

## Partie 3 – Structures & Monitoring

# APPLICATION COMPARATIVE DE LA TECHNIQUE MICRO-SISMIQUE ET DE LA TECHNIQUE D'IMPACT- ÉCHO À L'AUSCULTATION DES DALLES EN BÉTON

## COMPARATIVE APPLICATION OF MICRO-SEISMIC TECHNIQUE AND IMPACT-ECHO TECHNIQUE ON AUSCULTATION OF CONCRETE SLABS

**J. L. GALLIAS\*, N. RENAULT, P. PLIYA**

Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC),  
Université de Cergy-Pontoise

5 mail Gay Lussac, Neuville sur Oise, 95031 CERGY-PONTOISE Cedex

\* auteur correspondant : jean-louis.gallias@u-cergy.fr

### RÉSUMÉ

*L'étude concerne l'auscultation des dalles en béton armé de l'aire de stationnement d'avions de l'aéroport du Bourget dans le cadre d'une collaboration avec Aéroports de Paris (ADP). Les caractéristiques mécaniques du béton et l'épaisseur de ces dalles, âgées de plusieurs décennies, n'étaient pas connues et une fissure importante était présente sur une d'entre elles. La technique micro-sismique et la technique d'impact-écho ont été employées de manière combinée et étudiées de manière comparative lors de l'auscultation. La technique micro-sismique a permis de déterminer l'épaisseur des dalles avec la précision du centimètre en s'affranchissant de certaines hypothèses sur les caractéristiques acoustiques du béton, nécessaires à la détermination de l'épaisseur des dalles par la technique d'impact-écho. De plus, elle a permis de caractériser la*

*qualité du béton par l'estimation du module d'élasticité dynamique et aussi de discriminer sans ambiguïté une fissuration profonde d'une fissuration superficielle offrant ainsi une information beaucoup plus consistante que la technique d'impact-écho sur l'intégrité mécanique des éléments auscultés. En revanche, la rapidité et la simplicité de la technique d'impact-écho, peut être exploitée judicieusement afin d'évaluer la fluctuation locale des caractéristiques géométriques ou mécaniques des dalles.*

### ABSTRACT

*This study concerns auscultation of concrete slabs on the planes parking of le Bourget airport in the frame of collaboration with Aéroports de Paris company (ADP). Constructed since several decades, concrete properties*

and slabs thickness were unknown and one of the slabs presented important cracking. For auscultation, micro-seismic technique and impact-echo technique were employed together and comparatively. Results show that micro-seismic technique determines slabs thickness with accuracy of centimeter without any hypothesis on acoustic properties of concrete, necessary in the case of impact-echo technique. Moreover, micro-seismic technique characterizes concrete's quality on the base of Yang modulus and distinguishes well superficial and deep cracking, giving by this way more consistent information then impact-echo technique on mechanical integrity of tested element. In return the simplicity and swiftness of impact-echo and can be exploited judiciously for assessing local variation of geometrical and mechanical characteristics of slabs.

**Mots-clés :** CND, acoustique, micro-sismique, impact-écho, béton, dalle

\* \* \*

## 1. INTRODUCTION

La connaissance des caractéristiques géométriques et mécaniques des ouvrages en béton armé est indispensable pour une évaluation préalable à toute opération de maintenance ou de réhabilitation. Or, souvent, les maîtres d'ouvrage ne disposent pas les informations nécessaires, surtout lorsque les ouvrages sont relativement anciens. Disposer des outils de caractérisation fiables, faciles à mettre en œuvre et, dans la mesure du possible, non destructifs répond donc à un vrai besoin compte tenu du nombre d'infrastructures en béton armé vieillissantes. Les techniques acoustiques présentent beaucoup d'avantages pour répondre à ce défi car elles sont totalement non destructives et permettent de relier directement la propagation des ondes aux caractéristiques mécaniques principales du matériau [1].

Pour contribuer au développement des techniques acoustiques dans le diagnostic d'ouvrages nous avons mis en œuvre au Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise une méthodologie originale qui combine deux techniques acoustiques complémentaires, la technique la technique micro-sismique et

celle d'impact-écho, permettant d'évaluer, d'une part, l'épaisseur de l'élément en béton ausculté et, d'autre part, la qualité du béton sur la base de son module d'élasticité dynamique. Cette méthodologie permet aussi d'identifier les éventuels défauts compromettant l'intégrité mécanique de l'élément ausculté.

