
La méthode Impact-Echo appliquée à l'auscultation des ponts en maçonnerie : étude préliminaire

Hajer REZGUI CHAABOUNI¹, Sylvie YOTTE¹, Mokhfi TAKARLI¹

¹ 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 qui a fait l'objet de nombreux travaux, notamment sur les ouvrages en béton. Cette étude préliminaire, se situe dans le cadre de l'auscultation non destructive des ponts en maçonnerie. Pour pouvoir identifier d'éventuels défauts dans la maçonnerie, il faut pouvoir les différencier des éléments constitutifs de l'ouvrage (pierre, joint, remplissage). Pour cela on a recours à une simulation numérique nous permettant d'introduire dans la géométrie de façon progressive ces éléments constitutifs et enfin les défauts. Cette simulation permet de mettre en évidence des conditions géométriques et mécaniques conduisant à l'identification ou non des défauts.

....
....
....
....
....
....
....
....

ABSTRACT.

Impact-Echo is a non-destructive testing method that has been subjected to a lot of work, particularly on concrete structures. This preliminary study lies within the framework of the non-destructive auscultation of masonry bridges. To be able to identify possible defects in the masonry, it is necessary to be able to differentiate them from the constituent elements of the structures (Stones, joint, filling). For that, we resort to a numerical simulation allowing us to introduce progressively in the geometry these constitutive elements and finally the defect. This simulation makes it possible to highlight geometrical and mechanical conditions leading to the identification or not of the defects.

...
....
....
....
....

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

KEY WORDS : Concrete, Defaults identification, Finite Elements, Impact-Echo, Non-destructive, Wave propagation.

1. Introduction

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 ou les surfaces externes de la structure. La méthode Impact-Echo, illustrée par la Figure 1, peut être utilisée pour déterminer des épaisseurs et/ou localiser des fissures, des vides, et d'autres défauts dans les structures. Les déplacements de surface causés par les réflexions des ondes sur les interfaces sont mesurés par un transducteur, adjacent aux points 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 et β le coefficient géométrique. La maçonnerie est un milieu plus hétérogène que le béton, et présente de multiples interfaces. Il sera donc possible de retrouver les déplacements dus aux réflexions des ondes sur ces interfaces. Les défauts recherchés sont des vides situés dans le remblai, des altérations de la pierre au niveau de l'extrados, des décollément d'éléments (fissurations à l'interface). L'objectif d'une auscultation est donc d'identifier ces défauts sans toutefois les confondre avec les signaux induits par la structure même de la maçonnerie.

$$f = \frac{\beta V_p}{2P} \quad [1]$$

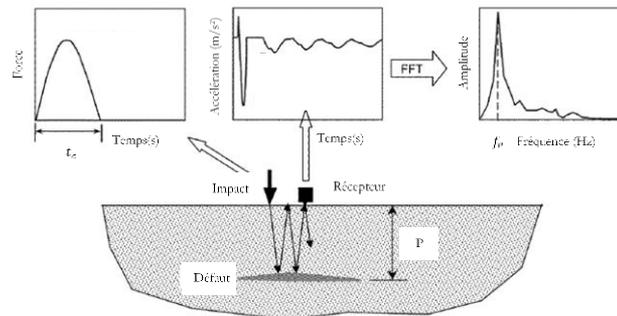


Figure 1. Principe de la méthode Impact-Echo [CAR 15]

2. Impact-Echo et maçonnerie

Ce papier s'inscrit dans le cadre de la thèse 'Diagnostic d'ouvrages maçonnés par méthodes soniques'. Il s'agit ici d'étudier numériquement le potentiel et les limites de la méthode Impact-Echo, pour la détection des défauts dans la maçonnerie. La méthode Eléments Finis (EF) a été explicitement utilisée pour simuler la propagation des ondes dans les milieux solides [HUA 10], [PRA 14], [SAN 86], [SAN 97], [SER 90] et a été appliquée avec succès pour étudier la réponse de la méthode Impact-Echo appliquée à des plaques en béton [PRA 14], [SAN 97], [HUA 10]. Elle a été largement utilisée pour détecter les défauts contenus dans le milieu même où l'impact a été réalisé, en d'autres termes, l'onde qui se propage sera réfléchiée en premier par le défaut et ensuite par l'interface suivante. Plusieurs auteurs [SAN 97], [MAR 98], [MCC 01] et [BIT 96] s'accordent à dire que pour des longueurs d'ondes λ données, un défaut sera identifié à condition d'être à une profondeur supérieure à $\lambda/2$ et avoir des dimensions latérales supérieures à λ .

