
Inversion différentielle des vitesses de phase des ondes de surface avec une différence des diagrammes : application sur des bicouches mortier/béton

Ao Wang, Mohamad Bader Eddin, Odile Abraham, Olivier Durand, Thibaud Devie, Gautier Gugole, Donatienne Laparoux

¹ *Laboratoire GeoEND-GERS, Université Gustave Eiffel, Campus Nantes*

RESUME L'inversion différentielle des ondes de surface est proposée dans cette étude dans le but de suivre des variations faibles de propriétés mécaniques. La différence des données, au lieu des données elles-mêmes, est utilisée comme données à inverser. Pour cela, une différence des diagrammes de dispersion, basée sur une distance d'histogrammes associés, est introduite. Cette méthode innovante est appliquée sur les données des trois dalles de mortier/béton, dont les propriétés des couches de mortier sont modifiées par changement du rapport eau-sur-ciment (E/C). Les résultats de l'inversion différentielle sont comparés aux résultats de l'inversion des courbes de dispersion classique, qui montrent l'amélioration de résolution des résultats d'inversion des ondes de surface par l'inversion différentielle. Cet avantage de l'inversion différentielle permet de mieux estimer les faibles variations dans les milieux, avec toutefois un temps de calcul très coûteux par rapport à l'inversion des courbes de dispersion.

Mots-clefs Méthodes des ondes de surface, Inversion différentielle, Distance des diagrammes, Modélisation expérimentale

I. INTRODUCTION

Dans le contexte du vieillissement des structures du génie civil au fil du temps ou de leur endommagement, le monitoring du matériau béton est de plus en plus fréquent. Parmi les nombreuses méthodes non destructives utilisées pour la surveillance, celles reposant sur les ondes *ultrasonores* de surface présentent l'avantage de permettre de remonter à des gradients de propriétés mécaniques via l'obtention puis l'inversion de courbes de dispersion.

Dans un premier temps la méthode classique Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW), qui utilise la courbe de dispersion de la vitesse de phase comme données à inverser, est mise en œuvre et les résultats présentés pour chacune des trois dalles. Cependant, l'inversion des courbes de dispersion n'est pas toujours capable d'estimer de petites variations du milieu (inférieures à quelques pourcents, en raison de la non-unicité de la solution voire de l'hétérogénéité des matériaux, comme dans le cas du béton). De surcroît, dans le cadre du monitoring, l'accès à des données à échéances rapprochées, pour lesquelles les modifications du béton peuvent être faibles,

autorise la mise en œuvre de nouvelles méthodes d'inversion qui tirent profit des données récoltées dans le temps sur un même endroit avec les mêmes dispositifs expérimentaux.

Nous proposons une nouvelle approche fondée sur l'inversion différentielle des diagrammes de dispersion : la différence des données, au lieu des données elles-mêmes, est utilisée comme donnée à inverser. Pour cela, une distance des diagramme de dispersion, basée sur une distance d'histogrammes, est introduite. Cette méthode va dans un premier temps être testée sur des données numériques et ensuite appliquée sur les données issues des trois dalles mortier/béton. Les résultats de ce nouveau schéma d'inversion seront comparés aux résultats de l'inversion des courbes de dispersion classique (MASW), puis la robustesse de cette méthode sera discutée.

II. Inversion Différentielle

Afin de suivre les variations temporelles dans un milieu, les mesures sont répétées à deux temps différents, et les données sont appelées « baseline » et « repeatline ». L'inversion classique par les méthodes des ondes de surface effectue deux inversions indépendantes et les variations du milieu sont estimées en calculant la différence entre les modèles issus des deux inversion (Fig. 1 (a)).

