



**HAL**  
open science

## Etude de modèles analytiques 2D de la propagation ultrasonore pour l'inspection du béton

Nouhayla Khalid, Michel Darmon, Jean-François Chaix

► **To cite this version:**

Nouhayla Khalid, Michel Darmon, Jean-François Chaix. Etude de modèles analytiques 2D de la propagation ultrasonore pour l'inspection du béton. Journées COFREND 2023, Jun 2023, Marseille, France. 28533 (5 p.), 10.58286/28533 . cea-04292168

**HAL Id: cea-04292168**

**<https://cea.hal.science/cea-04292168>**

Submitted on 17 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Etude de modèles analytiques 2D de la propagation ultrasonore pour l'inspection du béton\*

Nouhayla Khalid<sup>1</sup>, Michel Darmon<sup>1</sup>, Jean-François Chaix<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120 Palaiseau France;

<sup>2</sup> Aix Marseille Université, Avenue Gaston Berger, 13625 Aix-En-Provence, France

E-mail: [nouhayla.khalid@cea.fr](mailto:nouhayla.khalid@cea.fr)

\* Titre modifié le 13/11/2023 après publication.

### Résumé

La simulation du contrôle non destructif (CND) par ultrasons joue un rôle important dans les évaluations et contrôles des structures en béton. Le béton est un milieu composite : la présence d'hétérogénéités conduit à la dispersion et à l'atténuation des ondes ultrasonores. Cela a un effet important sur le contrôle. Par conséquent, il est important de modéliser avec précision l'atténuation des ondes due à la diffusion par les différents composants présents dans le béton (granulats, porosités, microfissures...). Les méthodes ultrasonores classiquement utilisées reposent sur l'étude de l'onde cohérente caractérisée par sa vitesse et son atténuation. Cette onde peut être simulée à l'aide de modèles numériques ou analytiques. Les modèles numériques sont plus performants mais très coûteux dans le cas 3D, et le besoin de mettre en place une simulation rapide de contrôles conduit à une nécessité d'améliorer les modèles analytiques 3D simplifiés. Ces derniers considèrent une distribution uniforme de granulats dans une matrice de ciment mais le champ ultrasonore total dépend fortement des positions des obstacles. Notre étude porte sur la fonction de corrélation qui décrit la distribution de ces positions. La simplification de cette fonction qui suppose l'uniformité de la distribution peut conduire à des erreurs dans l'estimation de l'atténuation. En guise d'amélioration des modèles analytiques, on cherche à les adapter à une fonction de corrélation plus réaliste. Le travail présenté dans cette communication vise à établir un modèle analytique 2D et 3D amélioré pour la diffusion multiple intégrant une fonction de corrélation plus réaliste entre les diffuseurs. Une comparaison entre le modèle analytique dans sa version 2D et le code éléments finis ONDO développé par le CEA List sera présentée. La validation au cas 2D permet l'emploi de fonctions de corrélation similaires pour le cas 3D.

### 1. Introduction

Le contrôle non destructif par ultrasons est aujourd'hui largement utilisé pour concevoir des inspections de structures en béton. L'objectif est d'évaluer les dommages

subis par le béton sans l'altérer de manière permanente. Cet aspect est d'une importance cruciale pour le contrôle des ponts, des barrages, des bases d'éoliennes et de tours dans le domaine du génie civil ou pour le diagnostic de la structure en béton des centrales nucléaires par exemple. Cependant, la complexité du matériau (présence de différentes hétérogénéités: agrégats, porosités, microfissures) nécessite une modélisation précise des ondes diffusées par ces hétérogénéités. En raison des nombreux obstacles présents dans le béton, le phénomène de diffusion multiple est alors pris en compte. Des outils de prédiction particulièrement rapides ont été développés afin de simuler la propagation des ondes élastiques dans le béton. Le code d'éléments finis 2D [1] en cours de développement dans le logiciel de simulation CIVA NDT et le code SPECFEM 2D [2] sont des exemples d'approches numériques basées sur la méthode des éléments finis (FEM). Prospero [3,4] est basé sur la méthode des différences finies. Les approches numériques sont plus efficaces mais restent limitées dans le cas 3D (diffusion multiple par des obstacles sphériques) par leur temps de calcul. Par conséquent, les méthodes d'homogénéisation semi-analytiques sont considérées comme une solution pratique pour mettre en place une simulation 3D rapide. Ces méthodes sont basées sur l'étude de l'onde cohérente moyenne, et les paramètres observables sont l'atténuation et la vitesse de phase de cette onde. Ici, nous nous concentrons sur une modélisation analytique en 2D : la diffusion multiple par des obstacles cylindriques. La validation de cette approche dans le cas 2D permettra d'envisager dans le futur l'utilisation de techniques similaires pour la modélisation analytique 3D.