La technique micro-sismique est une technique acoustique, entièrement non destructive, qui trouve déjà des nombreuses applications dans plusieurs secteurs tels que la géophysique, la construction navale, la chaudronnerie... Elle s'appuie sur l'analyse fréquentielle de la propagation des ondes de surface (les ondes de Raleigh et les ondes de Lamb) suite à un impact mécanique [2, 3]. Elle utilise un équipement relativement simple et peu coûteux qui peut facilement être transporté et mis en œuvre sur les ouvrages. Les mesures ont lieu sur une face libre de l'élément ausculté. Malgré ces avantages, son application au diagnostic des ouvrages en béton armé reste encore très limitée. En revanche, la technique d'impact-écho, basée aussi à l'analyse de la propagation des ondes suite à un impact mécanique, trouve depuis longtemps un champ d'application fertile au diagnostic des ouvrages en béton armé [4, 5, 6, 7].

L'application in situ de cette méthodologie fut effectuée en collaboration avec les Aéroports de Paris, à l'aéroport du Bourget sur des dalles de l'aire de stationnement d'avions. Les conditions de fabrication des dalles étaient inconnues. Ces travaux ont donné des résultats probants et convaincants et ont permis de répondre pleinement aux besoins de connaître les caractéristiques de ces structures.

## 2. PRÉSENTATION DES TECHNIQUES ACOUSTIQUES UTILISÉES

La technique impact-écho (IE) consiste à mettre en vibration l'épaisseur totale d'une structure en béton (dalle), ou au moins jusqu'à une éventuelle discontinuité, par un impact mécanique (par un bille d'acier de 3 mm de diamètre). Le matériel utilisé est décrit en [8]. Cette onde se propage et se réfléchit sur la surface libre la plus proche de l'impact (figure 1). Une transformée de Fourier temporelle du signal réfléchi permet de déterminer de la fréquence de

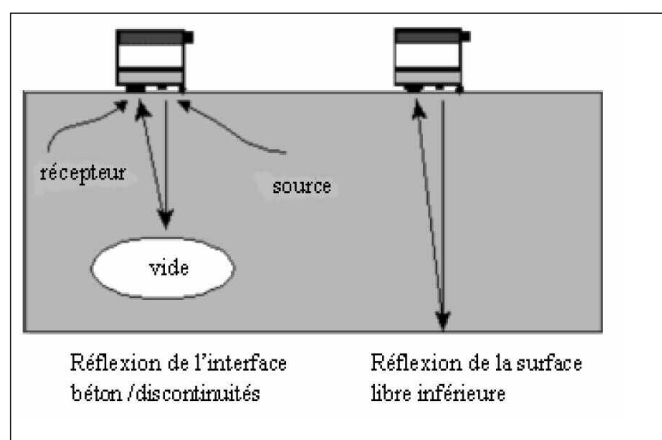


Figure 1 : Principe de la technique Impact-Écho

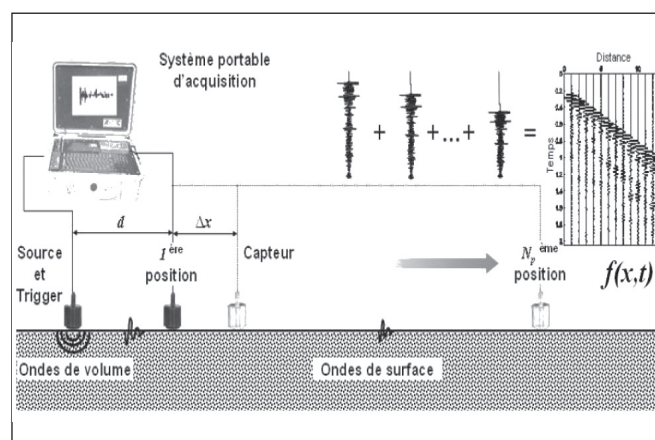


Figure 2 : Principe de la technique Micro-Sismique

résonance de la dalle. Cette mesure est une information locale et permet de repérer des hétérogénéités d'épaisseur ou des possibles discontinuités (fissures, vides, délaminations,...) dans le sens parallèle à la surface auscultée de la dalle.

La technique micro-sismique (MS) consiste à acquérir des signaux à différentes distances de l'impact, le long d'une ligne d'étude (fréquence d'échantillonnage : 200 KHz, pas de mesure : de 10 à 20 cm). Cela peut être effectué de deux façons : i) Avec une source fixe en déplaçant le capteur

(figure 2), ii) Avec un capteur fixe en déplaçant le point d'impact. L'ensemble de ces sismogrammes permet de constituer une trace sismique de la propagation des ondes de surface le long de la ligne d'étude en fonction du temps et de la distance à l'impact  $f(x,t)$ . Cette mesure est une information globale et permet d'évaluer l'intégrité mécanique de la dalle et le rôle des éventuelles discontinuités dans le sens perpendiculaire à la surface libre (fissures, reprises de bétonnage...). Le dispositif d'acquisition utilisé pour les mesures est décrit en [9, 10, 11].