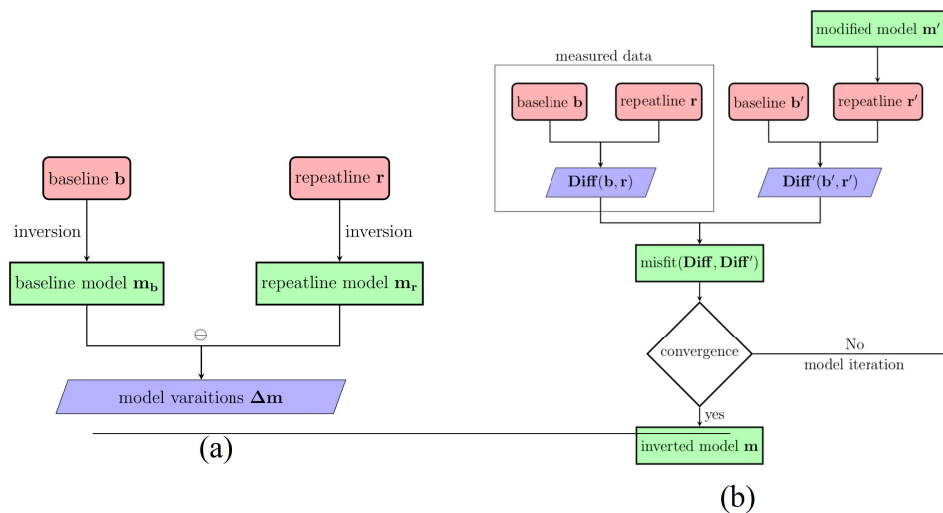


FIGURE 1. Processus de l'inversion classique (a) et de l'inversion différentielle (b).

L'inversion différentielle utilise quant à elle la différences entre le baseline et le repeatline ($\text{Diff}(\mathbf{b}, \mathbf{r})$) comme données d'entrée. Elle permet de lier la différence des données avec les variations du milieu (Fig. 1 (b)). Dans cette étude, nous proposons une approche innovante pour calculer la différence des données : la différence des diagrammes de dispersion, présentée dans la partie suivante.

III. Différence des diagrammes de dispersion

A. Histogramme distance

La différence des diagrammes de dispersion est basée sur la définition de la distance d'histogrammes de type ordinal, qui calcule à la fois la différence et la similarité entre deux histogrammes [1]. La définition de la distance des histogrammes de type ordinal est :

$$D_{ord}(A, B) = \sum_{i=0}^{q-1} \left| \sum_{j=0}^i (H_j(A) - H_j(B)) \right|$$

avec $H(A)$ et $H(B)$ deux histogrammes, $D_{ord}(A, B)$ la distance des histogrammes du type ordinal.

B. Distance des diagrammes de dispersion

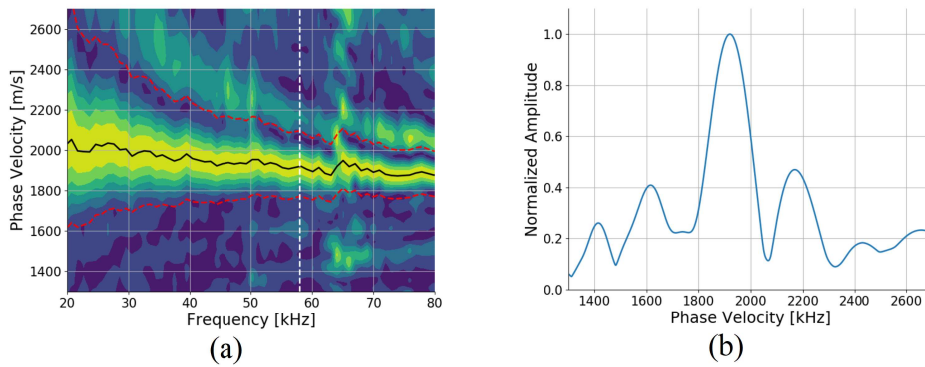


FIGURE 2. (a) Diagramme de dispersion mesuré pour la dalle de mortier/béton D01. (b) Amplitude normalisée à la fréquence $f=58\text{kHz}$.

La Fig. 2 (a) présente le diagramme de dispersion pour une dalle de béton (D01). Ceci est une présentation 3D : amplitude en fonction de la fréquence et la vitesse de phase. Fig. 2 (b) présente l'amplitude à la fréquence 58kHz, en fonction de la vitesse de phase. En considérant la Fig. 2 (b) comme une distribution de la vitesse, un diagramme de dispersion peut-être vu comme une série de distributions (ou histogrammes) de vitesse. Pour comparer deux jeux de mesure, il est possible de calculer, à chaque fréquence, la distance des deux distributions de vitesse. La différence des diagrammes de dispersion correspond à une série de distances d'histogramme, une à chaque fréquence.

