

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Localisation des bruits de pas dans les dalles béton

H. Dujourdy et R. Kiri Ing

ESPCI Paris, PSL University, CNRS, Institut Langevin, 1 rue Jussieu, F-75005 Paris, France
hugo.dujourdy@gmail.com

La localisation d'impacts par reconnaissance de signatures acoustiques est une technologie introduite dans les années 2000 à l'Institut Langevin et se distingue des autres approches de type absorption d'ondes de Rayleigh et triangulation par l'utilisation d'un seul capteur. Les applications à la détection de pas dans les dalles béton sont multiples : détection de présence, mesures de flux piétonniers, contrôle à distance, domotique ou encore aide à la motricité.

Le système fonctionne par détection des ondes de Lamb antisymétriques, principale forme d'énergie acoustique se propageant dans la dalle béton. La localisation est basée sur deux principes fondamentaux : le retournement temporel permet de focaliser une onde sur le récepteur et le principe de réciprocité permet d'inverser l'émetteur et le récepteur.

Le protocole expérimental est le suivant : dans un premier temps nous discrétisons spatialement une surface et enregistrons les réponses impulsionnelles entre les points de cette surface et un récepteur. Dans un deuxième temps, nous comparons la réponse impulsionnelle d'un des points de la surface avec les réponses impulsionnelles enregistrées. La comparaison est réalisée grâce à la corrélation. Cette méthode d'imagerie acoustique correspond à une simulation de retournement temporel : les signaux obtenus par intercorrélation présentent une tache de focalisation d'autant plus forte que les réponses impulsionnelles sont similaires.

Les taches de focalisation obtenues présentent une largeur à -3dB correspondant aux résultats attendus par la loi de dispersion dans une cavité. Le rapport du maximum sur le niveau moyen, noté contraste, est théoriquement lié à la largeur de bande ce qui se retrouve bien dans nos résultats.

1 Introduction

Les techniques de focalisation et d'imagerie acoustique dans les plaques élastiques isotropes et homogènes sont largement utilisées aujourd'hui en recherche et en milieu industriel. L'utilisation des ondes de plaque de type Rayleigh-Lamb pour l'évaluation des coques minces est devenue populaire du fait de leur nature guidées [1] et d'une faible atténuation leur permettant de se propager sur de longues distances. Malheureusement, ce type d'ondes a un caractère dispersif empêchant leur utilisation pour la détection de défaut, sauf pour les premiers modes de propagation et pour une bande de fréquence restreinte. Pour un produit fréquence par épaisseur de plaque petit devant 1, seul les premiers modes symétrique et antisymétrique se propagent et leurs caractéristiques dispersives peuvent être utilisées à bon escient avec des techniques de retournement temporel [2].

Une émission impulsionnelle isotrope diverge à travers le milieu de propagation et est réfléchi, dispersée, diffusée et diffractée (on dit qu'elle est réverbérée). L'invariance par retournement temporel des ondes acoustiques ou vibratoires prédit qu'il existe en théorie une onde capable de remonter ce chemin complexe comme si elle remontait le temps, jusqu'à converger au point source de manière synchrone [3], créant une focalisation spatio-temporelle.

Depuis les années 1970, différentes technologies de localisation acoustique de sources dans les plaques ont été proposées comme la triangulation ou l'absorption des ondes de Rayleigh [4] mais nécessitent toutes un grand nombre de transducteurs [5]. Le retournement temporel a montré qu'il permettait de localiser des impacts sur des plaques [6] par comparaison de réponses impulsionnelles (RI) préalablement enregistrées. Le travail présenté ici reprend ce principe de localisation dans les plaques et le dimensionne pour les dalles béton. Dans un premier temps, nous présentons la technique de localisation par reconnaissance de signatures acoustiques, puis nous présentons la mise en œuvre expérimentale du système et discutons des résultats avant de conclure.

2 Reconnaissance de signatures acoustiques

2.1 Retournement temporel

Les propriétés d'invariance par retournement temporel de l'équation de propagation des ondes permettent de focaliser efficacement de l'énergie acoustique en s'adaptant au milieu de propagation. Le retournement temporel est une méthode auto-focalisante et peut être vu comme une technique de filtre adapté spatio-temporel en compensant les retards de phases entre plusieurs voies de mesures.