$$\begin{array}{lcl} V_p = 2fh/\beta & (1) & \left| \begin{array}{ll} \rho & \text{Masse volumique du béton} \\ f & \text{Fréquence de résonance} \end{array} \right. \\ E_{dyn} = \rho V_p^2 \alpha & (2) & \left| \begin{array}{ll} \beta & \text{Facteur de forme [12]} \\ \alpha & \text{Facteur dépendant du} \\ & \text{coefficient de Poisson } \nu \end{array} \right. \\ h & \text{Épaisseur du béton} & \end{array}$$

## 2.1. Analyse des mesures d'Impact-Écho (IE)

Cette technique nécessite une information préalable. En effet, la connaissance de la fréquence de résonance d'une dalle homogène ne permet pas de déterminer le module d'élasticité dynamique et l'épaisseur de cette dalle (ces deux grandeurs sont corrélées comme le montrent les formules précédentes) sauf si différents modes de vibration de la dalle sont identifiables [6]. Dans le cas où une seule fréquence est identifiable, il est nécessaire d'avoir accès à l'une des deux valeurs recherchées pour déterminer l'autre et supposer aussi une valeur représentative de la masse volumique du béton (2300 kg/m<sup>3</sup>) et de son coefficient de Poisson (0,21) :

- 1<sup>er</sup> cas : l'épaisseur de la dalle de béton est connue, on détermine le module d'élasticité dynamique  $E_{dyn}$ .
- 2<sup>e</sup> cas : l'épaisseur de la dalle de béton n'est pas connue, on suppose une certaine vitesse de propagation des ondes  $V_p$  dans le béton (généralement autour de 3500~4000 m/s) et on estime le module élasticité dynamique et l'épaisseur.

## 2.2. Analyse des mesures Micro-sismique (MS)

L'analyse de la trace sismique  $f(x,t)$  s'effectue dans le domaine spectral. Après avoir effectué deux transformées de Fourier sur les signaux (une temporelle, l'autre spatiale), les pics de résonance de la dalle sont présentés dans le diagramme « fréquence  $f$  -vitesse de phase  $V_{ph}$  ». Les pics expérimentaux ainsi obtenus sont à rapprocher d'une modélisation de la vibration d'une dalle homogène de longueur infinie d'épaisseur connue  $h$  et de module d'élasticité dynamique connu  $E_{dyn}$ . Cette approche théorique est basée sur la propagation des ondes mécaniques dans un milieu continu faisant vibrer la dalle suivant deux modes : les modes symétriques et les modes antisymétriques (figure 3).

Sur le plan formel, cette approche consiste à résoudre deux équations transcendantes permettant de déterminer la vitesse de phase de résonance pour une fréquence temporelle donnée

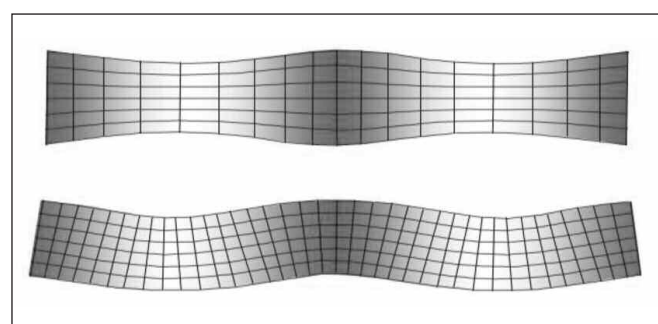


Figure 3 : Modes théoriques de résonance d'une dalle : en haut symétrique en bas antisymétrique

en tenant compte de l'absence de contrainte sur les surfaces libres de la dalle. Comme décrit en figure 4, une résolution d'un problème inverse et la minimisation d'une distance entre les modes expérimentaux et théoriques [13] permettent de déterminer l'épaisseur et le module d'élasticité dynamique de la dalle étudiée (sans hypothèse préalable, contrairement à la technique impact-écho, à l'exception de la masse volumique et du coefficient de Poisson).

## 3. ÉTUDE DES DALLES SANS DÉFAUTS MAJEURS APPARENTS

L'application in situ de la méthodologie proposée fut effectuée en collaboration avec Aéroports de Paris, à l'aéroport du Bourget sur plusieurs dalles de l'aire de stationnement d'avions dont les conditions de fabrication étaient inconnues. Plusieurs lignes d'études ont été auscultées sur chaque dalle. Dans cet article, on se limitera à présenter les résultats obtenus sur deux dalles avec une ligne d'auscultation par dalle :

- dalle A de 7,2m x 6,5m sans défaut majeur apparent à l'exception d'un léger faïençage en surface dû probablement à la dessiccation de béton au jeune âge,
- dalle B de 4,5 m x 4,5 m sans aucun défaut apparent.