IV. Application Expérimentale

Dans cette étude, nous utilisons les ondes de surface pour estimer la variation des propriétés mécaniques d'une couche de mortier de 3 cm d'épaisseur superposée sur une dalle de béton de surface 120 cm x 80 cm et d'épaisseur 20 cm. Les propriétés du mortier sont modifiées par changement du rapport eau-sur-ciment (E/C). Trois dalles (D01, D06, D08) sont ainsi étudiées avec des E/C égaux à 0,4, 0,55 et 0,7. Les montages expérimentaux sont montrés dans la Fig. 3 (a) et les courbes de dispersion des vitesse de phase mesurées sont montrées dans Fig. 3 (b). Les variations dans la couche de mortier sont observées avec la différence des courbes de dispersion à haute fréquences. Les différences des diagrammes de dispersion sont calculées pour deux groupes de baseline/repeatline et montrées dans Fig. 3 (c). Les valeurs des différences sont plus importantes à hautes fréquences : elles correspondent aux variations dans les couches de mortier.

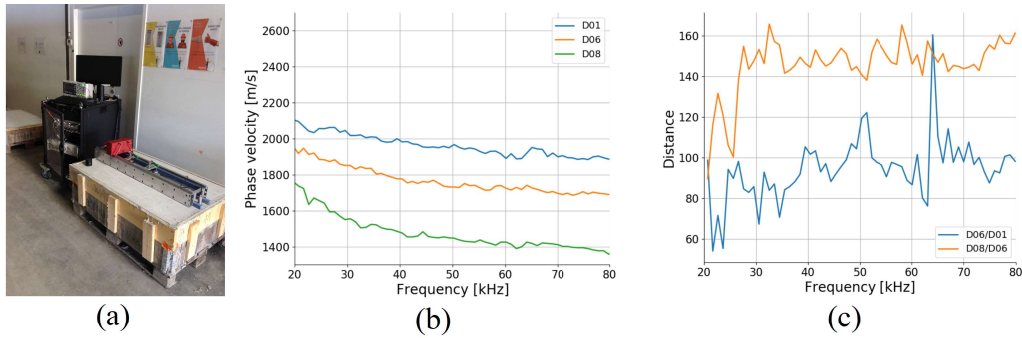


FIGURE 3. (a) Dispositif expérimental pour les mesure sur les dalles de mortier/béton. (b) Courbes de dispersion mesurées. (c) Différences des diagrammes de dispersion mesurés des deux groupes de baseline/repeatline.

Les résultats d'inversion différentielle, utilisant les dalles de mortier/béton D06/D01 comme baseline/repeatline, sont présentés avec des cercles bleus dans la Fig. 4, pour la dalle D01. Comparés aux résultats de l'inversion des courbe de vitesse de phase (point rouge), les résultats de l'inversion différentielle sont plus concentrés.

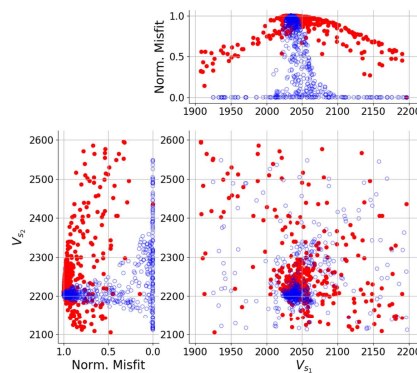


FIGURE 4. Résultats de l'inversion différentielle (cercle bleu) et de l'inversion de courbe de dispersion (point rouge).

V. Conclusion

L'inversion différentielle des courbes de dispersion des ondes de surface est proposée dans cette étude pour le monitoring de faibles variations du milieu. L'application de cette approche sur des données mesurées sur des dalles de mortier/béton montre que cette approche améliore la résolution des résultats de l'inversion et donc permet une meilleure estimation de faibles variations des propriétés mécaniques du matériau béton par rapport aux méthodes classiques d'inversion des ondes de surface.

REFERENCES

- [1] Cha, Sung-Hyuk, and Sargur N. Srihari. "On measuring the distance between histograms." *Pattern Recognition* 35.6 (2002): 1355-1370.