Il existe de nombreux modèles d'homogénéisation différents dans la littérature. Foldy [5] a initié une approche stochastique intégrant le phénomène de la diffusion multiple. Watermann et Truell [6] ont modifié la théorie de Foldy et l'ont étendue au cas des diffuseurs anisotropes. Ces deux derniers modèles considèrent des particules indépendantes, et donc aucune fonction de corrélation entre les diffuseurs n'est prise en compte. En 1964, Fikioris et Waterman [7] ont modifié la description de la position des particules diffusantes. Elles ne sont plus indépendantes et une fonction de corrélation permet de décrire la distribution des distances entre deux diffuseurs voisins. La fonction

utilisée est la plus simple, elle est appelée la Hole Correction. Elle permet de respecter la condition obligatoire de non-interpénétration entre les disques durs en introduisant la distance d'exclusion autorisée entre les centres de deux diffuseurs adjacents. Sur la base de la théorie de Fikioris et Waterman, Linton et Martin [8] ont proposé plus récemment un modèle dérivé dans le cas de la diffusion multiple acoustique. Conoir et Norris [9] ont étendu le même modèle au cas élastique.

Cet article propose d'évaluer le modèle de Conoir et Norris pour les structures en béton, et de comparer les résultats de la modélisation analytique avec ceux des éléments finis numériques en 2D. Pour la simulation numérique, le code numérique d'éléments finis 2D en cours de développement dans le logiciel de simulation CIVA NDT et le progiciel SPECFEM 2D ont été utilisés. La section II décrit la théorie de la diffusion multiple et le modèle d'homogénéisation. L'évaluation de ce modèle et ses limites pour les structures en béton sont présentées dans la section III. Dans la section IV, les limites observées dans les simulations analytiques sont analysées. Enfin, des conclusions et des perspectives de travail sont présentées à la section V.

## 2. Diffusion multiple et modèles d'homogénéisation

La théorie de l'homogénéisation consiste à remplacer un milieu hétérogène par une distribution aléatoire d'hétérogénéités simplifiées, puis à assimiler ce milieu géométrique à un milieu de référence efficace homogène (Fig. 1). Cette théorie permet d'extraire des paramètres effectifs homogènes à partir de milieux désordonnés ou hétérogènes.

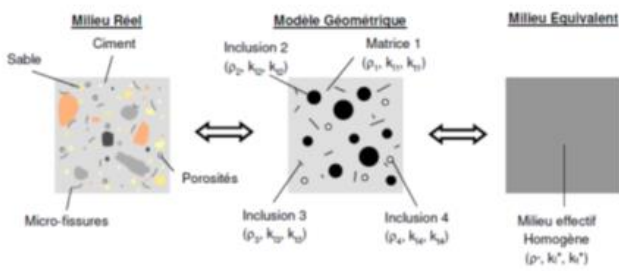


Figure 1: Milieu réel, modèle géométrique et milieu homogène équivalent.

Dans cette étude, nous considérons des géométries cylindriques. Les diffuseurs sont alors des cylindres de granulates répartis aléatoirement dans une matrice de ciment. Les deux matériaux sont caractérisés par leur masse volumique  $\rho$  et les vitesses des ondes longitudinales et transversales, respectivement  $c_L$  et  $c_T$ . Leurs propriétés sont illustrées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1: Paramètres des matériaux

Matrice	$\rho$ ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )	$c_L$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )	$c_T$ ( $\text{m.s}^{-1}$ )
Ciment	2050	3950	2250
Agrégats	2610	4300	2475