Les études précédentes ne prennent pas en compte la possibilité de présence d'une interface moins profonde que le défaut, un cas qui est fréquemment rencontré dans l'auscultation des grands ouvrages comme par exemple les ponts en maçonnerie, où une onde devrait traverser parfois plus d'une interface avant d'atteindre le défaut. Le but de cette étude sera donc, dans un premier temps, d'étudier l'influence de la position du défaut, situé à une distance D d'une interface, et de sa dimension latérale, sur sa détectabilité. Par la suite, nous étudierons l'influence de la variation des propriétés mécaniques du Milieu 1 (Milieu où l'impact et la mesure sont réalisés) et du Milieu 2 (où le défaut est situé) sur la détectabilité du défaut.

3. Simulation numérique

Les matériaux sont modélisés comme étant des matériaux élastiques, isotropes et homogènes. C'est une hypothèse acceptable pour les fréquences inférieures à 80kHz [SAN 97]. Le chargement est simulé sous la forme d'un demi-sinus carré [SAN 86], et la réponse mesurée à proximité du point d'impact. La Figure 2 regroupe les différentes simulations effectuées et leurs réponses respectives mesurées dans le domaine fréquentiel. Dans un premier temps, un

milieu sans interface a été simulé et ce, pour voir comment se comporte la réponse fréquentielle dans le cas le plus simple. Dans un deuxième temps une interface a été rajoutée, l'enjeu étant de voir l'influence du rapport $E1/E2$. Ensuite, des interfaces verticales ont été introduites, afin de voir si la présence de ces interfaces va modifier les résultats. Puis un défaut sous l'interface précédente est ajouté. Les paramètres des milieux 1 et 2 sont présentés dans le Tableau 1. Les propriétés du milieu 1 ont été maintenues constantes lors de l'étude. Le défaut, contenu dans le milieu 2, a été simulé sous forme parallélépipédique située à une distance D de la face inférieure du cube en béton (première interface), d'épaisseur e et de dimension latérale L (Figure 3).

Pour les 3 configurations de la Figure 2, un rapport de $E1/E2$ constant (égale à 0,53) a été maintenu. On cherche ici à identifier les changements dans la réponse fréquentielle induits par la géométrie. La Figure 2 (a) présente un milieu sans interface. Dans la réponse temporelle on voit apparaître un pic autour de la fréquence 3500 Hz correspondant à un mode propre (Les conditions aux limites induisent un blocage de déplacement en 3 points de la face inférieure). On s'attend aussi à avoir un pic correspondant à la face inférieure du milieu 1, autour de 4000 Hz. Ce pic est bien visible sur la réponse fréquentielle, en effet la profondeur du milieu 1 est bien supérieure à la longueur d'onde minimale, correspondant à la fréquence maximale générée par impact. Dans la Figure 2 (b) une interface a été ajoutée, on retrouve toujours le pic correspondant à un mode propre autour de 3500 Hz. On s'attend aussi à voir apparaître un pic autour de 4300 Hz correspondant à la face inférieure du milieu 2. Ce pic n'est pas visible, ce phénomène est dû à la profondeur insuffisante du milieu 2, qui est inférieure à la longueur d'onde minimale nécessaire à l'identification du défaut. On s'attend aussi avoir un 3ème pic autour de 5300 Hz correspondant à l'interface rajoutée. Ce pic est bien visible sur la réponse fréquentielle. Dans la Figure 2 (c), deux interfaces verticales ont été rajoutées. Les résultats sont similaires à ceux obtenus dans la Figure 2 (b). Les interfaces verticales ne semblent pas avoir d'influence sur les fréquences significatives de notre étude. On observe toutefois une influence sur l'amplitude des pics, ce qui signifie que l'énergie portée ces fréquences est plus faible. Dans la Figure 2 (d) un défaut a été introduit et l'épaisseur du milieu 2 a été augmentée. On s'attend donc à trois pics, un premier correspondant à la face inférieure du milieu 2, à une fréquence se situant autour de 3250 Hz. Ensuite un deuxième pic autour de 4250 Hz correspondant à la position du défaut, et enfin un pic autour de 5000 Hz correspondant à l'interface entre les deux milieux. Ici, seul le pic correspondant au défaut n'a pas pu être identifié et ce, en raison de sa profondeur. En effet, le défaut ne semble pas assez profond pour pouvoir être identifié. On peut aussi remarquer que le pic correspondant au mode propre qu'on a pu observer dans les trois configurations précédentes n'est plus visible.