La cavité à retournement temporel [7] est une notion basée sur l'invariance par retournement temporel et sur l'équation de Huyghens-Helmholtz. L'idée est qu'il est possible de contrôler le champ de pression sur tout un volume contenu dans une surface fermée uniquement à partir du contrôle des conditions aux limites sur sa surface. La fig. 1 [8] permet de mieux saisir le principe. Au lieu de devoir imposer des conditions initiales dans tout le volume pour engendrer la solution retournée temporellement, il suffit d'émettre le champ au cours du temps uniquement sur la surface S qui délimite le volume V en fixant la pression p et son gradient [9].

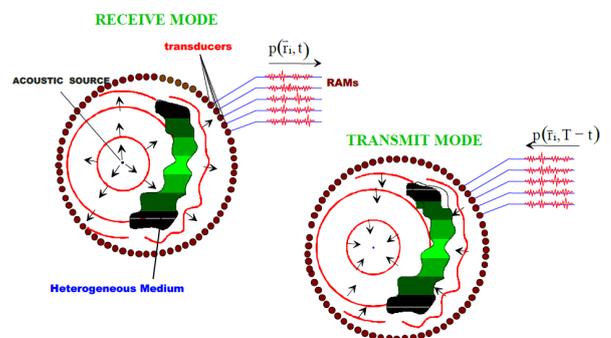


FIGURE 1 – Cavité à retournement temporel [8].

L'onde retournée temporellement se focalise à sa source originelle avec une tache de focalisation égale à $\frac{\lambda}{2}$, où λ est la longueur d'onde. Ce phénomène correspond à une limite

de diffraction.

D'un point de vue pratique, il est impossible d'utiliser une cavité à retournement temporel car cela nécessite un trop grand nombre de transducteurs. On réalise alors un miroir à retournement temporel sous la forme d'une cavité fermée, ergodique et sans absorption : le présent travail simule un miroir à retournement temporel dans une dalle béton.

2.2 Simulation d'un miroir à retournement temporel

Dans une cavité fermée, ergodique et sans absorption, une expérience de miroir à retournement temporel peut être effectuée avec un seul capteur. L'expérience consiste à enregistrer une impulsion à travers la cavité d'une position source à une position récepteur. L'impulsion va se propager et se réverbérer dans la cavité : elle va être diffusée, réfractée, dispersée et réfléchi, mais il existe en théorie une onde capable de remonter précisément ce cheminement complexe jusqu'à converger spatialement et temporellement vers le point source comme si elle remontait le temps. Cette onde est le retourné temporel de l'onde enregistrée réémise au point de réception.

De plus, d'après le principe de réciprocité considérant que le cheminement est le même depuis la source vers le récepteur ou depuis le récepteur vers la source, cette onde peut être réémise depuis son point d'émission et venir focaliser au point d'enregistrement.

On assiste alors à une focalisation spatio-temporelle, comme on peut l'observer sur la fig. 2 [2] représentant la mesure d'un pic de focalisation d'une onde de flexion guidée dans une plaque de silicone, dont le mode de propagation antisymétrique d'ordre 0 est formé par l'interférence et la conversion de modes d'onde longitudinales et transverse lors de leur réflexion sur les bords horizontaux de la plaque.

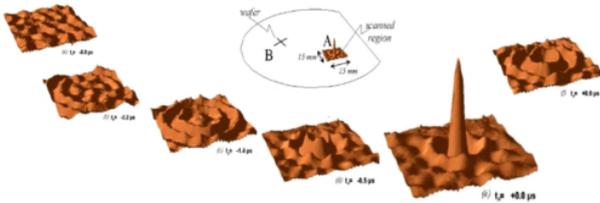


FIGURE 2 – Focalisation d'une onde de flexion A0 dans une plaque de silicone [2].

2.3 Tache de focalisation

Dans un milieu faiblement hétérogène, la largeur de la tache focale est donnée dans l'approximation de Fresnel par $\frac{\Delta F}{D}$ où F est la distance entre le miroir et la source initiale et D la dimension du miroir. L'onde recréée focalisera de manière d'autant plus précise que le milieu est réverbérant car les multiples réflexions permettent d'augmenter l'ouverture apparente du miroir en créant des capteurs et des actionneurs virtuels [2]. De même, la dispersion est un paramètre limitant pour les méthodes classiques d'imagerie mais ici le caractère auto-focalisant et auto-adaptatif du retournement temporel entraîne une amélioration de la focalisation dans un milieu très dispersif [10].