Les caractéristiques effectives de l'onde incidente longitudinale, c'est-à-dire la vitesse de phase et l'atténuation  $\alpha$  sont définies à partir du nombre d'ondes complexe effectif :

$$k_{eff} = \frac{2\pi f}{c} + i\alpha. \quad (1)$$

### 2.1. Le modèle de Conoir et Norris

On considère  $N$  diffuseurs cylindriques identiques de rayon  $a = 6 \text{ mm}$  situés aux points  $r_1, r_2, \dots, r_N$ . Ils sont uniformément répartis sur un milieu semi-infini de surface  $S$ . Les positions des  $N$  cylindres dépendent les uns des autres. Nous définissons la distance d'exclusion  $b$  comme la distance minimale autorisée entre les centres de deux diffuseurs adjacents (Fig. 2).

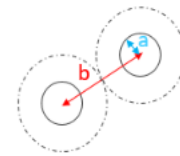


Figure 2: Distance d'exclusion.

La fraction surfacique maximale qui peut être atteinte en deux dimensions (pour une surface parfaitement périodique) est la suivante  $\phi_{max} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0.907$ . Ainsi, nécessairement,  $\phi_b \leq \phi_{max}$ , qui impose pour un ensemble de diffuseurs cylindriques [10] :

$$b \leq b_{max} = 2a \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}\phi}} \approx 2a \sqrt{\frac{0.907}{\phi}}. \quad (2)$$

Afin de respecter la condition obligatoire de non-intépenétrabilité pour les cylindres durs, la distance  $b$  doit être au moins égale au diamètre du cylindre  $b_{min} = 2a$ . Par conséquent, la distance d'exclusion est bornée :

$$b_{min} \leq b \leq b_{max}. \quad (3)$$

La probabilité conditionnelle d'existence d'un diffuseur en un point  $r_2$  sachant qu'un autre diffuseur est déjà situé à  $r_1$  est choisie comme étant :

$$p(r_2|r_1) = \begin{cases} 0, & R_{12} < b, \\ \frac{n_0 g(R_{12})}{N}, & R_{12} > b, \end{cases} \text{ avec } R_{12} = |r_2 - r_1|, \quad (4)$$

où la fonction  $g$  est la fonction de corrélation de paires. Le choix le plus simple de cette fonction est la Hole Correction (fig. 3). Cette dernière permet de respecter la condition de non-interpénétration : au-delà de la distance d'exclusion  $b$ , il existe une équiprobabilité d'existence d'un diffuseur à une

certaine distance d'un autre diffuseur. Nous utiliserons cette fonction pour la totalité de nos analyses.

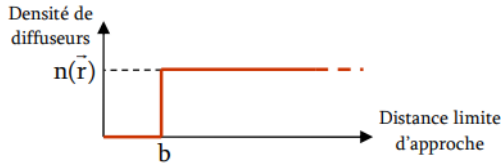


Figure 3: La Hole Correction.

On considère un milieu isotrope dans lequel peuvent se propager à la fois des ondes longitudinales et transversales. Le modèle utilisé pour nos applications est celui de Conoir et Norris [9]. Par conséquent, le nombre d'ondes complexe effectif  $k_{eff}$  pour une onde incidente longitudinale se propageant dans le milieu homogène équivalent peut être écrit selon la formule suivante [9] :

$$k_{eff}^2 = k_L^2 + \delta_1 n + \delta_2 n^2, \quad (5)$$

$k_L$  est le nombre d'onde dans la matrice,  $n$  est la densité des diffuseurs dans le milieu, et  $\delta_1$  et  $\delta_2$  sont définis dans les Eq. (62a, 62b) de la Ref. 9.

### 3. Evaluation des modèles d'homogénéisation élastiques 2D pour des structures en béton

Afin d'évaluer le modèle de Conoir et Norris (CN) pour les structures en béton, on peut étudier sa réponse en termes de vitesse de phase et d'atténuation, en fonction de la fréquence de l'onde incidente longitudinale, et en comparaison avec les deux outils numériques FEM : les logiciels CIVA FEM 2D et le logiciel SPECFEM 2D.

CIVA est une plate-forme de simulation et d'analyse des CND/SHM, qui comprend des outils de simulation pour différentes techniques de CND, notamment des modèles ultrasonores validés de manière intensive [11,12]. Des modèles d'inspection ultrasonore [13] basés sur le principe de réciprocité ont été conçus pour simuler la réponse ultrasonique des défauts pour diverses configurations de CND [14].

