

Synthèse sur l'utilisation de l'impact-écho par la Direction de l'expertise des structures du ministère wallon de l'Équipement et des Transports

Eric DONDONNÉ
Patrice TOUSSAINT

Ministère wallon de l'Équipement et des Transports

RÉSUMÉ

La Direction de l'expertise des structures du ministère wallon de l'Équipement et des Transports a acquis en 1997 un appareillage d'impact-écho dans le but d'ausculter ses ponts en béton armé ou précontraint.

L'expérience d'utilisateurs occasionnels de cette technique, ainsi que les succès et échecs rencontrés, ont été synthétisés.

Des structures simples, dont on connaissait la nature et la localisation des défauts, ont d'abord été auscultées en laboratoire.

Les expériences de chantier ont été ensuite réparties en trois catégories, selon le type de défaut recherché : localisation de vides divers, défaut d'injection de câbles de précontrainte et dégradation de dalles de tablier.

Un dernier point traite des développements en cours pour le traitement du signal.

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

ABSTRACT

In 1997, The Structural Appraisal Division of the Walloon Ministry of Public Works and Transport acquired impact-echo instrumentation in the aim of conducting diagnostic evaluations of the prestressed concrete and reinforced concrete bridges within their jurisdiction.

The experience gained by occasional users of this technique is summarized herein, along with the various successes and failures encountered.

A number of simple structures, whose defects had been well-identified and located, were first examined in the laboratory.

On-site experiments were then divided into three categories, depending on the type of target defect: position determination of various voids, faulty injection of prestressing cables, and deterioration of deck slabs.

The final discussion focuses on ongoing developments in the area of signal processing.

FIELD: Structural engineering - Engineering sciences.

Introduction

Au sein du Ministère de l'Équipement et des Transports en région wallonne (MET), la Direction de l'Expertise des structures est un service technique, spécialisé notamment dans l'inspection des ouvrages d'art. Elle est appelée par le service gestionnaire de l'ouvrage lorsqu'un problème particulier est rencontré ou lorsqu'une technique d'investigation spécifique est requise.

La plupart des ponts gérés par le MET sont des ouvrages en béton armé ou précontraint. Sur beaucoup d'entre eux, les défauts internes rencontrés sont consécutifs la plupart du temps à des infiltrations d'eau, souvent chargée en ions chlorure, auxquelles viennent s'ajouter les dégradations dues aux cycles de gel-dégel, aux réactions de gonflement interne ou encore à une pathologie nouvelle en région wallonne baptisée « pourrissement du béton ». Sans rentrer dans le détail, cette maladie du béton rencontrée sur les tabliers de ponts, dont l'étanchéité est localement inefficace, altère de multiples façons le matériau qui perd par endroits sa cohésion et qui voit chuter ses propriétés de résistance. Ces dégradations, souvent indécélables lors d'une inspection visuelle, peuvent aller jusqu'à entraîner le percement local du tablier.

Pour l'investigation de ces structures, les prélèvements de carottes et les dégagements localisés seront toujours nécessaires, mais il est intéressant de pouvoir disposer d'un outil non destructif permettant de localiser plus rapidement les zones à problème. C'est dans ce but qu'en 1997, le service a acquis un matériel d'impact-écho ; cette technique d'auscultation est fondée sur l'analyse d'un

signal sismique généré en surface par un impact et réfléchi par différentes zones caractéristiques, notamment les zones dégradées. Un second objectif est d'utiliser cette technique pour localiser les défauts d'injection dans les gaines de câbles de précontrainte.

Cet article a pour objectif de rendre compte de l'expérience d'utilisateurs occasionnels d'une technique d'auscultation qui reste complexe, et d'essayer de dégager les cas concrets où, sur le terrain, la méthode peut s'avérer rentable.

Description de la méthode

L'auscultation d'une structure par la technique de l'impact-écho comporte trois phases essentielles, à savoir l'étude préliminaire, la phase de mesure proprement dite et l'interprétation des résultats. Après un rappel des principes physiques sur lesquels repose la méthode, ce chapitre s'articule autour de ces trois phases et fera apparaître le côté pratique de l'utilisateur de chantier.

Principes de base

La méthode de l'impact-écho consiste à générer une force transitoire sur la structure étudiée suite à l'impact produit par une bille d'acier. Cette impulsion va induire notamment des ondes de dilatation qui se propagent à l'intérieur du matériau et sont réfléchies par les vides, fissures ou interfaces internes ainsi que par les limites extérieures de la structure.

