que la moitié de la section des gaines. Une variation de Δf_c supérieure à 10 % n'est

jamais atteinte pour des diamètres inférieurs à 0,2 e. Pour les diamètres $D = 0,25 e$ et $D = 0,3 e$, un vide est détecté si S_η est inférieur à 0,2.

En conclusion, l'orientation de l'interface qui délimite le vide est un paramètre très influent sur la variation de la fréquence de résonance caractéristique de l'épaisseur (c'est aussi le cas si f_{vide} ou f_{acier} sont utilisées). Si l'interface du vide est parallèle à la surface de la dalle, sa détection sera aisée alors qu'il restera pratiquement indétectable si cette interface est perpendiculaire à la surface de la dalle. Dans tous les cas, la force peut être appliquée indifféremment sur une des deux faces de la dalle.

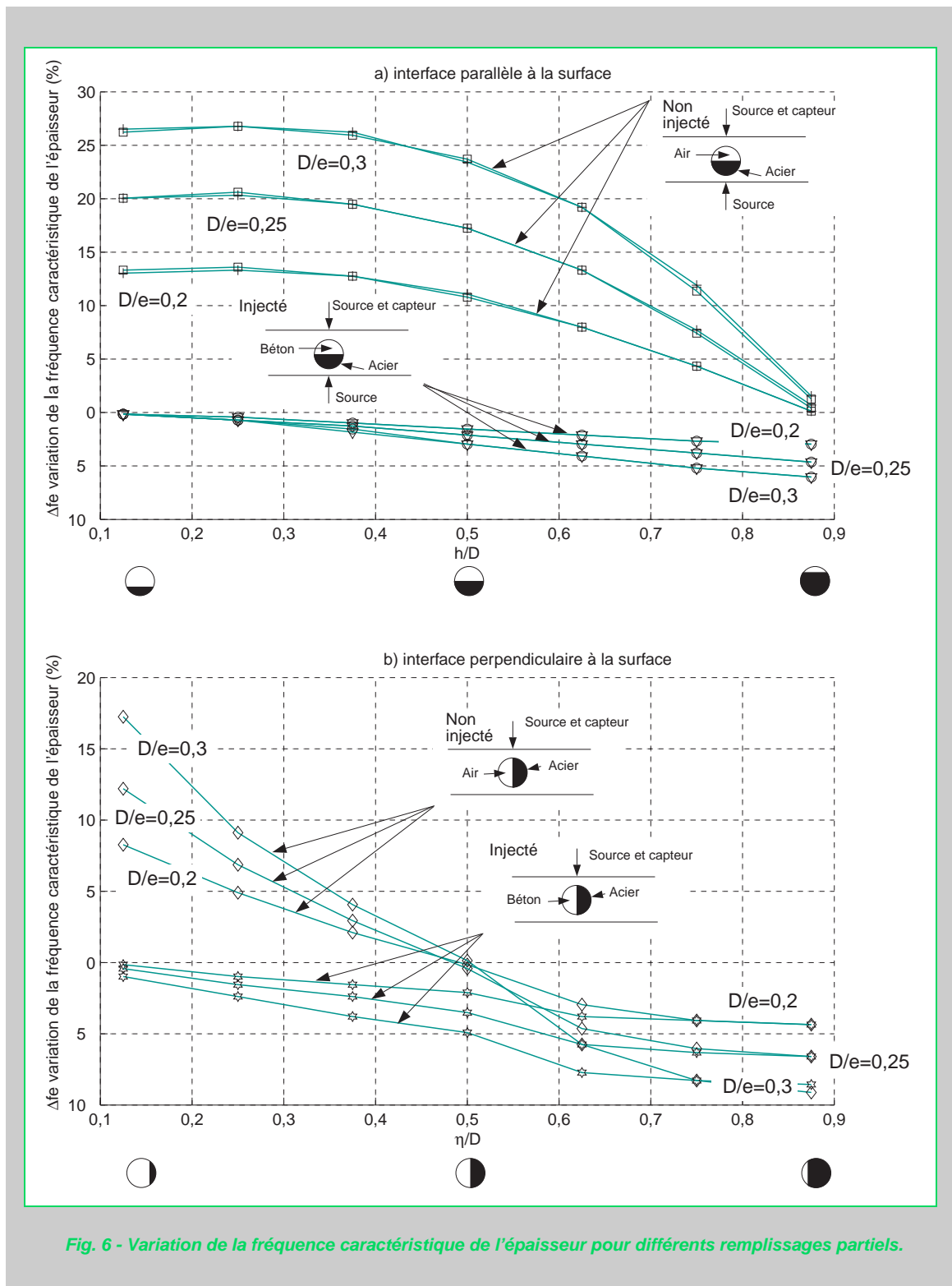


Fig. 6 - Variation de la fréquence caractéristique de l'épaisseur pour différents remplissages partiels.