CIVA FEM 2D est un code d'éléments finis élastodynamique transitoire intégré dans CIVA pour diverses applications, il permet en effet de simuler des inspections de défauts de type fissure [15,16] avec une prédiction plus précise des ondes de tête que les modèles [17-20] développés pour des formes canoniques ; il est désormais également adapté à la modélisation du béton [1]. SPECFEM 2D est un code numérique basé sur des éléments spectraux [2] qui a également été utilisé pour la simulation de la propagation des ondes dans le béton [21]. Les outils CIVA FEM 2D et SPECFEM 2D utilisent tous deux des éléments finis d'ordre élevé.

L'étude est réalisée pour des concentrations d'agrégats allant de 12% à 42%. La distance d'exclusion est fixée au diamètre du cylindre afin que la condition de non-interpénétration soit respectée.

Le milieu simulé est un béton composé d'une matrice de ciment dans laquelle sont introduites des particules diffusantes cylindriques (Tableau 1).

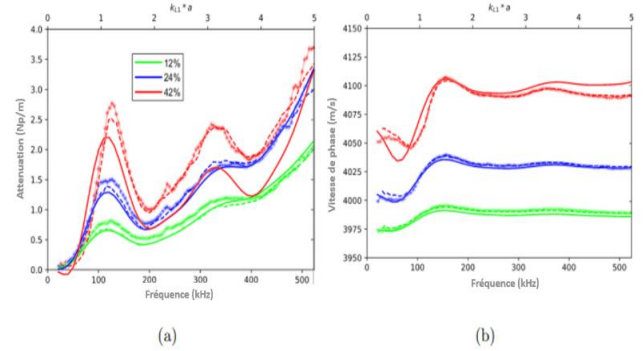


Figure 4: Atténuation (4a) et vitesse de phase (4b) en fonction de la fréquence pour une onde incidente longitudinale. Comparaison entre CN (traits pleins), CIVA 2D (pointillés), et SPECFEM 2D (étoiles).

Nous observons (Fig. 4) un bon accord entre le modèle analytique CN et les deux modèles numériques pour des concentrations de 12 et 24%. Cependant, le désaccord augmente avec des concentrations plus élevées. Pour une concentration de 42%, nous remarquons non seulement un changement inattendu vers des valeurs négatives de l'atténuation effective dans le régime des basses fréquences, mais aussi une sous-estimation de ces valeurs dans le régime des hautes fréquences.

### 4. Etude de la corrélation entre les diffuseurs

Afin d'étudier la raison du passage à des valeurs négatives dans le régime des basses fréquences, une étude de la corrélation entre les diffuseurs est proposée dans cette section. La valeur prise pour la distance d'exclusion est susceptible d'avoir un impact sur les propriétés effectives du milieu. Nous nous concentrons donc sur l'analyse de son effet sur l'atténuation en fonction des différents régimes de fréquence, afin de prendre sa valeur optimale pour les structures en béton.

La distance d'exclusion est définie comme la distance minimale autorisée entre les centres de deux diffuseurs adjacents (Fig. 2). Quand la concentration des diffuseurs augmente, la distance d'exclusion doit converger vers sa valeur minimale, c'est-à-dire  $b_{min} = 2a$ . La figure 5 présente 3 exemples de distributions aléatoires des diffuseurs. Lorsque la concentration des diffuseurs atteint la densité maximale autorisée dans le milieu, la distance d'exclusion tend à être égale au diamètre du diffuseur. Cependant, la distance d'exclusion converge vers

l'expression  $b_{max} = 2a \sqrt{\frac{\phi_{max}}{\phi}}$  lorsque la densité diminue.

Généralement, cette distance peut être choisie plus faible en fixant  $b \leq b_{max}$ .

