
La méthode Impact-Echo appliquée à l'auscultation des ponts en maçonnerie : Etude Numérique

Hajer Rezgui Chaabouni, Sylvie Yotte, Mokhfi Takarli

Laboratoire GC2D, Université de Limoges, 17 Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France

hajer.rezgui@unilim.fr, sylvie.yotte@unilim.fr, mokhfi.takarli@unilim.fr

RÉSUMÉ.

L'Impact-Echo est une méthode de contrôle non destructif utilisée pour déterminer les épaisseurs et localiser des défauts dans les structures en béton ou en maçonnerie. Cette méthode a déjà fait ses preuves pour l'évaluation des structures en forme de plaques en béton et doit encore être développée pour les structures de maçonnerie. Alors que les études précédentes étaient principalement basées sur la détection des défauts dans les plaques monocouches et sur l'évaluation de la qualité du contact entre les strates d'un bicouche, l'identification des défauts situés dans la deuxième couche d'un bicouche reste à explorer. L'objectif de ce travail est d'étudier les capacités de la méthode Impact-Echo à identifier les défauts situés dans une deuxième couche. Dans cette étude, un plan factoriel numérique basé sur quatre facteurs, à savoir : le coefficient de réflexion, l'épaisseur de la première couche, la profondeur du défaut et le coefficient d'amortissement, est réalisé afin d'évaluer la réponse de l'Impact-Echo d'une plaque bicouche contenant des défauts. Parmi les quatre facteurs, seul le coefficient d'amortissement ne semble pas affecter l'interprétation d'un essai Impact-Echo. Cependant, les trois autres facteurs pourraient être utilisés pour interpréter un test Impact-Echo. Les premiers résultats du plan d'expérience numérique seront présentés.

ABSTRACT.

Impact-Echo is a non-destructive method used to determine thicknesses and locate defects in concrete or masonry structures. It has already been proven to be quite efficient for the evaluation of concrete plates and is still to be developed for masonry structures. While previous studies have mainly focused on detecting and locating defects in single-layer plates and evaluating the bond quality at internal interfaces in the bilayer ones, the identification of defects located in the second layer of a bilayer plate has yet to be explored. The purpose of this study is to investigate the capabilities of Impact-Echo method to identify defects located in the 'second layer' (the head walls or the vaults being the first one and the fill being the second one). In this study a full numerical factorial design based on four factors namely: reflection coefficient, thickness of the first layer, depth of the defect, and damping coefficient is conducted to evaluate the Impact-Echo response of a bilayer plates containing a defect. Among the four factors, only the damping coefficient seems to not affect the interpretation of an Impact-Echo test. However, the three other factors could be used for the interpretation of an Impact-Echo test. Primary results of the numerical design of experiments will be presented.

MOTS-CLÉS : Eléments finis, Impact-Echo, Identification des défauts, Propagation des ondes, Contrôles non-destructifs.

KEY WORDS: Finite Elements, Impact-Echo, Fault Identification, Wave Propagation, Non-Destructive Testing.

Introduction

Des études [BEL 04], [PRO 09] ont montré que la majorité des ponts ferroviaires européens en maçonnerie inspectés sont centenaires et que 58% d'entre eux sont dans un état moyen à dégradé. La durée de vie résiduelle de ces ponts est donc un enjeu économique et social important. Pour l'évaluer, on cherche à établir un état de santé à l'aide de méthodes qui permettrait de renseigner sur l'existence ou pas, de défauts dans les ouvrages en question sans les dégrader. L'une des principales difficultés rencontrées, c'est de pouvoir inspecter le remplissage (situé au-delà de la voûte et du mur de tête) sans pour autant dégrader l'ouvrage en y accédant.