Résultats expérimentaux

Principe de mesure suivant des profils sécants à la gaine

La réalisation de profils fréquentiels améliore la fiabilité de la méthode impact-écho, notamment pour rechercher des vides dans les gaines [14]. Il s'agit d'enregistrer des mesures, alignées sur une droite qui coupe la gaine, avec un pas δ_x rapproché (typiquement inférieur au rayon de la gaine), et de présenter les résultats sous la forme d'un BSCAN fréquentiel (fig. 7). Cette procédure ne nécessite donc pas une localisation très précise du centre de la gaine. De plus, l'interprétation de profils renforce la fiabilité du diagnostic car il repose alors sur plusieurs points de mesure au-dessus de la gaine qui devront donner la même information. Des mesures isolées seront donc écartées. Les origines principales d'éventuelles fluctuations sont : le couplage du capteur au béton, la géométrie de la structure localement et la répétitivité de la source. Une sommation de signal (sommation des spectres) pour un même point de mesure est d'ailleurs souhaitable. L'influence de la géométrie (bout de poutre, face de la dalle non parallèle), quant à elle, ne peut être corrigée.

Une étude paramétrique [14] montre qu'un écartement de $4D$ entre gaines est suffisant pour retrouver la fréquence caractéristique de l'épaisseur f_c entre gaines. Cet écartement est donc suffisant pour dissocier des gaines voisines et ainsi réaliser individuellement leur diagnostic.

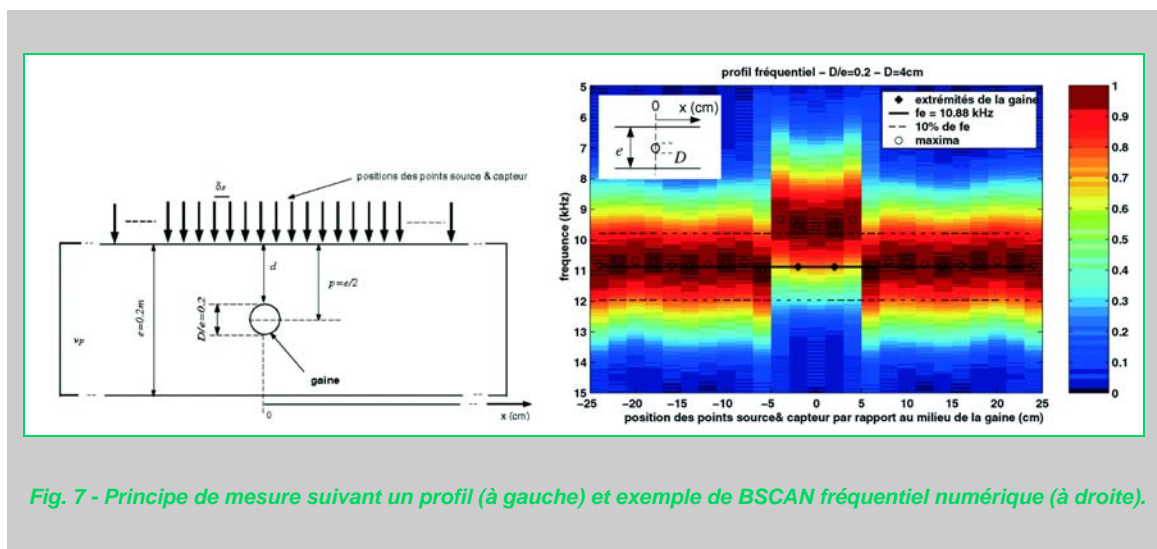


Fig. 7 - Principe de mesure suivant un profil (à gauche) et exemple de BSCAN fréquentiel numérique (à droite).