Lors de la focalisation, une partie de l'onde continue à

converger tandis que l'autre partie commence à diverger : l'interférence de ces deux ondes crée un pic principal entouré d'oscillations. La largeur caractéristique de cette tache focale est au mieux de $\frac{\lambda}{2}$ ce qui correspond à une limite de diffraction liée par exemple à la non reproduction des ondes évanescentes.

3 Mise en œuvre expérimentale

3.1 Implémentation numérique

Le principe de retournement temporel est exploité pour la localisation d'impacts sous la forme d'un produit d'intercorrélation $C_{ij,1}$ noté dans le domaine fréquentiel (dans la suite du document, on omet la dépendance en fréquence) entre le capteur de fonction de transfert S_1 à la position 1 et les impacts de fonction de transfert P_i et P_j , où les indices i et j sont les positions sur un maillage constituant la zone de localisation ou zone tactile, comme le présente le diagramme en bloc de la fig. 3.

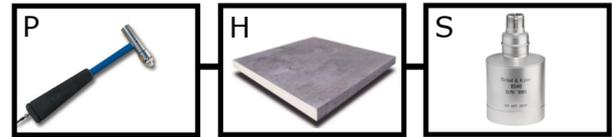


FIGURE 3 – Diagramme en bloc représentant la convolution des fonctions de transfert de chaque élément lors de la mesure d'un impact P sur un milieu H avec un capteur S .

Les coefficients de corrélation $C_{ij,1}$ sont donnés par le produit d'intercorrélation :

$$C_{ij,1} = P_i H_{i,1} S_1 (P_j H_{j,1} S_1)^* \quad (1)$$

où $*$ est le complexe conjugué et $H_{i,1}$ la fonction de transfert du milieu entre le point d'émission i et le point de réception 1. Lorsque les positions d'impact sont les mêmes, i.e. $i = j$, le produit d'intercorrélacion est maximum :

$$C_{ii,1} = |P_i|^2 |H_{i,1}|^2 |S_1|^2 \quad (2)$$

A l'aide d'un second capteur S_2 , on supprime l'information de phase de l'impact [11] :

$$C_{i,12} = |P_i|^2 H_{i,1} H_{i,2}^* S_1 S_2^* \quad (3)$$

Et finalement

$$\begin{aligned} C_{ij,12} &= C_{i,12} C_{j,12}^* \\ &= |P_i|^2 |P_j|^2 H_{i,1} H_{j,1}^* H_{i,2}^* H_{j,2} |S_1|^2 |S_2|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

On constate d'après l'Eq. (4) que l'utilisation d'un second capteur permet aux coefficients de corrélation $C_{ij,12}$ résultant du produit d'intercorrélacion entre deux positions de capteurs 1 et 2 et deux positions de sources i et j d'être indépendants des phases du capteur et de la source. Ce dernier point nous permet de s'affranchir du type de signal émis et de considérer tout choc sur la dalle, notamment les bruits de pas de personnes quelque soit la morphologie, la démarche ou le type de chaussure.

3.2 Processus et matériel de mesure

Le processus de mesure consiste dans un premier temps à tactiliser la dalle en relevant les signaux de référence à l'aide d'un marteau d'impact. A partir des signaux de référence on calcule les signatures de référence de la dalle $C_{i,12}$ aux points du maillage de la zone à tactiliser et pour deux positions de capteurs.

Les impacts sont émis avec un marteau d'impact *DJB Instruments* IEPE modèle IH-05 (cf. fig. 3) de sensibilité 1mV/N et enregistrés avec des capteurs *Bruel et Kjaer (BK)* type 8340 (cf. fig. 3) de sensibilité 10V/g. Ce sont des accéléromètres piézoélectriques annulaires à cisaillement présentant un rapport signal sur bruit de -6dB ($0.05g/\sqrt{Hz}$, réf $1.10^{-6}m/s^2$) à 300 et 1000Hz et une réponse en fréquence de $\pm 5\%$ de 0 à 1500Hz. Les performances élevées de ces capteurs en font des outils bien adaptés pour notre étude.