La figure 5 présente les résultats obtenus sur la dalle A. À noter que sur les sismogrammes, nous présentons des signaux normés ce qui efface toute atténuation dû à la distance à l'impact.

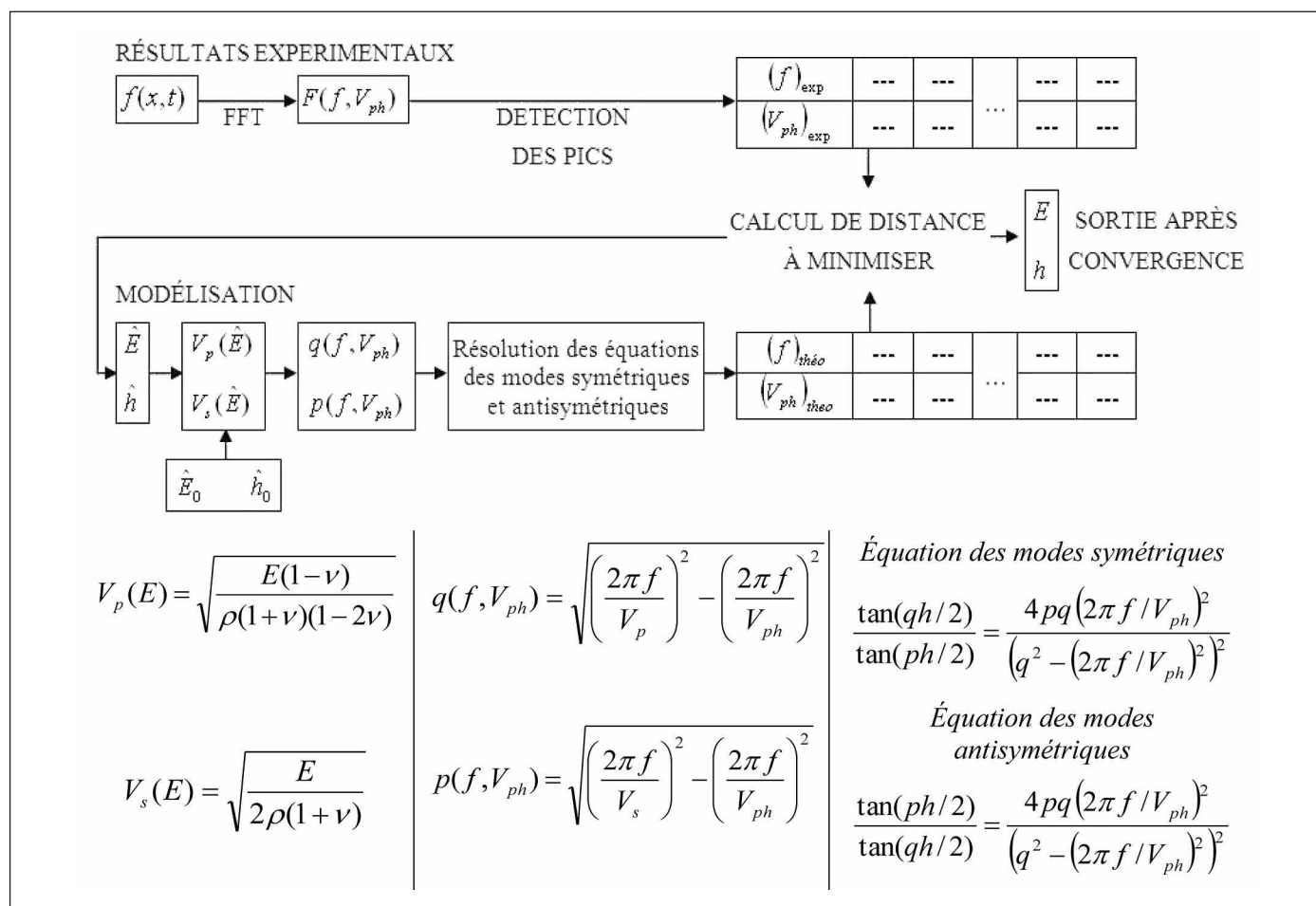


Figure 4 : Algorithme d'analyse de la technique MS avec ces formules principales

L'analyse des résultats MS (figure 5b) permet de conclure que l'épaisseur de la dalle A est de  $30 \pm 1$  cm et que son module d'élasticité dynamique est de  $46 \pm 1$  GPa. Ces résultats ont été confirmés sur d'autres lignes de mesure de la même dalle. Afin de valider notre résultat, on utilise la technique impact-écho (figure 5c) en y injectant l'une des deux informations (ici le module d'élasticité) comme une donnée préalable. Le calcul de l'épaisseur effectué à partir de la fréquence de résonance moyenne de la dalle confirme le résultat de la technique MS. Pour la dalle B, nous avons bénéficié du fait que l'équipe de maintenance de l'aéroport du Bourget procédait à des destructions/réhabilitations des