Cas du Pont Neuf à Foix

Cette démarche d'auscultation est appliquée sur une portion de poutre VIPP du Pont Neuf (Foix, France), qui a été mise de côté lors de sa démolition suite à des défauts avérés de remplissage de gaine. Ce morceau de poutre de 10 m de long a permis de tester diverses méthodes de contrôle non destructif dont la méthode impact-écho [15]. L'épaisseur de la poutre est de 0,21 m (fig. 8). Les gaines ont un diamètre de 0,045 m ($D/e = 0,21$) et sont localisées au milieu de l'épaisseur de la poutre. La configuration est défavorable car l'interface d'un éventuel vide sera sans doute perpendiculaire à la surface de l'âme de la poutre.

Des profils impact-écho ont été réalisés au droit de deux clichés gammagraphiques. Un des clichés localise une gaine partiellement remplie, l'autre une gaine pleine. Deux profils impact-écho, sur chacune des faces de la poutre, sont réalisés pour chaque cliché. Ils commencent à 0,02 m du gousset et font 0,67 m de long. Les gaines sont localisées à environ 0,5 m du gousset. Chaque profil ne croise qu'une gaine. Le matériel utilisé est le système impact-écho commercialisé par Impact-écho Instruments, LLC (Ithaca N.Y., États-Unis). La source utilisée est une bille d'acier de 6 mm de diamètre.

La figure 9 présente les résultats obtenus. Au-dessus de la gaine partiellement remplie, la décroissance de la fréquence caractéristique de l'épaisseur est clairement visible et est supérieure à 10 %. Plusieurs points viennent à l'appui de ce diagnostic. Le vide est sans doute conséquent car la variation est élevée (cf. fig. 6).

Dans le cas de la gaine pleine, la fréquence caractéristique de l'épaisseur f_e subit des fluctuations près de la gaine, mais globalement les perturbations restent inférieures à 10 % de f_e et n'apparaissent que sur un nombre limité de points.

Sur toutes les images les fluctuations proches du gousset ne doivent pas être interprétées car elles sont liées à la géométrie complexe dans cette zone.

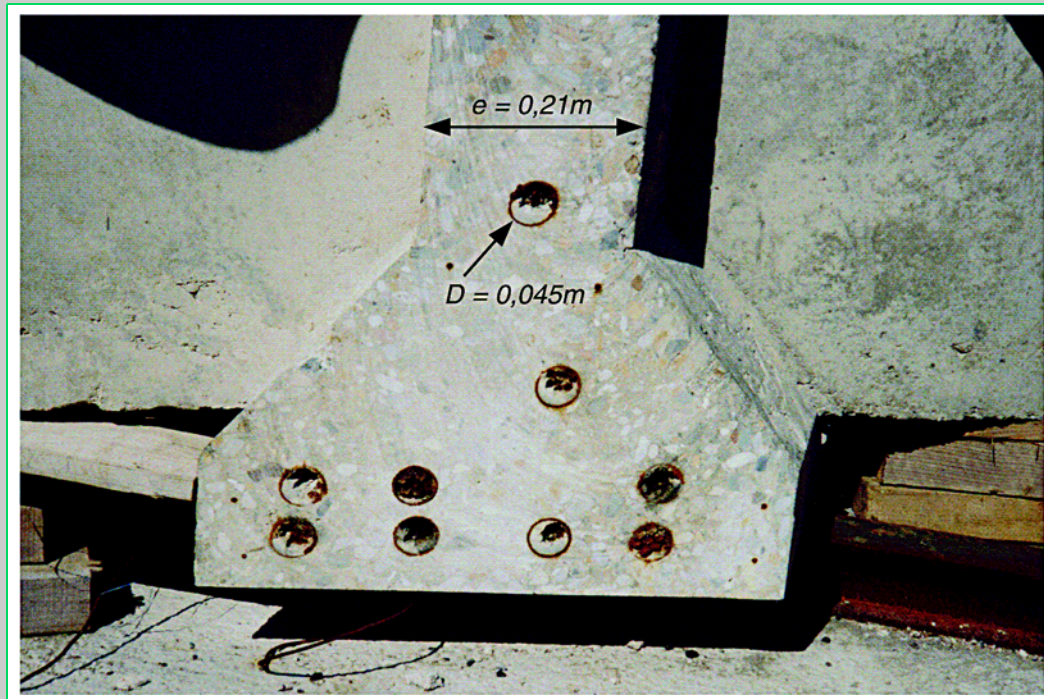


Fig. 8 - Section de la poutre du Pont Neuf (Foix, France) ausculté.