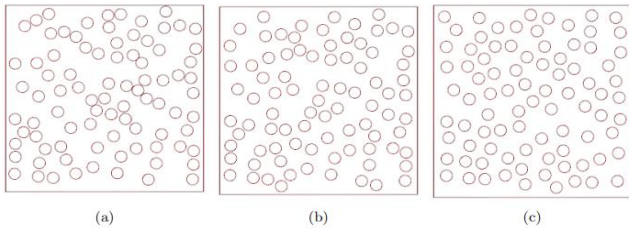


Figure 5: Distributions aléatoires de 24% d'agrégats dans une matrice de ciment pour différentes valeurs de  $b$  (distance d'exclusion)  $b = 2a$  (5a),  $b = 2.25a$  (5b) and  $b = 2.65a$  (5c).

Nous simulons le modèle analytique CN pour les mêmes valeurs de  $b$  dans la figure 5, afin d'évaluer l'effet de la distance d'exclusion sur l'atténuation effective en fonction des différents régimes de fréquence.

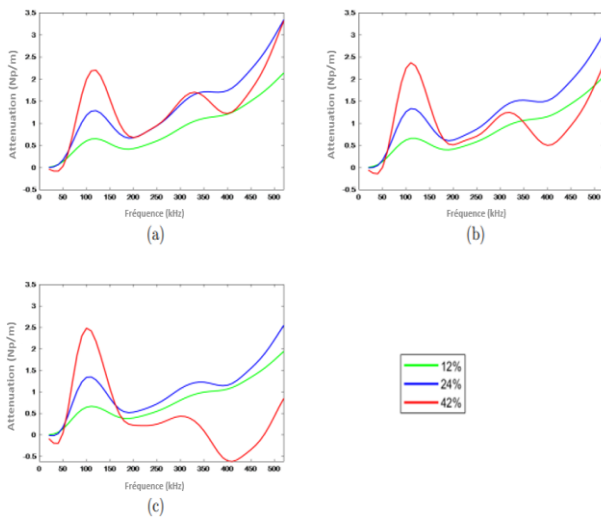


Figure 6: Atténuations effectives obtenues avec le modèle de Conoir et Norris pour différentes valeurs de distances d'exclusion  $b = 2a$  (6a),  $b = 2.25a$  (6b) and  $b = 2.65a$  (6c).

La distance d'exclusion a un effet très remarquable en hautes fréquences: lorsqu'elle augmente, l'atténuation effective diminue. Pour les basses fréquences, c'est le contraire qui se produit: les valeurs absolues de l'atténuation effective augmentent lorsque la distance  $b$  augmente.

La modification de la valeur de la distance d'exclusion entre les diffuseurs semble avoir un impact sur les valeurs d'atténuation. Cependant, cette modification ne permet pas d'améliorer la validité du modèle analytique. Afin de se rapprocher de la configuration réelle du béton, une étude supplémentaire de la corrélation entre les diffuseurs est nécessaire.

## 5. Conclusions

La propagation de l'onde longitudinale dans un milieu hétérogène (ciment) comprenant des diffuseurs élastiques cylindriques (agrégats) a été analysée. L'atténuation effective et la vitesse de phase sont évaluées à l'aide du modèle de Conoir et Norris (CN). Pour les basses fréquences, l'atténuation effective calculée montre un passage vers des valeurs négatives pour une concentration élevée de diffuseurs, ce qui n'est pas physique. Pour comprendre cette erreur de prédiction, il est nécessaire d'étudier la corrélation entre les positions des particules; la distance d'exclusion entre les centres des diffuseurs possède un effet important sur les paramètres effectifs. Cette distance doit non-seulement respecter la condition de non-interpénétrabilité pour les cylindres durs, mais aussi décrire la réalité de la distribution des diffuseurs. Cependant, même la modification de la distance d'exclusion ne permet pas d'assurer la validité du modèle CN pour les fortes concentrations. Une perspective d'amélioration du modèle analytique pourrait consister à mieux décrire les corrélations par paires entre les diffuseurs.