Une fois la dalle tactilisée, on mesure ensuite les impacts lors de la marche. Les signaux détectés par les capteurs sont pris en compte si leur niveau est supérieur au seuil adaptatif. Ils sont alors utilisés pour le calcul des signatures $C_{j,12}$, puis les produits d'intercorrélation $C_{ij,12}$ entre l'impact mesuré en j et les impulsions de référence sont calculées pour chaque point du maillage de la zone tactile i . Les coefficients de corrélation obtenus sont ensuite normalisés à 1 (on les nomme C_n dans la suite du document).

3.3 Contraste et résolution

Pour chaque position i , les produits d'intercorrélation forment une carte de coefficients de corrélation représentant la zone tactile.

Dans le cas où le point d'impact j est situé dans la zone tactile, la carte présente un pic de corrélation dont la position correspond au point d'impact, et dont les deux caractéristiques principales sont le contraste et la résolution, présentés fig. 4.

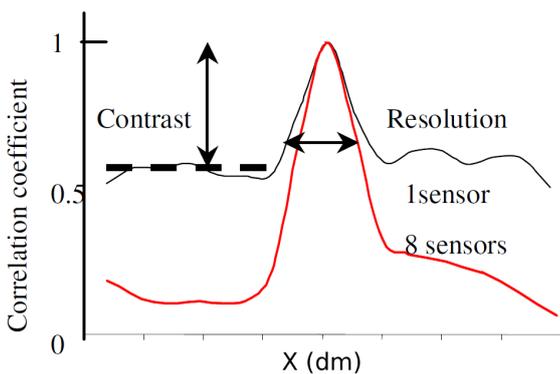


FIGURE 4 – Pic de corrélation typique [10].

Le contraste ξ est donné par le rapport du maximum $C_{n,max}$ par la moyenne \bar{C}_n des coefficients de corrélation du maillage :

$$\xi = \frac{C_{n,max}}{\bar{C}_n} \quad (5)$$

La résolution quant à elle correspond à la largeur du pic de corrélation et peut être définie comme sa largeur à -3dB.

4 Tactilisation de dalles béton

4.1 Carte de localisation

Une mesure des coefficients de corrélation lors d'une marche sur une zone tactilisée de la dalle du laboratoire a permis de relever la carte fig. 5. La dalle du laboratoire est en béton d'épaisseur 25cm et recouverte d'un revêtement PVC de 3mm d'épaisseur, les mesures ont été effectuées sur un maillage de 8×8 points distants de 0.2m et pour une bande de fréquence comprise entre 300 à 1200Hz.

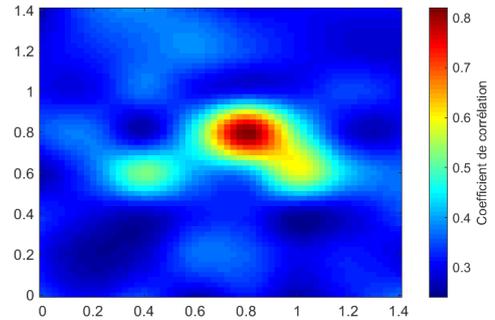


FIGURE 5 – Carte des coefficients de corrélation mesurés sur le sol du laboratoire entre un impact de coordonnées (0.8, 0.8) et les signaux de référence moyennés 8 fois pour un carré de 8 points de côté distants de 0.2m et une bande de fréquence de 300 à 1200Hz.

Les résultats présentés fig. 5 montrent la localisation d'un impact situé dans la zone tactile avec un contraste de 2.3 et une résolution de 40cm situé au point de coordonnées (0.8, 0.8). La résolution est proportionnelle à la fonction de Bessel d'ordre 0 prenant comme argument le vecteur d'onde, dont le résultat est donné fig. 6.

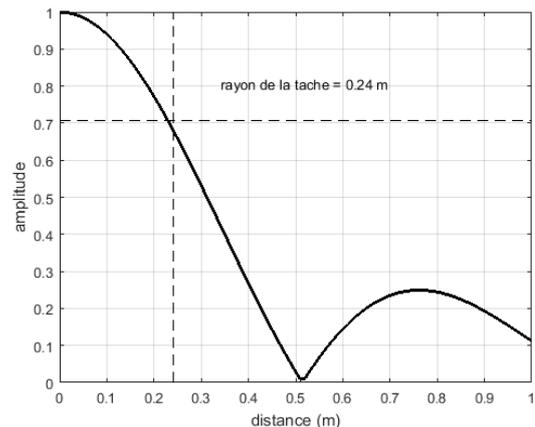


FIGURE 6 – Exemple de largeur théorique à -3dB du pic de corrélation pour une bande de fréquence de 300 à 1200Hz.