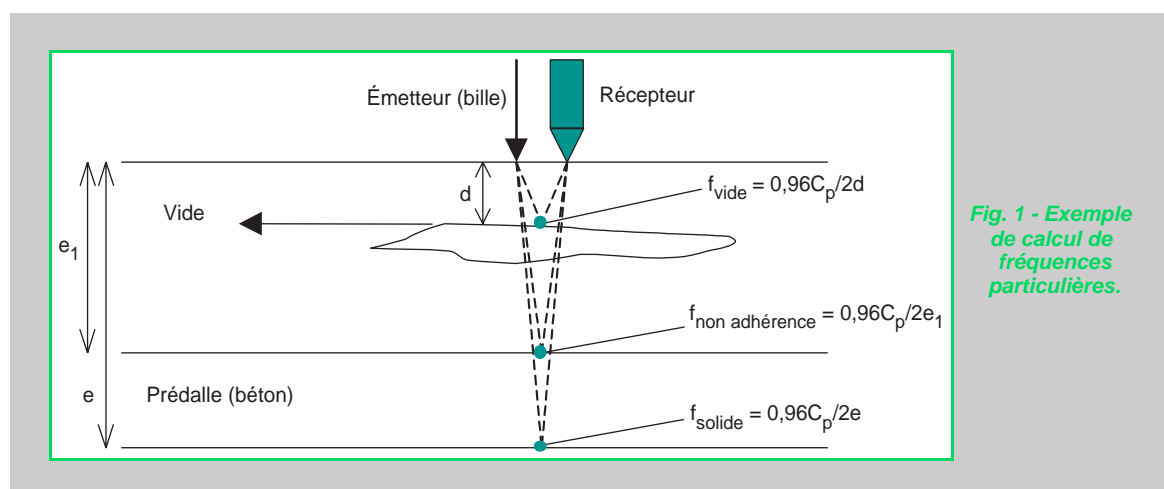
Un récepteur placé à côté de l'impacteur mesure les déplacements provoqués par l'arrivée des ondes réfléchies. Un spectre de fréquence est obtenu par traitement du signal temporel par FFT (Fast Fourier Transformation).

L'analyse des valeurs des fréquences d'amplitude dominante permet, moyennant la connaissance de données géométriques propres à la structure, de détecter et de localiser les défauts éventuels.

Étude préliminaire

Un calcul des fréquences particulières susceptibles d'être mesurées lors de l'inspection est indispensable à la compréhension et à l'interprétation du signal (fig. 1). Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir disposer de données les plus complètes possibles sur la géométrie et la structure des éléments étudiés. Si les plans ne sont pas disponibles ou n'ont pas été actualisés, des méthodes d'investigation peuvent être utilisées préalablement à la campagne de mesures (détection d'armatures, carottages, dégagements, etc). Il est alors possible de calculer certaines fréquences particulières :

- la réponse théorique (sans défaut) de la structure ou fréquence solide, sur toute l'épaisseur de l'élément étudié ;
- la réponse des armatures et leur position ;
- la réponse des gaines des câbles de précontrainte (avec ou sans injection) ;
- le signal relatif à des vides, nids de gravier ou à des plans de fissuration localisés à des profondeurs particulières (par exemple sous un plan de ferrailage).



L'analyse du signal obtenu pendant la campagne de mesures pourra alors être effectuée par comparaison des pics de fréquence mesurés avec ces valeurs théoriques.

Par exemple, dans le cas d'une dalle, la fréquence due à la réflexion d'une onde à une interface solide-air, comme dans le cas d'un vide dans le béton, peut être calculée par la formule suivante [1] :

$$f = \frac{0,96 C_p}{2e}$$

avec :

- C_p : vitesse de propagation de l'onde dans le milieu considéré ;
- e : distance entre l'impacteur et le vide considéré.

Pour simplifier, on définit une vitesse apparente $C_{p, \text{plate}} = 0,96 C_p$; la formule s'écrit alors :

$$f = \frac{C_{p, \text{plate}}}{2e}$$

Lorsqu'une onde arrive à une interface avec un milieu d'impédance acoustique (produit de la vitesse de l'onde et de la densité du matériau traversé) plus forte, pour détecter la présence de gaines métalliques dans le béton par exemple, la formule devient :

$$f = \frac{C_p}{4e}$$

Mesures sur site

Le succès de cette phase est conditionné par une bonne préparation préalable. Sur la surface examinée, les points de mesure se répartissent sur un quadrillage dont la dimension des mailles est choisie en fonction de la géométrie de la structure et de la taille des défauts recherchés.

Un repérage précis des différents éléments singuliers (tracé des gaines de précontrainte par exemple) doit être réalisé, soit à partir des plans dont on dispose, soit à l'aide d'investigations *in situ* (détecteur d'armatures, dégagements localisés, etc). Le diamètre de l'impacteur (bille en acier durci) utilisé sera lui aussi fonction de la géométrie de la structure, de la taille et de la position du défaut recherché ; par exemple, une petite bille induira des hautes fréquences permettant de déceler de petits défauts, mais à des profondeurs limitées. Enfin, on sera attentif à broser et, si nécessaire, poncer ou sécher, la surface examinée. Les premières mesures doivent être réalisées dans une zone sans défaut, où les épaisseurs de béton et des autres couches sont bien connues (le recours à des forages ou carottages peut être nécessaire). En analysant le signal obtenu, il est possible d'ajuster les hypothèses prises sur les valeurs des vitesses des ondes dans les différents matériaux.

Prenons par exemple le cas d'une simple dalle en béton armé de 18 cm d'épaisseur. On estime à 4 000 m/s la vitesse des ondes dans le béton. La fréquence solide (caractéristique de la réflexion d'une onde traversant toute l'épaisseur de l'élément) est de 11,2 kHz (fig. 2).