Conclusion

Le décalage de la fréquence de résonance caractéristique de l'épaisseur au-dessus d'une gaine de précontrainte peut être mis à profit pour diagnostiquer la présence d'un vide. Toutefois, la détection d'un vide qui aurait une interface perpendiculaire à la surface de la dalle est difficile. Dans le cas où cette interface est parallèle à la surface de la dalle, un vide dans une gaine de diamètre $D = 0,2 e$ qui occuperait plus de 50 % de la section de la gaine sera détecté (variation de la fréquence caractéristique de l'épaisseur supérieur à 10 %). Pour des gaines de diamètres D supérieurs à $0,3 e$, un vide qui occuperait plus de 20 % de la section sera lui aussi détecté. Les mesures peuvent être indifféremment réalisées de part et d'autre de la dalle.

La réalisation de mesure impact-écho sous forme de profil (BSCAN) dans le domaine fréquentiel doit être préférée à des mesures ponctuelles dans la mesure où la fiabilité du diagnostic est considérablement améliorée. Ce type de dispositif expérimental allège de plus le besoin de localiser précisément la gaine.

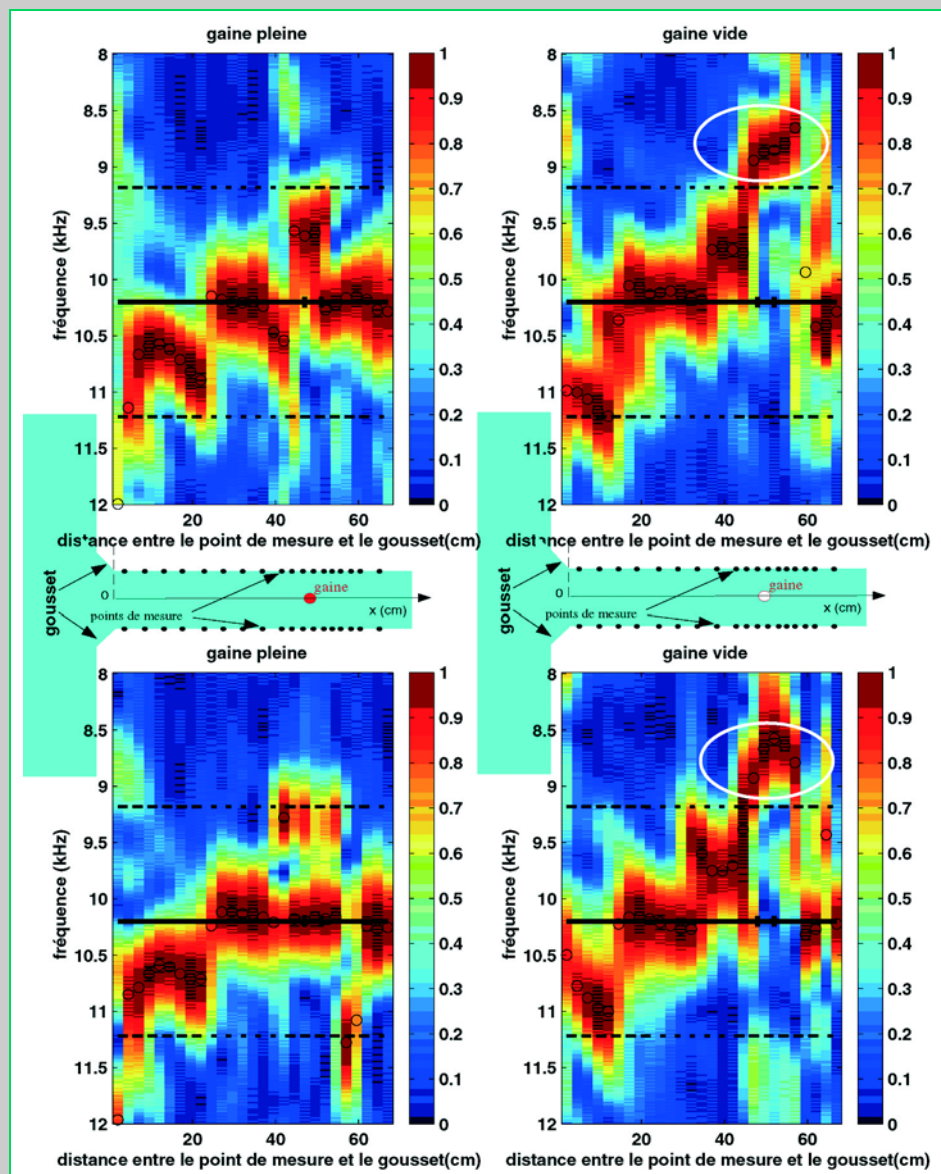


Fig. 9 - Résultat impact-écho pour la poutre du Pont Neuf (Foix, France). À gauche les résultats au-dessus d'une gaine pleine. À droite les résultats au-dessus d'une gaine vide. La fréquence caractéristique de l'épaisseur f_0 est matérialisée par un trait noir (les traits pointillés correspondent à $\pm 10\% f_0$). Le décalage en fréquence au-dessus de la gaine vide est cerclé de blanc.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CARINO N.J., "Laboratory study of flaw detection in concrete by the pulse echo method," *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, États-Unis, SP 82-28, **1984**, pp. 557-579.
- [2] CARINO N.J., SANSALONE M. and HSU, N., "Flaw detection in concrete by frequency spectrum analysis of impact-écho waveforms," *Int. Advances in Nondestructive Testing*, vol. 12, **1986**, pp. 117-146.
- [3] SANSALONE M. and CARINO N.J. "Impact-echo method," *Concrete International*, **1988**, pp. 38-46.
- [4] Post-tensioned concrete bridges, Anglo-French liaison report, Thomas Telford Publishing, London, UK, **1999**, 164 p.