L'Impact-Echo, initialement développé par [SAN 86], est défini comme étant une méthode d'évaluation non destructive des structures, basée sur l'exploitation des ondes de compression générées par impact. Ces ondes se propagent à travers le milieu et se réfléchissent sur les défauts internes et/ou les surfaces externes de la structure. Les déplacements de surface causés par les réflexions des ondes sur les interfaces sont mesurés par un transducteur, adjacent au point d'impact. Les signaux résultants en fonction du temps sont transformés dans le domaine fréquentiel. Les réflexions multiples des ondes de compression entre la surface d'impact, les défauts, et/ou les

surfaces extérieures donnent lieu à des résonances transitoires [SAN 97], qui peuvent être identifiées à partir des spectres de fréquences et utilisées pour évaluer l'intégrité de la structure ou pour localiser les défauts. La fréquence f de l'arrivée de l'onde P, qui est inverse au temps écoulé entre l'impact et l'arrivée de l'onde à la surface est donnée par l'équation [1], avec V_p la vitesse de propagation des ondes P, P l'épaisseur de la structure auscultée, β le coefficient géométrique et n un facteur dépendant des impédances acoustiques des milieux constituant le bicouche. Dans cette étude, l'accent est mis sur la détection des défauts situés dans la deuxième couche d'une plaque bicouche. Nous avons choisi d'étudier ce problème par le biais de simulations numériques afin de développer une méthodologie d'analyse du signal. Plus tard, nous comparerons ces résultats à un cas réel. Dans ce papier, seule la partie numérique sera présentée.

$$f = \frac{\beta V_p}{nP} \quad [1]$$

1. Modélisation numérique

Dans la méthode Impact-Echo, les ondes mécaniques sont introduites par l'impact élastique d'une sphère métallique sur une surface solide. Dans cette étude, l'impact est représenté par un demi sinus carré et la réponse est mesurée sur un ensemble de points proches de l'impact, comme le montre la Figure 1. La Figure 1.(a) illustre la géométrie du problème. La modélisation élément finis de cette géométrie est schématisée dans la Figure 1.(b). Le milieu 1 correspond à un milieu solide ayant des paramètres pouvant être assimilés à du béton ou de la maçonnerie. Le milieu 2 correspond à un milieu qui peut être associé à du remplissage comme du sol. Le défaut est localisé dans la seconde couche.

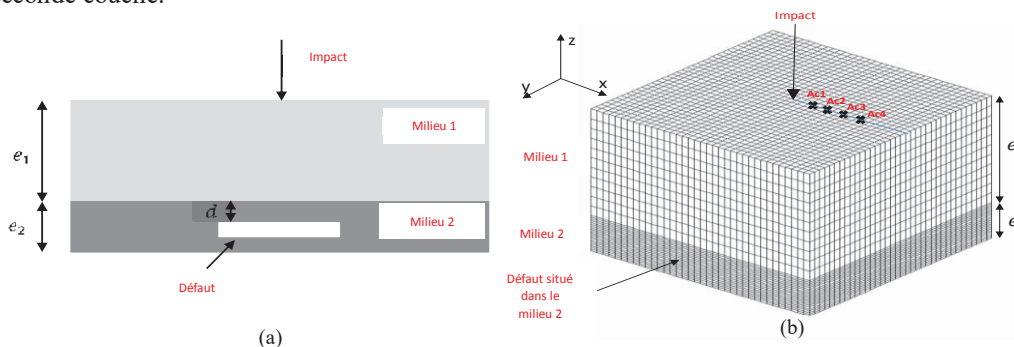


Figure 1. (a) Coupe longitudinale du bicouche simulé (b) Maillage du bicouche simulé sur Cast3m