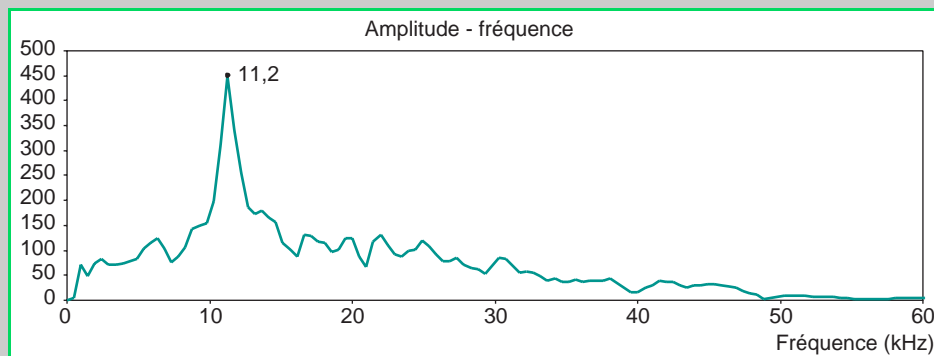


Fig. 2 - Fréquence solide mesurée sur une dalle en béton de 18 cm d'épaisseur.

La vitesse réelle peut donc être calculée comme suit :

$$C_{p, \text{plate}} = 2 * e * f = 2 * 180 * 11,2 = 4\,032 \text{ m/s}$$

Cette valeur sera utilisée par la suite pour les différentes analyses.

La fréquence solide ayant été déterminée, les mesures sur les zones suspectes peuvent être réalisées.

Analyse du signal

Le signal à interpréter est souvent complexe et c'est avec l'expérience que son analyse deviendra fiable. Il faut noter qu'il est délicat de vouloir travailler sur une mesure unique. Le manque de reproductibilité des mesures (c'est un des problèmes majeurs de la méthode) ou la présence de défauts très localisés en surface peuvent en effet fournir un signal non représentatif de la situation réelle. Pour cette raison, il est conseillé de pratiquer un examen plus global qui prend en compte les points adjacents du maillage.

Le cas simple de la dalle en béton de 18 cm d'épaisseur nous donne un exemple d'analyse du signal fréquentiel. Rappelons que la vitesse de l'onde, calculée plus haut, est de 4 032 m/s. La figure 3 reprend un signal mesuré dans une zone présentant un plan de fissuration horizontal.

L'interprétation est aisée ; un seul pic à 17,6 kHz permet d'estimer la profondeur du défaut :

$$e = \frac{C_{p, \text{plate}}}{2f} = 11,5 \text{ cm}$$

Remarquons que l'on ne retrouve pas la fréquence solide, ce qui signifie que l'onde a été intégralement réfléchi au droit du plan de fissuration.

Le signal est rarement aussi simple à interpréter, de nombreux pics parasites venant souvent compliquer le travail de l'analyste. Après avoir éliminé les pics de fréquences trop basses ou trop hautes, il est conseillé de travailler « à l'envers », c'est-à-dire, en fonction des défauts recherchés, de calculer les fréquences qui les caractérisent et d'examiner si celles-ci se retrouvent sur le signal mesuré.

Cette méthode n'est donc pas toujours applicable et l'interprétation de signaux complexes prête souvent à discussion ; c'est pourquoi il est fondamental de toujours avoir recours à des carottages ou à des dégagements localisés pour confirmer ou infirmer un diagnostic.

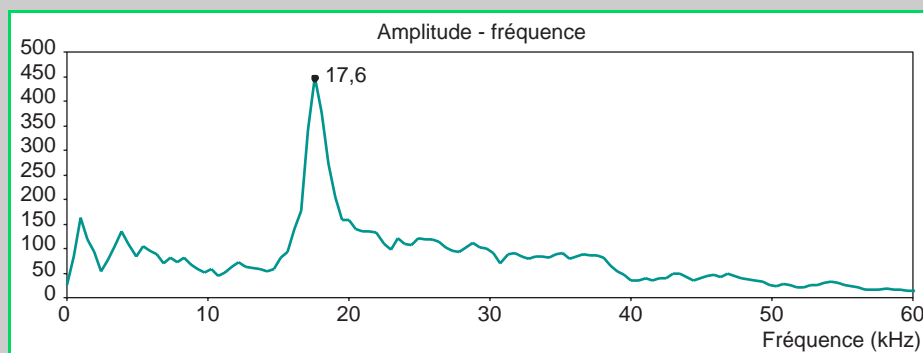


Fig. 3 - Signal caractérisant un plan de fissuration dans une dalle.

Étude en laboratoire

Introduction

Dès son acquisition en 1997, la technique d'impact-écho a été appliquée dans le cadre des inspections d'ouvrages. Dans un premier temps, cette expérience ne s'est pas avérée très concluante, en raison de la complexité et de la difficulté d'interprétation des signaux obtenus. Cette complexité est inhérente d'une part à la méthode, mais également à la combinaison de différents facteurs propres à

la structure étudiée (manque de connaissance de la géométrie de la structure, superposition de couches de propriétés différentes, superposition de plusieurs défauts dans une même zone, etc).