La largeur théorique dans le cas de la dalle béton du laboratoire pour une bande de fréquence de 300 à 1200Hz est de 0.48cm. On a en effet :

$$J_0(kr) = 0.24 \quad (6)$$

avec r la distance au centre de la tache et k le vecteur d'onde donné par la relation de dispersion pour une plaque mince

[12] :

$$k^2 = \frac{4\pi f}{\alpha^2}, \quad (7)$$

avec f la fréquence compris entre 300 à 1200Hz et α tel que [13] :

$$\alpha^2 = \frac{\pi v_p e}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

avec e l'épaisseur de la dalle et v_p la vitesse de phase du premier mode antisymétrique A0 de l'onde de Lamb pour $f = 0$. La largeur de la tache focale théorique correspond bien avec la limite de diffraction de $\frac{\lambda_{1,500Hz}}{2} = 0.5m$.

Lors de la marche sur la dalle tactilisée, si le choc est trop faible la détection n'a pas lieu et le processus de localisation n'est pas enclenché. Dans le cas d'un bâtiment avec un bruit de fond vibratoire élevé (machinerie ascenseur, route à proximité, etc.), seuls les pas présentant un niveau suffisamment supérieur seront détectés et localisés. Inversement, des émergences vibratoires du bâtiment (claquement de porte, bruit de pas extérieur à la zone tactile, etc.) peuvent déclencher le processus de localisation. Des mesures de bruits de fond vibratoires dans la dalle du laboratoire ont montré des valeurs de bruit de fond de l'ordre de 49dB (réf. 1.10–6m/s²). Le niveau de bruit de fond est à comparer avec les performances du capteur (–6dB). Le calcul du contraste permet alors de conditionner ce déclenchement : en fixant à 0.7 la condition de déclenchement à partir de laquelle on considère que le bruit détecté est un choc situé dans la zone tactile, nous obtenons des taux de détection satisfaisant.

4.2 Taux de détection d'impacts

Nous pouvons mesurer le taux de détection d'impacts, c'est à dire le nombre de détection d'impacts correspondant effectivement à des impacts situés dans la zone tactile. Améliorer ce taux augmente la robustesse du système. Il dépend principalement de la valeur du contraste, lui même proportionnel notamment à la racine du nombre de capteur [10].

4.2.1 Surface totale de la zone tactile

La fig. 5 présente un contraste élevé de 2.3 pour une zone tactile d'environ 2m². Augmenter la surface totale de la zone tactile permet d'augmenter le contraste. En effet, pour une résolution de l'ordre de 0.5m, la surface de la tache de focalisation est $S_f = \pi \left(\frac{0.5}{2}\right)^2 = 0.2m^2$. Le coefficient de corrélation moyen est alors proportionnel à la surface totale S_t de la zone tactile :

$$\bar{C}_n = \frac{0.35(S_t - S_f) + 0.7S_f}{S_t} \quad (9)$$

en considérant que la valeur moyenne du coefficient de corrélation normalisée dans la zone de focalisation S_f est 0.7 et que sa valeur en dehors est 0.35, valeurs souvent rencontrées en pratique.

D'après les Eqs. (5) et (9), le contraste est proportionnel à la surface totale S_t . Le tab. 1 donne quelques valeurs du contraste normalisé en fonction de la surface totale de la zone tactile pour un coefficient de corrélation maximum de $C_{n,max} = 0.85$, valeur également rencontrée en pratique.

Le tab. 1 montre que le contraste n'est supérieur à 2 qu'à partir de surfaces tactiles suffisamment grandes (ici pour

TABLEAU 1 – Valeur du contraste ξ mesuré en fonction de la surface totale S_t de la zone tactile pour une surface de la tache de focalisation $S_f = 0.2m^2$, un coefficient de corrélation maximum $C_{n,max} = 0.85$ et un coefficient de corrélation moyen $\bar{C}_n = 0.7$ dans la tache de focalisation et 0.35 dans le reste de la zone tactile.