dalles sur une autre partie de l'aire de stationnement dont l'épaisseur était de  $25 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ . L'auscultation de la dalle B donne les résultats présentés sur la figure 6.

L'analyse des résultats MS (figure 5b) permet de conclure que l'épaisseur de la dalle B est de  $25 \pm 1$  cm et que son module d'élasticité dynamique est de  $48 \pm 1,5$  GPa. Ces résultats ont été confirmés sur d'autres lignes de la même dalle. Sur le même principe que celui utilisé pour la dalle A, nous avons injecté la valeur de l'épaisseur dans la technique IE et nous avons déduit une valeur du module d'élasticité tout à fait comparable de celle donnée par la technique MS.

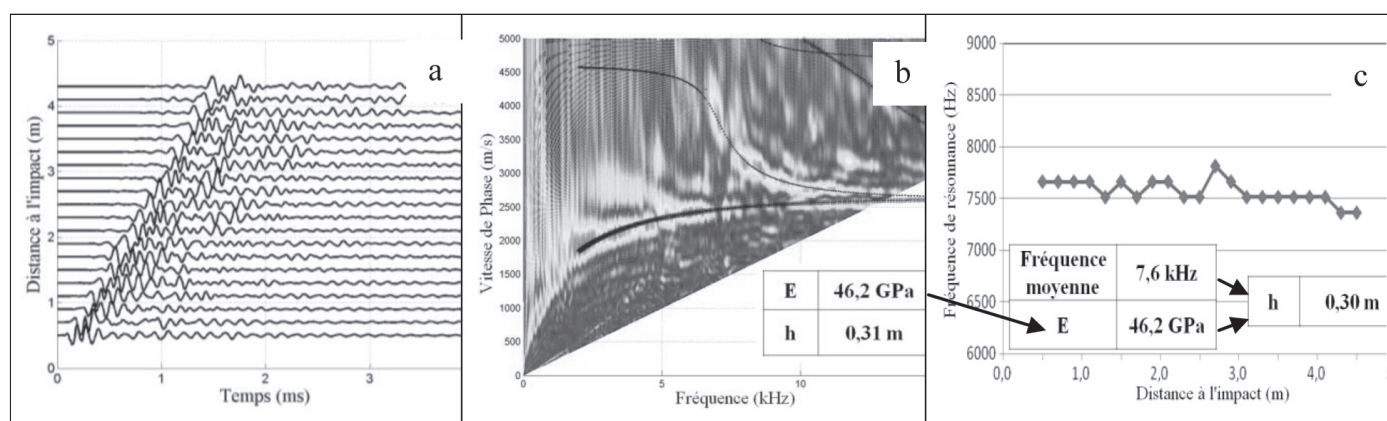


Figure 5 : Résultats expérimentaux sur la dalle A : (a) Sismogrammes MS, (b) Diagramme « fréquence-vitesse de phase », (c) Fréquence de résonance IE le long de la ligne d'étude