Devant ce manque d'efficacité, il a été décidé de faire un pas en arrière et de réorienter l'approche du problème. On a donc eu recours à :

- une formation complémentaire, assurée par des spécialistes de la méthode, traitant de cas pratiques *in situ* ;
- une étude expérimentale, réalisée sur des dalles-test, simplistes dans leur conception par souci pédagogique.

Fort de cette expérience, cette méthode nous a permis de traiter, avec plus ou moins de succès, une douzaine de cas pratiques.

Ce volet expérimental se compose :

- d'une part, de la réalisation et de l'étude de trois dalles-test,
- d'autre part, de l'examen d'un bloc d'about de tablier précontraint.

Dalles-test

Trois dalles-test en béton armé ont été réalisées. Celles-ci sont carrées, de 150 cm de côté et 15 cm d'épaisseur. Notre volonté, dans un souci pédagogique, était d'avoir, pour chacune de ces dalles, un seul type de défaut, de localisation et de profondeur connues. Concrètement, il s'agit de vides de type tubulaire pour la dalle 1, de nids de gravier pour la dalle 2 et de plans de fissuration pour la dalle 3. Sur chaque dalle, les mesures sont réalisées suivant un quadrillage de 15 x 15 cm (sur les figures 4 à 6, celui-ci est repéré par des chiffres en abscisse et par des lettres en ordonnée).

Globalement, les résultats obtenus peuvent être considérés comme satisfaisants, tant pour la localisation du défaut que pour son identification.

Il est à noter que l'équipe qui a réalisé l'auscultation de ces dalles n'avait pas une connaissance préalable de ces paramètres.

Pris individuellement, les résultats obtenus méritent toutefois quelques précisions :

Dalle 1

La dalle est pourvue de trois tuyaux vides en pvc disposés horizontalement, sur toute la largeur. Placés à différentes profondeurs de la face avant (fig. 4), ces tuyaux ont un diamètre de 5 cm pour le tuyau supérieur et de 3,5 cm pour les deux autres.

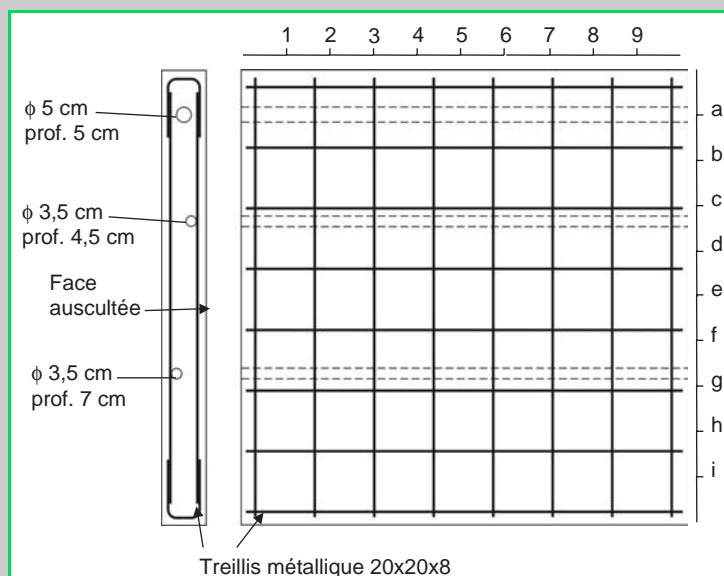


Fig. 4 - Plan de réalisation de la dalle 1.

Le diamètre de la bille utilisée est de 0,5 cm, ce qui doit permettre la détection de défauts de dimension supérieure à 7 cm et situés à une profondeur d'au moins 3,5 cm. Le diamètre des tuyaux étant inférieur à 7 cm, il ne s'agissait pas de rechercher une fréquence particulière associée au vide, mais de mettre en évidence un décalage de la fréquence solide, attestant d'un allongement du parcours de l'onde [2].

Par cette technique, la présence des deux tuyaux supérieurs a pu être détectée. Le troisième, équidistant entre deux lignes de mesures, n'a pas été mis en évidence, d'où la nécessité d'adapter la densité du maillage en fonction de la taille du défaut recherché. Dans le cas de la problématique des défauts d'injection dans les gaines de précontrainte, la technique des profils sécants qui consiste à comparer les fréquences solides de mesures réalisées sur une série de points alignés perpendiculairement au tracé de l'élément peut aussi être adoptée [3].

Dalle 2

Cette dalle est pourvue de deux plans de fissuration, matérialisés par des feuilles plastiques. Seule une des deux zones a été détectée. Une explication plausible réside dans le fait que le défaut repéré se rapporte à une membrane plastique avec bulles d'air incorporées, alors que pour le second défaut, un simple film plastique a été utilisé (fig. 5).

Au droit du vide détecté, le signal mesuré se caractérise par un pic unique de grande amplitude, associé à une très basse fréquence. La théorie [1] explique ce type de signal par la mise en vibration d'une plaque de faible épaisseur, séparée du reste de la dalle par un vide ou par un plan de fissuration. Dans ce cas, la fréquence obtenue n'est donc pas caractéristique de l'épaisseur du défaut mais d'un des modes flexionnels de vibration de la couche délaminée.