La réponse temporelle mesurée est transformée en domaine fréquentiel en appliquant la fonction mathématique 'Transformé de Fourier'. L'analyse fréquentielle est la principale approche pour interpréter la réponse mesurée lors d'un test Impact-Echo. Les fréquences importantes apparaissent comme des pics distincts dans le spectre de fréquence. Toutefois, dans un milieu bicouche fini contenant des défauts, l'onde générée sera réfléchiée par les interfaces internes entre les deux couches, le défaut, les interfaces externes et les bords latéraux. Toutes ces réflexions conduiront inévitablement à l'apparition de plusieurs pics de fréquence, ce qui peut fausser l'interprétation des résultats et conduire à une confusion du sens de chaque pic. Le spectre de fréquence étant déjà assez compliqué à analyser, plusieurs pics de fréquence dus à différents modes de vibrations peuvent apparaître [SAN 97]. Le spectre de fréquence obtenu à partir d'un test Impact-Echo réalisé sur un milieu bicouche contenant des défauts deviendra rapidement incompréhensible et les lectures deviendront peu fiables. Par conséquent, on ne peut plus compter uniquement sur la lecture de la position des pics dans le spectre de fréquences et de nouveaux paramètres doivent être introduits. Un plan d'expériences factoriel numérique basée sur quatre facteurs a été élaboré (Tableau 1). Le but de ce plan d'expériences numérique est d'évaluer la réponse d'un bicouche contenant un défaut suite à un essai Impact-Echo. Dans cette étude, différents facteurs susceptibles d'affecter la réponse numérique d'une simulation d'un essai Impact-Echo seront considérés.

Tableau 1. Facteurs et niveaux du plan numérique

| Facteurs | Coefficient de réflexion R | Épaisseur de la couche e_1 [m] | Profondeur du défaut d [m] | Coefficient d'amortissement ξ |
|----------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Niveaux | 0,45 | 0,25 | 0,07 | 0,0001 |
| | 0,71 | 0,375 | 0,0875 | 0,0002 |
| | - | - | 0,105 | 0,0003 |

2. Analyse des résultats numériques

2.1. Influence du coefficient d'amortissement

Trois valeurs (Tableau 2) du coefficient ξ ont été sélectionnées pour les simulations numériques afin d'évaluer l'effet de cette variation sur la réponse fréquentielle. Comme le montre la Figure 2, cette variation n'affecte que l'amplitude des fréquences et n'affecte pas les fréquences. Par conséquent, le coefficient d'amortissement n'affecte pas l'interprétation d'un test Impact-Echo.

Tableau 2. Résumé des tests sélectionnés

| Essai | Essai 5 | Essai 25 | Essai 13 |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| R | 0.71 | 0.71 | 0.71 |
| e_1 [m] | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| d [m] | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| ξ | 0.0001 | 0.0002 | 0.0003 |

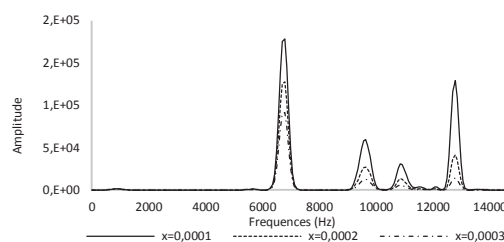


Figure 2. Effet de l'amortissement sur le spectre de fréquences

2.2. Influence du coefficient de réflexion

Deux niveaux sont sélectionnés (Tableau 3) pour le coefficient R représentant deux bicouches ayant des matériaux différents avec des propriétés différentes. Par conséquent, des différences entre les deux réponses sont attendues. Pour les données d'entrée correspondant à l'Essai 5, la fréquence d'interface calculée par (Eq. (1)) est de 12,1 kHz et la fréquence de défaut de 6,5 kHz. Les deux fréquences dominantes de l'essai numérique 5, telles qu'elles sont représentées dans la Figure 3, peuvent être représentatives de la fréquence de l'interface et de la fréquence de défaut. Pour les données d'entrée correspondant à l'Essai 1, la fréquence d'interface calculée par (Eq. (1)) est de 7,8 kHz et la fréquence de défaut de 4,6 kHz. Sur la Figure 3, une fréquence dominante apparaît à 14 kHz (traduisant un mode de vibration). Trois autres fréquences moins imposantes apparaissent également sur la figure. L'un d'eux pourrait potentiellement être assimilé à l'interface mais le défaut est indétectable. Une différence dans les amplitudes dans le spectre de fréquence peut également être remarquée. L'essai 1 présente des amplitudes plus faibles car la partie réfléchie de l'onde est moins importante que le l'Essai 5.