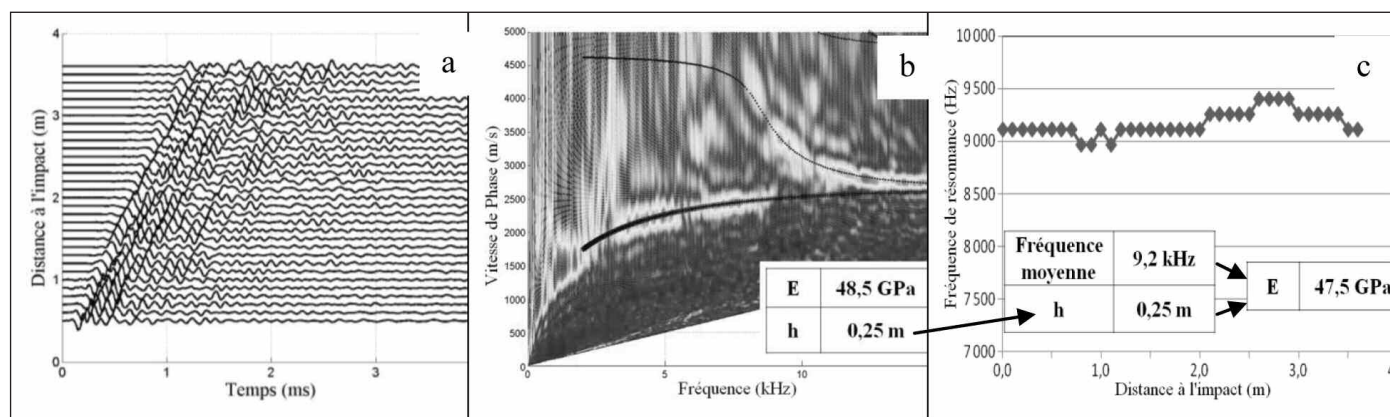


Figure 6 : Résultats expérimentaux sur la dalle B : (a) Sismogrammes MS, (b) Diagramme « fréquence-vitesse de phase », (c) Fréquence de résonance IE le long de la ligne d'étude

#### 4. ETUDE DE LA SENSIBILITÉ DE LA TECHNIQUE MS

Afin de vérifier la sensibilité à déduire une épaisseur et un module d'élasticité à partir des mesures MS, nous avons illustré sur la figure 7a les modes théoriques concordant avec les résultats expérimentaux de la dalle A ainsi que les modes théoriques correspondant à une variation d'épaisseur de  $\pm 5$  cm pour le même module d'élasticité. De même, sur la figure 7b, nous avons illustré les modes théoriques concordant avec les résultats expérimentaux de la même dalle ainsi que les modes théoriques correspondant à une variation du module d'élasticité de  $\pm 5$  GPa pour la même épaisseur.

Une diminution de l'épaisseur a pour conséquence sur le tracé des modes théoriques une « dilatation » du diagramme dans le sens des fréquences alors qu'une augmentation du module d'élasticité génère une « dilatation » du diagramme selon la première bissectrice (aussi bien dans le sens des fréquences que dans le sens des vitesses de phase). Cette différence d'évolution du tracé des modes théoriques

suivant les variations des deux paramètres nous assure une non-corrélation lors de l'identification des paramètres.

Par ailleurs, on voit sur les figures 7a et 7b l'importance du premier mode symétrique pour déterminer de manière satisfaisante les deux paramètres de la dalle. Si les résultats ne permettent pas de visualiser le premier mode symétrique alors l'incertitude sur l'évaluation de l'épaisseur dépassera l'ordre du cm et celle sur l'évaluation du module d'élasticité dépassera l'ordre du GPa.

#### 5. ETUDE DES DISCONTINUITÉS

Nous nous sommes enfin intéressés au problème des discontinuités et nous avons effectuée deux auscultations complémentaires :

- Dalle C de 7,2m x 6,8m où une fissure importante, de 1mm d'ouverture, traverse la ligne d'étude et progresse sur une partie importante de la largeur de la dalle (figure 8a).
- Reprise de bétonnage entre deux dalles contigües de dimension chacune 4,5m x 4,5m (figure 8b).