S_t (m ²)	0.5	1	1.5	2	3	4	6
ξ	1.7	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4
\bar{C}_n	0.49	0.42	0.40	0.38	0.37	0.37	0.36

$S_t \geq 1.5m^2$).

4.2.2 Taille du maillage de la zone tactile

Le contraste varie également en fonction de la taille du maillage. Afin d'améliorer le taux de détection, il est préférable d'utiliser un maillage fin. Néanmoins cela augmente considérablement la durée de relevé des signatures de référence vue à la Sec. 3.2.

Nous souhaitons fixer une largeur de maillage permettant d'obtenir un bon compromis entre un coefficient de corrélation suffisant quelle que soit la position du point d'impact dans la zone tactile et un relevé des signatures de référence rapide. La fig. 7 présente deux pics de corrélation sur un tracé de surface des coefficients de corrélation correspondant à deux positions éloignées de 0.2 et 0.4m.

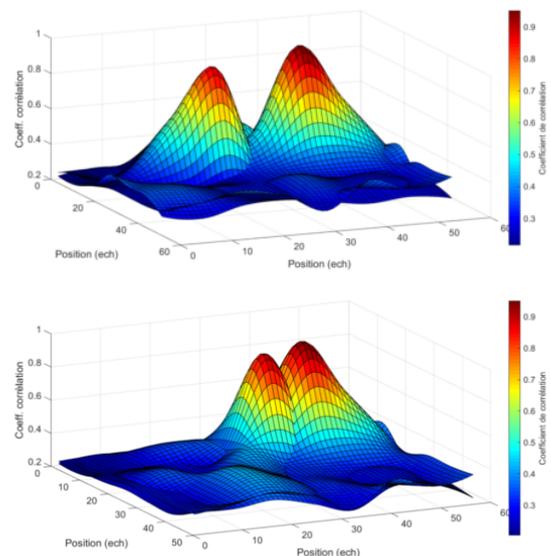


FIGURE 7 – Tracé de surface des coefficients de corrélation mesurés sur la dalle du laboratoire entre deux signaux de référence éloignés de deux points de maillage (en haut) et de un point de maillage (en bas) pour une carré de 7 × 6 points de côté distants de 0.2m et une bande de fréquence de 300 à 1200Hz.

La fig. 7 montre que si les distances entre les mailles sont trop éloignées le chevauchement entre les pics de corrélation sera faible et un impact situé entre les pics ne donnera pas un coefficient de corrélation suffisant. Cet éloignement est réglé

en fonction de la taille du pic de corrélation à mi-hauteur, soit 0.2m.

5 Limites et applications

5.1 Zone restreinte et impacts multiples

La participation à la fête de la science le 14 octobre 2017 a permis de mettre en place une expérimentation ludique de tactilisation de dalle béton. L'expérience est menée dans le laboratoire avec 50 enfants par groupe de 5 et consiste dans un premier temps à projeter sur le sol la carte des coefficients de corrélation. Une explication sur le fonctionnement théorique et pratique est donnée aux enfants et ceux-ci déclenchent le système de localisation à l'aide d'impacts sur le sol. La prise en main est simple et accessible aux enfants instantanément.

Dans un second temps, la carte est remplacée par un menu tactile commandable à l'aide des impacts sur le sol. La visualisation du menu par projection donne une fluidité de navigation, et permet de lancer des applications implémentées. Il s'agissait de jeux rapides avec des systèmes de scores, équivalents du *Memory* et du *Tap'taupes*.

Lors des tests, nous avons constaté que les utilisateurs (enfant et personnels du laboratoire) développent rapidement différentes techniques pour commander les applications avec les pieds (voir fig.8).



FIGURE 8 – Photo prise lors de la fête de la science 2017 : projection d'applications ludique sur sol béton tactilisé.

Pour l'expérimentation, nous avons référencé 64 points de localisation moyennés 8 fois et répartis sur une surface de 8×8 points éloignés de 0.2m. La zone tactile était cependant restreinte à un damier de 4×4 points, permettant d'augmenter d'autant le contraste.

Cette expérimentation montre la faisabilité du système dans des conditions réelles et notamment en présence d'un bruit de fond élevé comportant un grand nombre d'impacts simultanés sur la dalle du fait des nombreuses personnes autour de la zone tactile.