Tableau 3. Résumé des tests sélectionnés

| Essais | Essai 1 | Essai 5 |
|-----------------------------|-------------|-------------|
| R | 0.46 | 0.71 |
| e_1 [m] | 0.25 | 0.25 |
| d [m] | 0.07 | 0.07 |
| ξ | 0.0001 | 0.0001 |

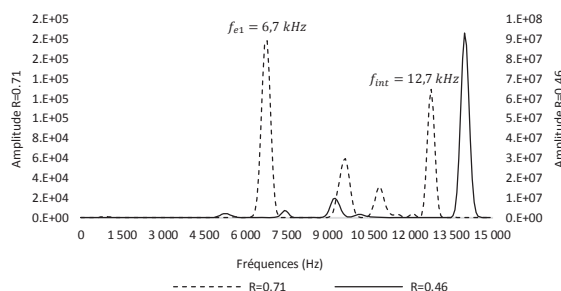


Figure 3. Effet du coefficient R sur le spectre de fréquences

2.3. Influence de l'épaisseur du milieu e_1

Deux épaisseurs différentes e_1 sont considérées. En théorie, nous nous sommes placés dans une position où la détection de cette interface est toujours possible. Pour $e_1 = 0,25$ m (essai 5), la fréquence de l'épaisseur devrait être autour de 12,1 kHz et pour une épaisseur de la première couche, $e_1 = 0,375$ m (essai 6), la fréquence de l'épaisseur devrait être autour de 8 kHz. Sur la Figure 4, les deux fréquences d'épaisseur peuvent être identifiées. Cependant, une différence entre les amplitudes peut être remarquée. En effet, les fréquences d'amplitude du test numérique 6 sont inférieures à celles du test numérique 5. Ceci s'explique par le fait que le temps de parcours de l'onde dans l'essai numérique 6 est plus long (l'interface étant plus profonde), l'énergie dissipée est donc plus importante, donc la partie réfléchie est plus basse.

2.4. Influence de la profondeur du défaut d

Dans cette section, trois niveaux de profondeur de défaut sont sélectionnés. Comme on pouvait s'y attendre, l'interprétation est assez complexe car ce facteur a le plus d'influence sur la réponse fréquentielle d'une simulation d'un essai Impact-Echo. La Figure 5 présente les trois réponses correspondant aux trois tests numériques avec différents niveaux de profondeur de défaut d . Alors que le spectre de fréquence des essais numériques 5 ($d = 0,07$) et 19 ($d = 0,0875$) présentent de multiples pics de fréquences, l'essai numérique 7 (Figure 5) possédant la profondeur de défaut la plus importante ($d = 0,105$) présente un seul pic dominant à la fréquence 11,2 kHz. Cela peut s'expliquer par le fait que le défaut est trop profond et que seule l'interface est détectable. La fréquence d'épaisseur semble être autour de 11,2 kHz, ce qui représente un résultat avec un écart de 7% dans l'estimation de

l'interface (la valeur calculée étant de 12,1 kHz). Si nous considérons que, parce que le défaut n'est pas détectable et que la deuxième couche est beaucoup plus flexible que la première, cette dernière sera libre de vibrer comme une simple plaque. Pour cela, un facteur géométrique différent β doit être introduit. Dans une étude récente [GIB 15], on a affirmé que le facteur géométrique dépend du coefficient de Poisson en plus de la forme géométrique elle-même. Comme le coefficient de Poisson dans leur étude varie de 0,15 à 0,25, le facteur géométrique β varie de 0,96 à 0,942. Dans la présente étude, le coefficient de Poisson est 0,3, un facteur de forme égal à 0,942 a été donc considéré. Avec cette valeur, la fréquence d'épaisseur devient 11,4 kHz, ce qui pourrait représenter avec précision l'épaisseur de la première couche.