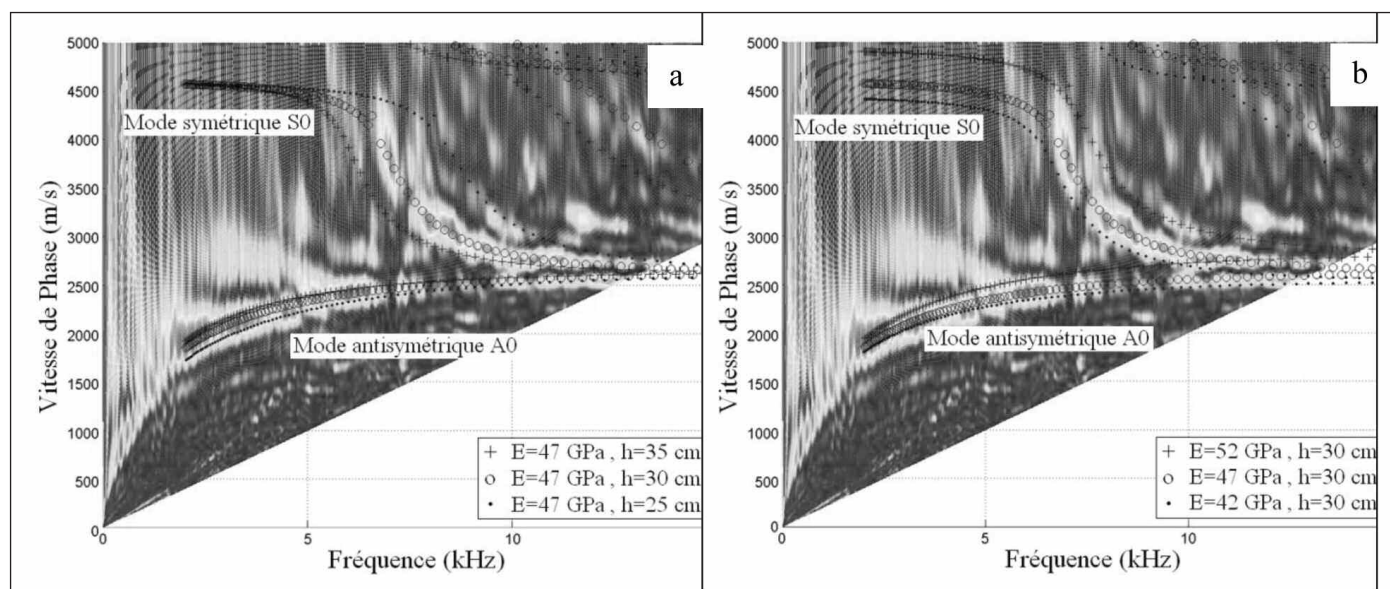


Figure 7 : Etude de la sensibilité aux paramètres : (a) Variation de l'épaisseur, (b) Variation du module d'élasticité dynamique

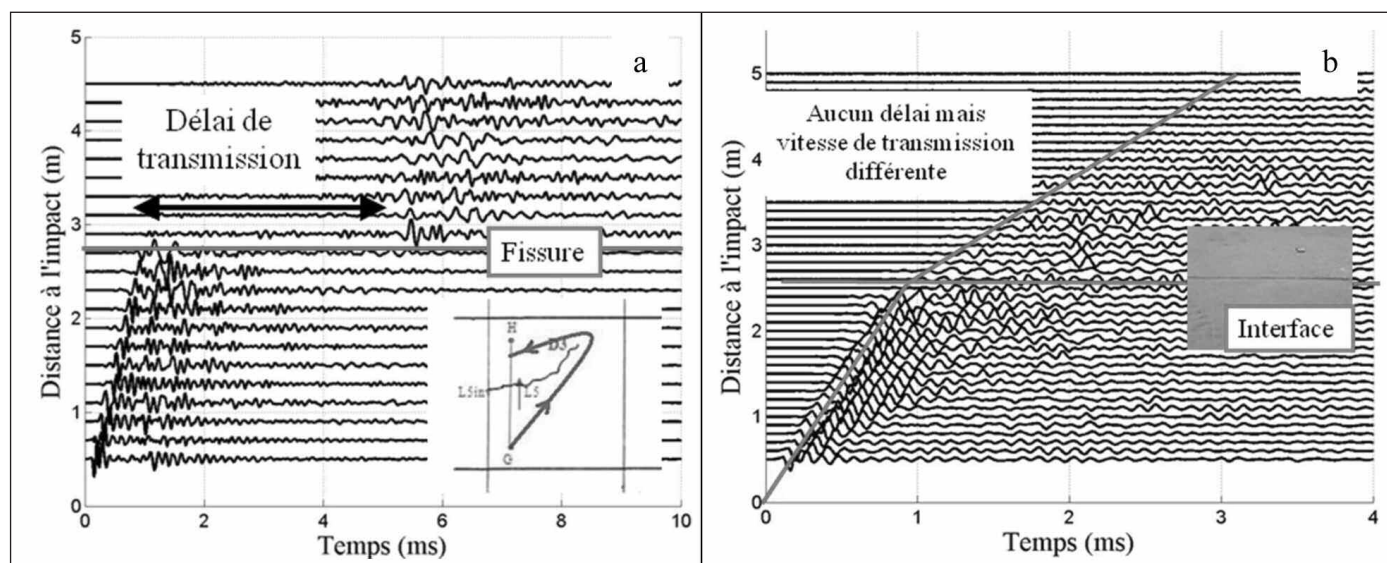


Figure 8 : Sismogrammes de l'auscultation des discontinuités : (a) Étude de la fissure de la dalle C, (b) Étude de l'interface inter-dalle

Comme précédemment, les sismogrammes sont présentés avec des signaux normés ce qui efface toute atténuation due à la présence de la discontinuité. Les signaux après les discontinuités sont en effet très fortement atténués.