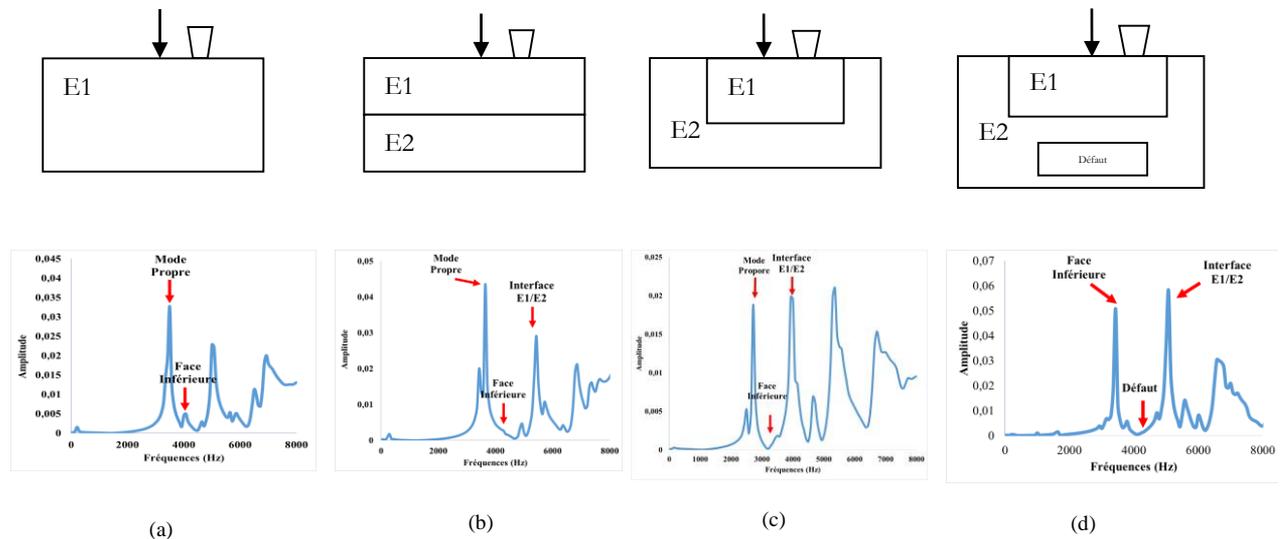


Figure 2. Simulation de l'Impact-Echo sur différentes configurations

La Figure 3 présente les réponses fréquentielles mesurées suite à un essai Impact-Echo réalisé sur la configuration contenant un défaut (Figure 2 (d)). Ici, le quotient $E1/E2$ a été varié comme on peut le voir dans Tableau 1 et les dimensions du problème sont maintenues constantes. Pour un quotient $E1/E2$ égale à 0,53 et comme expliqué ci-dessus, seule l'interface entre les milieux 1 et 2 et la face inférieure du milieu 2 ont pu être identifiées. Pour un quotient $E1/E2$ égale 0,15, on s'attend à voir ici aussi trois pics : un premier pic correspondant à la face inférieure du milieu 2 autour de 3300 Hz, ensuite un pic correspondant à la profondeur du défaut autour de 4200 Hz et enfin un pic autour de 5000 Hz correspondant à l'interface entre les milieux 1 et 2. Ces trois pics sont bien visible sur la réponse fréquentielle comme on peut le voir sur la Figure 3. On peut donc constater que la variation des propriétés mécaniques

des milieux que traverse l'onde peut à elle seule influencer les résultats de l'essai Impact-Echo. Un troisième quotient $E1/E2$ égal à 700 a été considéré, un quotient disproportionné par rapport aux deux premiers. Néanmoins, pour ces premières simulations nous avons choisi de travailler avec des milieux représentatifs de matériaux réels qu'on peut être amené à rencontrer lors des essais in-situ. Un tel quotient ne permet pas d'avoir des résultats exploitables. En effet, aucun pic n'apparaît. Il n'y aurait pas de réflexion ni sur l'interface ni sur le défaut. Cela peut être représentatif d'un couple Béton/sable qui peut être rencontrée dans un pont en maçonnerie.