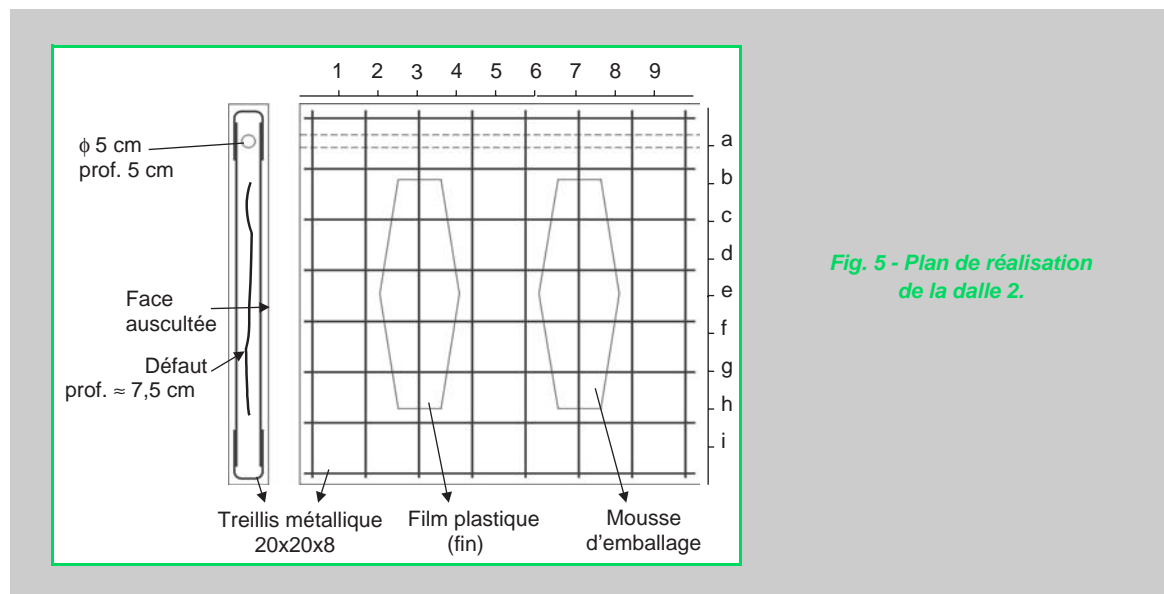


Fig. 5 - Plan de réalisation de la dalle 2.

Dalle 3

Cette dalle est caractérisée par la présence de deux zones de nids de gravier. Ces zones ont pu être identifiées, mais avec une surestimation de leur surface (fig. 6 et 7). Deux arguments peuvent expliquer ce constat : d'une part, la méthode est sensible et repère des défauts légèrement excentrés par rapport à l'endroit sondé ; d'autre part, la réalisation de la dalle n'a pas été effectuée tout à fait conformément au plan, les zones de défauts étant plus importantes que prévu.

Les spectres de fréquence enregistrés sont plus complexes, dans la mesure où on n'a pas une seule fréquence singulière, mais un ensemble de pics compris dans une plage de fréquences associée à l'épaisseur du défaut.

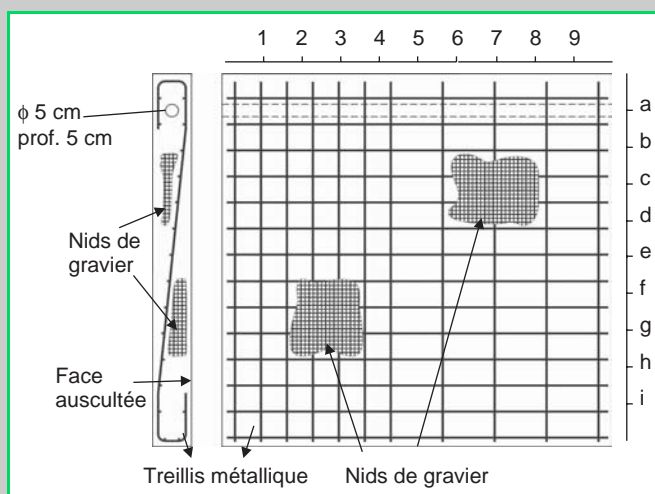


Fig. 6 - Plan de réalisation de la dalle 3.

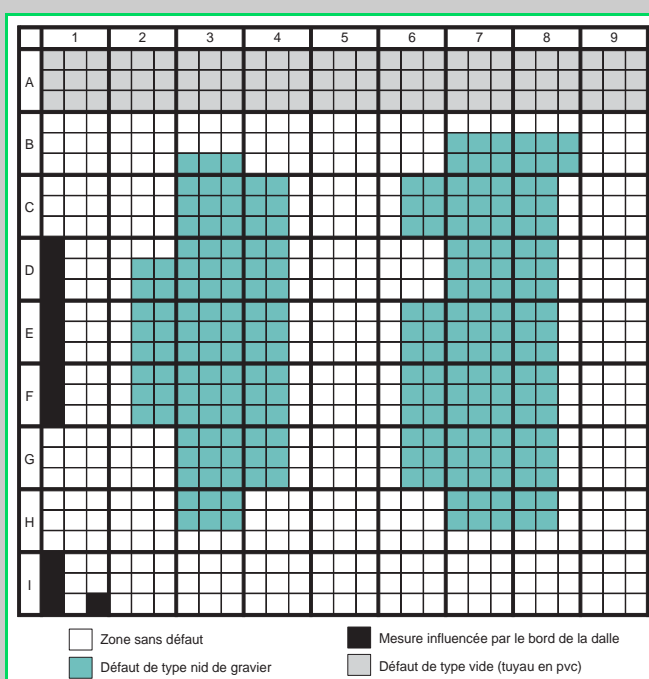


Fig. 7 - Schéma des résultats sur la dalle 3.