Tableau 4. Résumé des tests sélectionnés

| Essais | Essai 5 | Essai 6 |
|-----------------------------|-------------|--------------|
| Facteurs | | |
| R | 0,71 | 0,71 |
| e_1 [m] | 0,25 | 0,375 |
| d [m] | 0,07 | 0,07 |
| ξ | 0,0001 | 0,0001 |

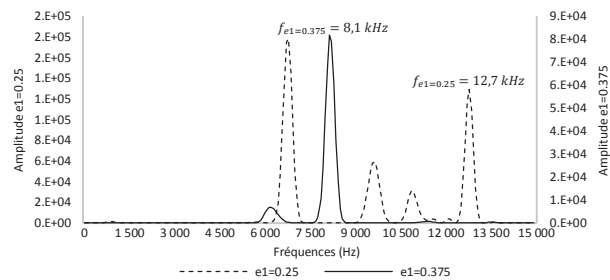


Figure 4. Effet de l'épaisseur e_1 sur le spectre de fréquences

Tableau 5. Résumé des tests sélectionnés

| Essais | Essai 5 | Essai 19 | Essai 7 |
|-----------------------------|-------------|---------------|--------------|
| Facteurs | | | |
| R | 0,71 | 0,71 | 0,71 |
| e_1 [m] | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| d [m] | 0,07 | 0,0875 | 0,105 |
| ξ | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |

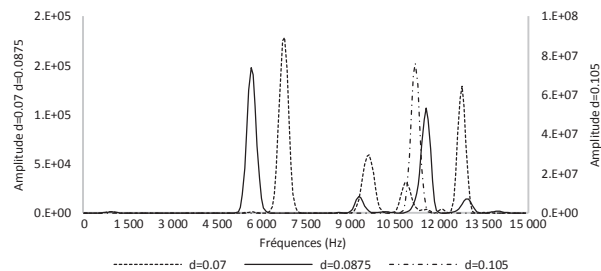


Figure 5. Effet de la profondeur d sur le spectre de fréquence

3. Conclusion et perspectives

Les études précédentes se sont principalement concentrées sur la localisation des défauts situés dans des plaques monocouches et sur la qualité du contact entre les strates d'un bicouche. Pour ce type de configuration, un traitement et une interprétation appropriés du signal sont essentiels pour faciliter l'étude. Alors que l'Impact-Echo dépend principalement de la localisation de la fréquence dominante dans le spectre des fréquences, pour un milieu bicouche contenant un défaut, les interprétations basées sur la lecture du spectre des fréquences devient assez complexes et la nécessité d'introduire de nouveaux paramètres de lecture devient indispensable. Pour ce faire, un plan d'expériences numérique est en cours de développement. L'objectif est d'abord d'étudier l'interaction entre les variables d'entrées, puis d'introduire de nouvelles variables de sortie autres que la position du pic de fréquence afin d'élargir l'approche permettant d'interpréter la réponse d'un essai Impact-Echo. Parmi les quatre facteurs, seul le coefficient d'amortissement semble ne pas affecter l'interprétation d'un test Impact-Echo. Cependant, les trois autres facteurs peuvent affecter l'interprétation des essais. Des résultats plus détaillés sur le plan d'expériences numérique seront présentés dans des futurs travaux.

4. Bibliographie

- [BEL 04] Bell (2004). European railway bridge demography. Eur. FP 6.
- [GIB 15] Gibson, A., Popovics, J.S., and ASCE, M. (2015). Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis. 7.
- [PRO 09] Proske, D., and Gelder, P. (2009). Safety of historical stone arch bridges (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).
- [SAN 86] Sansalone, M., and Carino, J.N. (1986). Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves.
- [SAN 97] Sansalone, M., and Streett, W. (1997). IMPACT-ECHO Non destructive Evaluation of Concrete and Masonry (NEW YORK: Cayuga Press).