Nous avons également testé la capacité du système à différencier deux impacts simultanés ou multiples. Deux impacts peuvent être discrétisés s'ils interviennent avec

un intervalle de temps supérieur à la persistance de notre système correspondant à la durée des signaux enregistrés. Un signal dure 0.4s environ, mais cette durée peut être ramenée à 0.05s en ne considérant que la durée de l'impulsion jusqu'au bruit de fond (cf. fig. 9 présentant un impact sur la dalle béton du laboratoire).

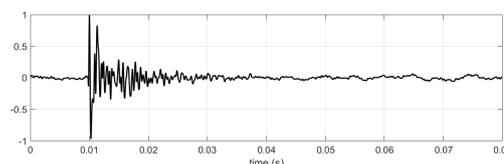


FIGURE 9 – Durée d'un impact sur la dalle béton du laboratoire.

Un impact peut être bruité par des impacts multiples. Lorsqu'un impact est bruité, le contraste reste élevé si le bruit ne provient pas de la zone tactile. Au contraire, si le bruit provient de la zone tactile, le contraste est affecté. De plus, il n'est pas possible de calculer une intercorrélation d'impacts simultanés du fait de la normalisation des signatures de référence (cf. Eq. (4)).

5.2 Localisation longue distance et à travers les obstacles

Des mesures longue distance ou à travers des obstacles ont été effectuées. Un obstacle peut être un meuble situé entre le capteur et la zone tactile. Un objet suffisamment lourd entraîne une déflexion du plancher et modifie les conditions de propagation dans le milieu. Une surface en contact avec la dalle modifie les conditions de bords du guide d'onde. Ces changements entraînent une modification de la fonction de transfert de l'Eq. (4), affectant le taux de détection du système. Les objets ne doivent donc pas être déplacés après la relevé des signatures de référence. La fig. 10 présente une carte des coefficients de corrélation effectuée à travers une paroi légère du laboratoire et plusieurs meubles lourds et encombrants, à une distance de 8m. On observe une localisation précise avec peu de bruit. Le contraste est de 2.8 et la résolution de 0.4m.

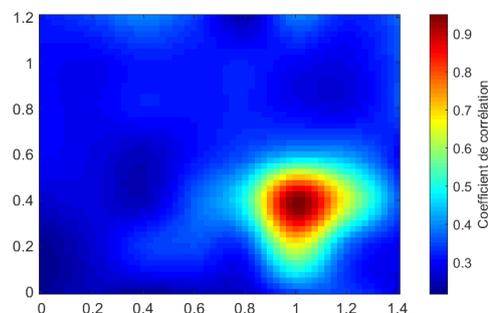


FIGURE 10 – Carte des coefficients de corrélation mesurés dans le couloir du laboratoire de part et d'autre d'une paroi légère, à une distance de 8m et pour un impact de coordonnées (1, 0.4) et une bande de fréquence de 300 à 1200Hz.

5.3 Mesure de flux piétonnier

Une expérience qualitative de mesure de flux piétonnier a été effectuée dans le couloir de l'institut montrant qu'il est possible de mesurer un flux ponctuel de personnes (défilant une à une). Dans le cas où plusieurs personnes passent en même temps dans le couloir, le problème d'impacts multiples vu Sec. 5.1 empêche d'obtenir des résultats fiables.

5.4 Dalles béton non tactilisables

Certaines hypothèses doivent être vérifiées pour rendre tactile une surface. Notamment l'homogénéité du milieu et son isotropie. Un sol en parquet flottant même posé sur une dalle béton est trop anisotrope pour permettre la tactilisation. Une dalle sur un milieu absorbant, coulée directement sur le sol (sable, terre ou graviers) ne permet pas d'effectuer une expérience de localisation. Les résultats de la mesure des coefficients de corrélation dans le cas de la dalle du parking du laboratoire sont présentés sur la fig. 11. Le contraste est de 1.1 et la résolution d'environ 50cm. On observe des raies avec des écarts de corrélation faibles. La localisation est impossible, cette mise en œuvre de dalle n'est donc pas susceptible d'être utilisée pour une tactilisation.