- [5] CARINO N.J. and SANSALONE M.J., "Detection of voids in grouted ducts using the impact-echo method," *ACI Materials Journal*, vol. 89, **3**, **1992**, pp. 296-303.
- [6] SANSALONE M. and STREETT W.B., "Impact-echo: Nondestructive testing of concrete and masonry," *Bulbrier Press*, Ithaca, N.Y., États-Unis, **1997**, 339 p.

- [7] JAEGER J.B., SANSALONE M. and POSTON R.W., "Detecting voids in grouted tendon ducts in post-tensioned concrete structures using impact-écho method," *ACI Structural Journal*, vol. 93, **4**, **1996**, pp. 462-473.
- [8] JAEGER J.J., SANSALONE M.J. and POSTON R.W., "Using impact-echo to assess tendon ducts," *Concrete International*, **1997**, pp. 42-46.
- [9] MARTIN J., HARDY M.S.A., USMANI A.S. and FORDE M.C., "Quantifying the defect in post-tensioned bridges using impulse ultrasonics," Proc. of the 6th Int. Conf. on Structural Fault and Repair, Ed. Prof. M.C. Forde, Engineering Technics Press, Edinburgh (UK), **1995**, pp. 209-216.
- [10] MARTIN J., HARDY M.S.A., USMANI A.S. and FORDE M.C., "Impact-echo assessment of post-tensioned concrete bridge beams," Proc. of the 7th Int. Conf. on Structural Fault and Repair, Ed. Prof. M.C. Forde, Engineering Technics Press, Edinburgh (UK), **1997**, pp. 341-353.
- [11] ABRAHAM O., LEONARD C., CÔTE Ph. and PIWAKOWSKI B., "Time frequency analysis of impact-echo signals: Numerical modeling and experimental validation," *ACI Materials Journal*, **2000**, pp. 612-624.
- [12] GHORBANPOOR A., "Evaluation of post-tensioned concrete bridge structures by the impact-echo technique," USA Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-92-096, **1993**, 92 p.
- [13] HUMBERT P., "CÉSAR-LCPC : un code général de calcul par éléments finis," *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **1989**, **203**, pp. 112-115.
- [14] ABRAHAM O., CÔTE Ph., *Thickness frequency profile for the detection of voids in tendon duct*, *ACI Structural Journal*, **99(3)**, **2002**, pp. 239-247.
- [15] DÉROBERT X., AUBAGNAC C., ABRAHAM O., Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before autopsy, *International Journal of Nondestructive Testing and Evaluation*, **35**, **2002**, pp. 541-548.