Dalle précontrainte

Cette étude concerne la détection de défauts d'injection au sein de câbles de précontrainte. Elle a été réalisée à partir d'un morceau de bloc d'about de tablier précontraint récupéré sur un de nos ouvrages.

Comme le montre la figure 8, la dalle expérimentale reproduit les différents cas de figure susceptibles d'être rencontrés *in situ*, à savoir l'injection complète, l'injection partielle et l'absence d'injection (matérialisée par une réservation vide).

Il s'agit d'une dalle de 38 cm d'épaisseur, composée de trois lits de câbles de précontrainte de 6,5 cm de diamètre. La partie supérieure du câble se situe à 12 cm de la surface pour la première rangée, et à 21 et 31 cm pour les deuxième et troisième rangées. Les mesures portent essentiellement sur le lit supérieur, sachant que l'on y retrouve les trois cas de figure décrits.



Fig. 8 - Vues du bloc d'about de tablier précontraint.

Deux billes de diamètres différents (0,5 et 0,8 cm) ont été utilisées : la première, pour tenter de détecter un pic de fréquence associé à la réflexion de l'onde au droit des câbles ; la seconde, dans le but d'identifier un éventuel décalage de la fréquence solide au droit des vides rencontrés.

Les points de mesures se localisent au droit de l'axe des câbles et sur des profils équidistants de deux câbles successifs. Malgré la connaissance précise de la configuration des câbles (position et état de ceux-ci), les résultats obtenus sont jugés mitigés. En effet, seul le repérage des gaines complètement vides s'est avéré efficace.

- Câbles injectés : il ne se dégage pas, de façon significative, de fréquences associées à la présence d'acier (fils de précontrainte), ce qui aurait permis de conclure à une injection au moins partielle du câble. Sur chantier, cette information a également l'avantage de confirmer le tracé du câble.
- Câbles non injectés : on relève une fréquence associée au vide, mais pas de décalage franc de la fréquence solide. On notera que ce constat est à l'opposé de celui obtenu sur la dalle-test n° 1. Il est possible que le diamètre (65 mm) et la profondeur du vide (12 cm), rapportés à l'épaisseur importante de la dalle (38 cm), soient à l'origine de cette différence.
- Câbles partiellement injectés : suivant la taille du vide, il est possible ou pas de relever une fréquence associée, mais toujours sans décalage significatif de la fréquence solide.

Remarque : la densité des câbles rencontrée (trois lits), ainsi que leur état (injectés ou non), sont susceptibles de perturber ou de modifier la fréquence associée à l'épaisseur de la dalle. Cela pourrait être une des raisons de la difficulté qu'il y a à mettre en évidence un décalage significatif de la fréquence solide au droit des vides rencontrés.

Mesures in situ

Au stade actuel de nos investigations, l'utilisation de la technique de l'impact-écho sur site peut se résumer à trois familles d'applications distinctes :

- l'étude du pourrissement des dalles de tabliers de ponts ;
- le contrôle de l'injection des câbles de précontrainte ;
- une troisième famille plus générale, qui englobe tout ce qui concerne la localisation de vides divers.

Pourrissement des dalles de tablier de ponts

Ce type de pathologie consiste en une dégradation du béton, qui se traduit principalement par un feuilletage du béton parallèlement à la surface, en feuillets de quelques millimètres d'épaisseur, et par une désagrégation du béton dont il ne reste que le squelette pierreux. Cette seconde forme de dégradation est probablement le stade ultime de la première.

Ce processus d'altération présente la particularité de progresser du haut vers le bas de la dalle, provoquant à terme la perforation de celle-ci, d'où l'intérêt de l'identifier au plus tôt.

Actuellement, cinq cas pratiques ont été traités. Sur ces cinq cas, quatre donnent des résultats satisfaisants dans la mesure où il a été possible de localiser et de différencier les zones saines des zones de béton altérées.

La figure 9 montre deux exemples de spectres de fréquences obtenus, pour l'un dans une zone saine, pour l'autre au droit d'une zone dégradée. Le premier se distingue par un pic unique, associé à l'épaisseur totale de la dalle (fréquence solide). Le second comprend toute une série de pics de fréquence associés à deux zones de défauts. On soulignera le décalage de la fréquence solide (de 12 à 11 kHz), dû à un allongement du parcours de l'onde suite aux défauts rencontrés.