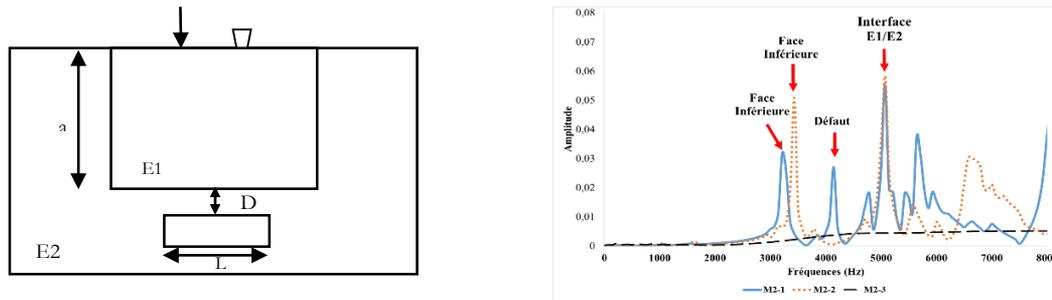


Figure 3. Simulation Impact-Echo sur une configuration contenant un défaut et réponses fréquentielles associées avec variation des propriétés mécanique du milieu 2

Tableau 1. Différentes propriétés mécaniques du Milieu 2

Propriétés mécaniques	$E1/E2$	Module d'Young E (GPa)	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Coefficient de Poisson ν
	-	32	2200	0,2
M2-1	0,15	210	7800	0,29
M2-2	0,53	60	2500	0,3
M2-3	700	0,046	1800	0,33

4. Conclusion et perspectives

Impact-Echo est une méthode qui peut être utilisée en maçonnerie. L'étude présentée ici, montre qu'un défaut ne peut être identifié que sous certaines conditions de profondeur, et de variation relative des rigidités des matériaux constitutifs. Par la suite, l'étude paramétrique sera prolongée, en travaillant également sur le contenu fréquentiel de l'impact, les dimensions du défaut, sa profondeur, les variations relatives de rigidité des différents milieux, et le nombre de milieu traversés.

5. Bibliographie

- [HUA 10] Y.-H. Huang, S.-H. Ni, K.-F. Lo, et J.-J. Charng, « Assessment of identifiable defect size in a drilled shaft using sonic echo method: Numerical simulation », *Comput. Geotech.*, vol. 37, n° 6, p. 757-768, sept. 2010.
- [PRA 14] T. Pradhan, « Finite Element Modeling of Impact-Generated Stress Wave Propagation in Concrete Plates for Non-Destructive Evaluation », Lehigh University, nov. 2014.
- [SAN 86] M. Sansalone et J. N. Carino, *Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*. 1986.
- [SAN 97] M. Sansalone et W. Streett, *IMPACT-ECHO Non destructive Evaluation of Concrete and Masonry*. NEW YORK: Cayuga Press, 1997.
- [SER 90] F. J. Serón, F. J. Sanz, M. Kindelán, et J. I. Badal, « Finite-element method for elastic wave propagation », *Commun. Appl. Numer. Methods*, vol. 6, n° 5, p. 359-368, juill. 1990.
- [MAR 98] J. Martin, M. S. Hardy, A. S. Usmani, et M. C. Forde, « Accuracy of NDE in bridge assessment », *Eng. Struct.*, vol. 20, n° 11, p. 979-984, 1998.
- [MCC 01] D. M. McCann et M. C. Forde, « Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures », *Ndt E Int.*, vol. 34, n° 2, p. 71-84, 2001.
- [BIT 96] A. Bitri, J. Perrin, et A. Beauce, « La sismique réflexion haute résolution : principes et applications », p. 59, 1996.
- [CAR 15] N. J. Carino, « Impact Echo: The Fundamentals », *Int. Symp. Non-Destr. Test. Civ. Eng.*, 2015.
- [LYS 69] J. Lysmer et L. Kuhlemeyer, « Finite Dynamic Model for Infinite Media », 1969.