## Références

- [1] V. Dorval, A. Imperiale, M. Darmon, E. Demaldent, J.-M. Henault, FEM-based simulation tools for ultrasonic concrete inspection, *e-Journal of Nondestructive Testing. International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, 27(9), 2022.
- [2] D. Komatitsch, J. Tromp, Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. *Geophysical Journal International*, 139(3), 806-822, 1999.
- [3] M. Chekroun, L. Marrec, B. Lombard, J. Piraux, Time-domain numerical simulations of multiple scattering to extract elastic effective wavenumbers. *Waves in Random and Complex Media*, 22(3), 398-422, 2012.
- [4] M. Ramaniraka, S. Rakotonarivo, C. Payan, V. Garnier, Effect of the Interfacial Transition Zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete. *Cement and Concrete Research*, 124, 105809, 2019.
- [5] L.-L. Foldy, The Multiple Scattering of Waves. I. General Theory of Isotropic Scattering by Randomly Distributed Scatterers. *Physical Review*, 67(3-4), 107-119, 1945.
- [6] P. C. Waterman, R. Truell, Multiple Scattering of Waves. *Journal of Mathematical Physics*, 2(4), 512-537, 1961.
- [7] J. G. Fikioris, P.-C. Waterman, Multiple Scattering of Waves. II. "Hole Corrections" in the Scalar Case. *Journal of Mathematical Physics*, 5(10), 1413-1420, 1964.

- [8] C. M. Linton, P.A. Martin, Multiple scattering by random configurations of circular cylinders: Second-order corrections for the effective wavenumber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(6), 3413–3423, 2005.
- [9] J.-M. Conoir, A.N. Norris, Effective wavenumbers and reflection coefficients for an elastic medium containing random configurations of cylindrical scatterers. *Wave Motion*, 47(3), 183–197, 2010.
- [10] A. Rohfritsch, Diffusion multiple en milieux désordonnés : influence des propriétés macroscopiques et microscopiques sur les ondes cohérentes. Thèse Sorbonne université, 2021.
- [11] G. Toullelan, R. Raillon, S. Chatillon, V. Dorval, M. Darmon, S. Lonné, Results of the 2015 UT modeling benchmark obtained with models implemented in CIVA. *AIP Conference Proceedings*, 1706, 2016.
- [12] R. Raillon, S. Bey, A. Dubois, S. Mahaut, M. Darmon, Results of the 2009 ut modeling benchmark obtained with civa: responses of notches, side-drilled holes and flat-bottom holes of various sizes. *AIP Conference Proceedings*, 1211, 2010.
- [13] V. Dorval, S. Chatillon, B. Lu, M. Darmon, S. Mahaut, A general Kirchhoff approximation for echo simulation in ultrasonic NDT. *AIP Conference Proceedings*, 1430, 2012.
- [14] M. Darmon, A. Ferrand, V. Dorval, S. Chatillon, S. Lonné, Recent modelling advances for ultrasonic TOFD inspections, *AIP Conference Proceedings*, 1650, 2015.
- [15] A. Imperiale, S. Chatillon, M. Darmon, N. Leymarie, E. Demaldent, UT simulation using a fully automated 3D hybrid model: Application to planar backwall breaking defects inspection. *AIP Conference Proceedings*, 1949, 2018.
- [16] M. Darmon, G. Toullelan, V. Dorval, An experimental and theoretical comparison of 3D models for ultrasonic non-destructive testing of cracks: Part I, Embedded cracks. *Applied Sciences*, 12(10), 5078, 2022.
- [17] L.J. Fradkin, M. Darmon, S. Chatillon, P. Calmon, A semi-numerical model for near-critical angle scattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(1), 141–150, 2016.
- [18] V. Zernov, L. Fradkin, A. Gautesen, M. Darmon, P. Calmon, Wedge diffraction of a critically incident Gaussian beam. *Wave Motion*, 50(4), 708–722, 2013.
- [19] G. Huet, M. Darmon, A. Lhéemery, S. Mahaut, Modelling of corner echo ultrasonic inspection with bulk and creeping waves. In: Leger, A., Deschamps, M. (eds) *Ultrasonic Wave Propagation in Non-Homogeneous Media*. Springer Proceedings in Physics, vol 128. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [20] S. Chehade, M. Darmon, G. Lebeau, 2D elastic plane-wave diffraction by a stress-free wedge of arbitrary angle, *Journal of Computational Physics*, 394, 532-558, 2019.
- [21] T. Yu, J.-F. Chaix, L. Audibert, D. Komatitsch, V. Garnier, J.-M. Hénault, Simulations of ultrasonic wave propagation in concrete based on a two-dimensional numerical model validated analytically and experimentally. *Ultrasonics*, 92, 21–34, 2019.