Il est à noter que dans l'interprétation des deux signaux, on ne prend pas en considération un pic de basse fréquence (de l'ordre de 2 kHz). Cette fréquence n'est en rien liée à la géométrie de la structure étudiée, mais correspond à une fréquence de résonance propre à l'appareillage utilisé [1].

Précisons que l'interprétation des résultats a été facilitée, dans ces quatre cas, par la connaissance préalable des défauts à identifier. En effet, une campagne de carottages a précédé les mesures d'impact-écho.

Le dernier cas traité fournit quant à lui des résultats beaucoup plus mitigés. Les raisons invoquées, pour comprendre les difficultés d'interprétation des signaux obtenus, sont :

- d'une part, d'importantes variations des caractéristiques géométriques du tablier constatées d'une zone à l'autre ;
- d'autre part, une complexité non encore expliquée des signaux obtenus, avec la difficulté d'isoler des pics aux fréquences recherchées.

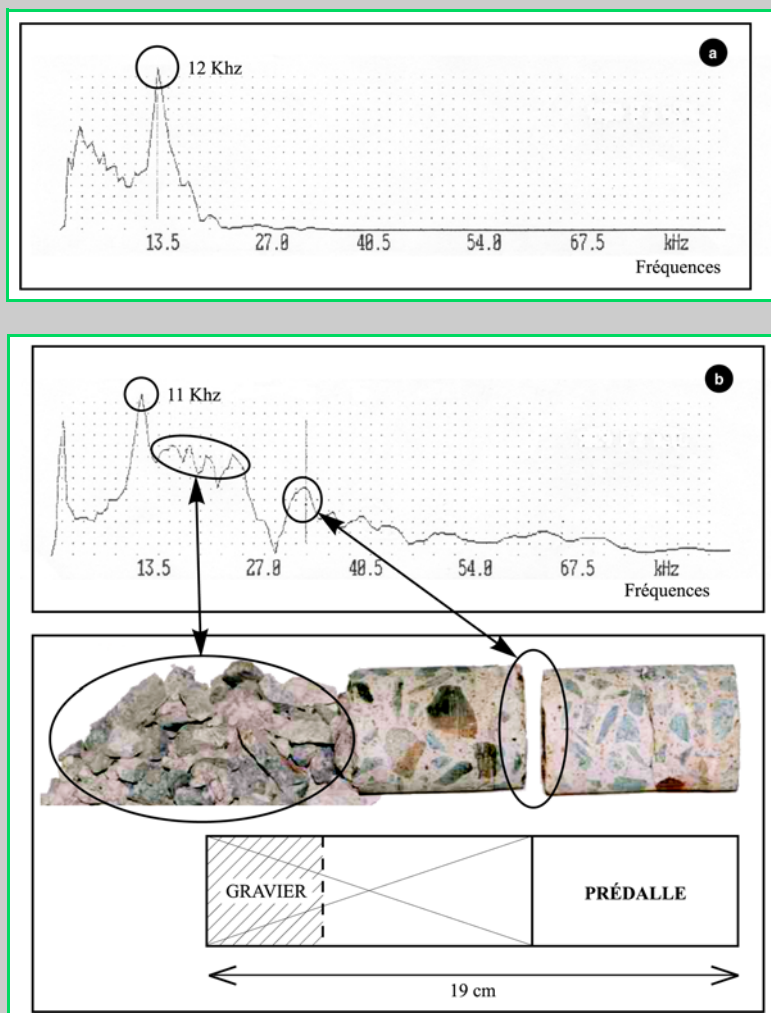
Des mesures complémentaires ont été réalisées à partir de la face supérieure du tablier, mais il n'a pas été possible d'établir de corrélation entre ces mesures et celles effectuées classiquement à partir de la face inférieure.

Défauts d'injection dans les câbles de précontrainte

L'interprétation des signaux obtenus dans cette famille d'applications pratiques s'est avérée pour le moins difficile. Différents paramètres peuvent être à l'origine des difficultés rencontrées :

- l'application de la méthode requiert une localisation préalable et précise du tracé du câble examiné, tâche qui n'est pas toujours aisée, à cause notamment de la densité de l'armaturage passif et de la profondeur du câble recherché. Pour les investigations futures, une démarche par mesures sur des profils sécants au tracé du câble sera testée. Cette méthode, qui a donné des résultats encourageants en laboratoire [3, 4], requiert une précision moindre pour la localisation préalable des câbles.

Fig. 9 - Exemple de spectres obtenus sur une même dalle de tablier.



a. Spectre obtenu au droit d'une zone saine.

b. Spectre obtenu au droit d'une zone dégradée.

- le rapport de la taille sur la profondeur du défaut est un paramètre qui conditionne le succès de la méthode. Par définition, les défauts d'injection sont de petites dimensions, ce qui limite la profondeur à laquelle ils sont repérables ;
- comme expliqué plus haut pour la dalle 1, la plus petite bille utilisée (diamètre = 0,5 cm) limite la détection à des vides de dimensions supérieures à 7 cm de côté. D'où l'intérêt porté à la recherche d'un décalage éventuel de la fréquence solide ;
- il n'est pas rare que la profondeur du câble soit variable sur son tracé. La fréquence associée est, en conséquence, elle aussi variable et donc difficile à identifier ;
- les armatures de peau peuvent générer des fréquences parasites dans le signal et compliquer son interprétation.