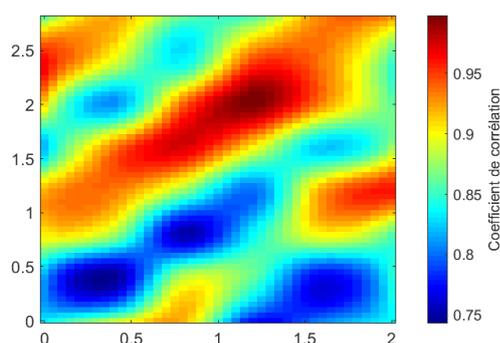


FIGURE 11 – Carte des coefficients de corrélation mesurés sur le sol du parking avec les BK entre le signal de référence de coordonnées (3, 4) et les signaux de référence moyennés 8 fois pour une carré de 4×6 points de côté distants de 0.4m.

6 Conclusion

Ce travail montre qu'il est possible d'adapter les méthodes de localisation dans les plaques développées au laboratoire au cas des dalles béton. Des expériences de tactilisation sont menées *in situ* et les résultats présentés sont conformes à ceux attendus en théorie pour des ondes guidées dans les plaques homogènes, isotropes et élastiques. Cette étude a permis de régler le pas du maillage à 0.2m pour des dalles bétons de 25cm. Nous vérifions la méthode de localisation sur différents types de dalles et les résultats montrent que la tactilisation est faisable sur des dalles isotropes et peu absorbantes.

Nous avons pu augmenter le taux de détection en améliorant le contraste par sélection de zone tactile, tandis que la résolution de la tache de focalisation est proche de la limite de diffraction théorique. Nous montrons également que la localisation peut être effectuée à grande distance, à travers

les parois légères et dans des conditions bruitées. Des expériences qualitatives de mesure de flux ont été menées et montrent la capacité du système pour ce type de mesure. Néanmoins le système dans l'état actuel ne permet pas de détecter des impacts multiples dont l'intervalle temporel est inférieur à 0.4s. Des essais de tactilisation de dalles effectués avec des capteurs de moindre qualité et un coût réduit ont montré de bons résultats et seront présentés dans une future publication.

Références

- [1] D. Alleyne, P. Cawley, Optimization of Lamb wave inspection techniques, *Ndt & E International*, **25(1)**, 11-22 (1992).
- [2] C. Draeger, D. Cassereau, M. Fink, Theory of the time-reversal process in solids, *J. Acoust. Soc. Am.*, **102(3)**, 1289-1295 (1997).
- [3] M. Fink, C. Prada, D. Cassereau, Self focusing in inhomogeneous media with time-reversal acoustic mirrors, *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Montreal, Quebec, 681-686 (1989).
- [4] L. Adler, S. W. Wang, K. Bolland, M. de Billy, G. Quentin, Rayleigh angle backscattering of ultrasonic beam from single crystal nickel in 111 and 110 planes, *J. Acoust. Soc. Am.*, **77(5)**, 1950-1953 (1985).
- [5] J. P. Nikolovski, F. Devige, French Patent, FR0008372 (2000).
- [6] G. Ribay, D. Clorenec, S. Catheline, R. K. Ing, N. Quieffin, M. Fink, Tactile 60 time reversal interactivity : Experiment and modelization, *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, 2104-2107 (2005).
- [7] D. Cassereau, M. Fink, Time-reversal of ultrasonic fields. III. Theory of the closed time-reversal cavity, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **39(5)**, 579-592 (1992).
- [8] E. Bavu, *Le puits à retournement temporel dans le domaine audible : un outil de focalisation et d'imagerie à haute résolution de sources sonores et vibratoires*, PhD. thesis Université Pierre et Marie Curie-Paris VI (2008).
- [9] P. M. Morse, K. U. Ingard, *Theoretical acoustics*, Princeton university press (1968).
- [10] R. K. Ing, N. Quieffin, S. Catheline, M. Fink, Tangible interactive interface using acoustic time reversal process, *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**, 2560-2560 (2005).
- [11] R. K. Ing, D. Cassereau, Contactless dependance interactive object, *Fortschritte der Akustik DAGA 2007*, 595-596 (2007).
- [12] D. Royer, E. Dieulesaint, *Elastic Waves in Solids Vol. 1*, Springer, Berlin, (1999).
- [13] R. K. Ing, N. Etaix, A. Leblanc, M. Fink, Measurement of thickness or plate velocity using ambient vibrations, *J. Acoust. Soc. Am.*, **127(6)**, EL252-EL257 (2010).