On remarque en premier lieu la différence de comportements acoustiques en fonction du type de discontinuité. Les sismogrammes de la dalle fissurée (figure 8a) après la fissure présente un retard de transmission des signaux d'environ 4 ms, indépendamment de la distance des capteurs par rapport au point d'impact. Ce délai corrobore le temps nécessaire pour que l'onde de surface contourne la fissure et les ondes de surface arrivent presque perpendiculairement sur la ligne de mesure, après la fissure. On peut conclure que la fissure traverse toute l'épaisseur de la dalle car les ondes n'ont pas d'autre choix que de contourner la fissure pour exciter le milieu après fissure. Ce comportement est complètement différent de celui de la dalle A caractérisée par d'un léger faïençage en surface qui de toute évidence reste superficiel et n'affecte pas l'intégrité du comportement mécanique de la dalle.

Sur la figure 8b, l'étude de l'interface (qui correspond à une reprise de bétonnage) entre deux dalles amène à des constatations tout autres. On remarque sur ces sismogrammes une variation de la vitesse de transmission lors du passage de l'interface. Pour passer, l'onde doit parcourir un chemin plus long que la simple ligne droite en surface. On peut supposer qu'elle emprunte un chemin dans l'épaisseur, là où la reprise de bétonnage permet une liaison mécanique entre les deux dalles. On peut conclure que les dalles contigües possèdent un contact assurant la continuité en profondeur.

## 6. CONCLUSIONS

Nos résultats montrent que la technique micro-sismique est un puissant outil d'évaluation non destructive des caractéristiques géométriques et mécaniques des éléments plats en béton armé.

Dans le cas des dalles auscultées, cette technique a permis de déterminer leur épaisseur au cm près et le module d'élasticité du béton au GPa près sans recours à des hypothèses spécifiques sur les propriétés acoustiques du béton mais uniquement sur la masse volumique et le coefficient de Poisson qui normalement restent dans des domaines de valeurs relativement restreints.

Cette technique a permis aussi de discriminer efficacement différents types de discontinuités dans le béton, tels que les fissures superficielles par rapport à celles traversant toute l'épaisseur de la dalle ou les reprises de bétonnage présentant une liaison mécanique à partir d'une certaine profondeur. Elle offre ainsi un aperçu global sur l'intégrité mécanique de l'élément ausculté dans son ensemble, associé à la qualité du béton exprimée par le module d'élasticité dynamique moyen.

La technique impact-écho offre de possibilités beaucoup plus restreintes, étant donné qu'elle est beaucoup moins sensible aux discontinuités présentes dans le sens de la profondeur et qu'elle nécessite des hypothèses sur les caractéristiques acoustiques du béton afin de déterminer, soit l'épaisseur, soit le module d'élasticité du béton dans la plupart des cas.

Toutefois, cette technique peut devenir un outil complémentaire très intéressant de la technique micro-sismique dans la mesure où elle permet de vérifier, d'une part, la cohérence des résultats obtenus par la technique micro-sismique et, d'autre part, les fluctuations locales de l'épaisseur ou du module d'élasticité dynamique de l'élément ausculté grâce à la rapidité de mesure et de traitement rendant facile la multiplication des mesures.

## RÉFÉRENCES

- [1] AFGC (sous la direction de Breysse D., Abraham O.), Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton, Presses des Ponts et Chaussées 2005.

- [2] Al Wardany R., Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb, Mémoire de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise - Université de Sherbrooke, 2005.
- [3] Al Wardany et als, Assessment of concrete slab quality and layering by guided and surface wave testing, *ACI Materials Journal*, Vol.104, N°3, 2007, pp. 268-275.
- [4] Sansalone M.J., Carino N.J., A method for flaw detection in concrete using transient stress waves, National Bureau of Standards, Rep. No. NBSIR 86-3452, Gaithersburg, Md, 1986.
- [5] Sansalone M.J., Streeth W.B., Impact-echo non-destructive evaluation of concrete and masonry, Bullbrier Press, 1997.
- [6] Villain G. et als, Durability diagnosis of a concrete structure in a tidal zone by combining NDT methods: Laboratory and case study, *Construction and Building Materials*, Vol. 37, 2012, pp 893-903.
- [7] Garnier V., et als, Acoustic techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistency, *Construction and Building Materials*, Vol. 43, 2013, pp 598-613.
- [8] [http://www.olsoninstruments.com/pdf\\_downloads/catOI\\_ie.pdf](http://www.olsoninstruments.com/pdf_downloads/catOI_ie.pdf)
- [9] <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4518003.aspx>
- [10] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/209541>
- [11] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/207401>
- [12] Royer D., Clorennec D., Prada C., Caractérisation de plaques et de tubes par modes de Lamb à vitesse de groupe nulle, *Méthodes innovantes en CND, Instrumentation Mesure et Métrologie* Vol. 10, 2010, pp. 73-94.
- [13] D. W. Marquardt, An algorithm for least-squares estimation of non linear parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11, N°2, 1963, pp 431-441.