Dans ce contexte, les résultats obtenus jusqu'à présent se sont avérés peu concluants.

Localisation de vides divers

Cette famille regroupe toute une série d'applications ponctuelles et variées pour lesquelles le point commun est la localisation de vides.

Il s'agit notamment :

- de la localisation d'alvéoles au sein de dalles caissons (vides d'environ 50 cm de diamètre, situés à 25 cm de profondeur) ;

- de l'étude d'une zone de tablier au droit de laquelle on repère d'importants écoulements d'eau (au droit d'un chemin de câbles de diamètre 10 cm non étanche) ;
- de l'examen de colonnes creuses de 80 cm de côté, avec coffrage perdu circulaire (diamètre = 60 cm) pour lesquelles on suspecte un décentrement de ce dernier, etc.

Globalement, la méthode a donné satisfaction, avec toutefois quelques incertitudes sur la précision et l'interprétation de certains résultats.

Un des problèmes rencontrés, pour lequel des solutions de traitement sont actuellement à l'étude, concerne les fréquences de résonance relatives à une mise en vibration de la zone étudiée (zone de faible épaisseur). L'amplitude de ces fréquences est telle qu'elle ne permet pas toujours d'isoler sur le spectre les fréquences caractérisant les épaisseurs recherchées.

Développements

Le lecteur a pu se rendre compte de la difficulté que peut représenter l'analyse d'un signal complexe. L'unique graphe amplitude-fréquence ne permet pas toujours d'en tirer les bonnes conclusions : c'est pourquoi le développement d'outils informatiques permettant d'intégrer d'autres critères pourrait se révéler utile. Deux approches sont envisagées :

- *L'amortissement du signal* : dans un milieu homogène, sans défaut, on comprend que l'amortissement du signal qui est réfléchi de nombreuses fois aux extrémités d'une structure puisse être moins important que celui qui est mesuré dans une zone où des défauts tels que des nids de gravier, des vides ou des plans de fissuration puisent une partie de l'énergie de l'onde. L'idée est donc d'isoler dans le signal une étroite bande de fréquence centrée sur la fréquence solide et de comparer l'amortissement du signal temps obtenu.
- *Les ondelettes (wavelets)* : cette technique, apparue dans les années 80, pourrait constituer un outil performant dans l'interprétation fréquentielle du signal. Elle permettrait la mise en évidence des fréquences caractéristiques et d'apprécier leur récurrence sur le signal temporel. La difficulté de la technique réside entre autres dans le bon choix de l'ondelette. Elle doit être proche du signal généré par l'impact-écho et respecter aussi plusieurs conditions mathématiques.

Afin de pouvoir utiliser ces techniques *in situ*, le développement d'un nouveau logiciel d'acquisition de signal et d'analyse est envisagé.

Conclusions

L'expérience acquise par la Direction de l'Expertise des structures sur l'utilisation de l'impact-écho a permis de dégager divers enseignements sur la façon de réaliser l'auscultation d'une structure, sur l'analyse du signal et sur les cas pratiques pour lesquels la méthode peut s'avérer utile.

Préalablement à toute mesure, il convient de rappeler la nécessité d'une préparation minutieuse, notamment dans l'analyse des plans de l'ouvrage ausculté, dans la localisation des éléments caractéristiques et dans le calcul des fréquences particulières.

L'analyse du signal en fréquence peut s'avérer complexe et requiert une indispensable expérience. Cette technique d'auscultation ne s'avérera donc rentable qu'après un important investissement en formation du personnel amené à l'utiliser.

De nombreux facteurs limitent l'applicabilité de la méthode à certains cas pratiques. Les structures auscultées ne doivent pas être trop complexes, les défauts recherchés ni trop petits ni trop loin de la surface ; enfin, le maillage choisi limitera parfois la surface que l'on pourra étudier. Pratiquement, les résultats obtenus sont plus encourageants pour la détection de nids de gravier et de vides ou pour le diagnostic d'un « pourrissement de béton » que dans l'investigation des gaines de câbles précontraints.

Les recherches et développements en cours, notamment pour améliorer l'outil d'analyse du signal, témoignent des attentes et des espérances placées dans cette technique d'auscultation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SANSALONE M., STREET W.B., Impact-echo : Nondestructive testing of concrete and masonry, *Bulbrier Press*, Ithaca, N.Y., USA, **1997**, 339 pages.
- [2] JAEGER J.B., SANSALONE M., Poston R.W., Detecting voids in grouted tendon ducts in post-tensioned concrete structures using Impact-echo method, *ACI Structural Journal*, vol. 93, **4**, **1996**, pp. 462-473.
- [3] ABRAHAM O., CÔTE Ph., Impact-echo thickness frequency profiles for the detection of voids in tendon ducts, *ACI Structural Journal*, vol. 99, **33**, mai-juin **2002**, pp. 239-247.
- [4] ABRAHAM O., CÔTE Ph., Impact-écho basse fréquence : pour la détection de vide dans les gaines de précontrainte, *Contrôles-Essais-Mesures*, juillet **2002**, pp. 56-61.