

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Propagation des ondes ultrasonores dans le béton : comparaison de modélisations numériques 2D et de Contrôles non Destructifs in situ**

T. Yu<sup>a</sup>, J.-F. Chaix<sup>b</sup>, L. Audibert<sup>c</sup>, D. Komatitsch<sup>d</sup>, V. Garnier<sup>e</sup> et J.-M. Henault<sup>c</sup>

<sup>a</sup>LMA CNRS / EDF R&D, 4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille, France

<sup>b</sup>LMA, CNRS UPR7051, Aix Marseille Université, Centrale Marseille, 4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille, France

<sup>c</sup>EDF R&D, 6 Quai Watier, 78401 Chatou, France

<sup>d</sup>Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA), 4 impasse Nikola Tesla, 13013 Marseille, France

<sup>e</sup>LMA CNRS, 4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille, France

ting.yu@edf.fr

Cette étude focalise sur la propagation des ondes ultrasonores dans un milieu avec une forte hétérogénéité comme celle présente dans le béton. Un modèle numérique 2D adapté au béton est construit dans Specfem2D (méthode des éléments spectraux) afin de simuler la propagation des ondes dans un milieu hétérogène. Une onde plane longitudinale diffusée par de multiples diffuseurs est simulée dans le domaine élastique et une étude paramétrique est faite en prenant en compte la distribution des tailles, la concentration et la forme des diffuseurs. A partir des évolutions de la vitesse de phase de l'atténuation des ondes cohérentes (en fonction de la fréquence), ces simulations sont comparées avec le modèle d'homogénéisation, Waterman-Truell. A la suite de ce travail, la viscoélasticité est introduite dans la loi de comportement par un facteur de qualité  $Q$  constant (modèle à  $Q$  constant) pour la matrice du milieu hétérogène, et des simulations sont réalisées avec ce modèle numérique et comparées avec des mesures in situ réalisées sur un mur de béton d'une maquette d'enceinte de confinement d'une centrale nucléaire (VeRCoRs - EDF).

## 1 Introduction

La surveillance des structures de génie civil constitue un enjeu majeur pour les maîtres d'ouvrages. Les Essais Non Destructifs (END) par ultrasons permettent de caractériser le béton en évaluant notamment ses propriétés mécaniques et sa composition structurale sans le dégrader [1]. Ils sont donc adaptés au contrôle et au suivi in situ des structures. Cependant, les longueurs d'onde utilisées étant du même ordre de grandeur que les tailles des éléments constitutifs du béton, les signaux mesurés sont complexes à analyser. Afin d'optimiser les techniques ultrasonores, il est nécessaire de mieux comprendre et de modéliser les phénomènes associés.

Cette étude focalise donc sur la propagation des ondes ultrasonores dans un milieu avec une forte hétérogénéité comme celle présente dans le béton. Un modèle numérique 2D adapté au béton est construit dans Specfem2D (méthode des éléments spectraux) [2] afin de simuler la propagation des ondes dans un milieu hétérogène.

## 2 Matériaux et ondes

Nous ne considérons, dans le premier temps, que deux phases présentes dans le milieu hétérogène élastique : matrice et inclusions. Afin d'adapter au béton, la matrice correspond au mortier considéré comme l'homogénéisation de la pâte de ciment, des pores et des petits grains (sables), et les inclusions sont représentatives des granulats.

Les propriétés utilisées sont tirées de l'étude de Schubert [3]: masse volumique  $\rho_1=2050$  kg/m<sup>3</sup>, vitesses longitudinale  $c_{p1}=3950$  m/s et transversale  $c_{s1}=2250$  m/s pour le mortier, et  $\rho_2=2610$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p2}=4300$  m/s et  $c_{s2}=2475$  m/s pour les granulats. Nous indiquons  $p$  et  $s$  respectivement pour les ondes longitudinales et transversales, 1 et 2 respectivement pour la matrice et les diffuseurs.

Le béton dans le projet VeRCoRs [4], qui a permis la réalisation d'une maquette à l'échelle 1/3 d'une enceinte de confinement à double parois, est un des bétons ciblés dans notre étude. A partir de sa formulation, nous prenons en considération les tailles, la distribution, et la concentration des granulats.

Nous nous intéressons au régime stochastique, où la longueur d'onde  $\lambda_{p1}$  est du même ordre de la taille des diffuseurs  $a$ , et  $k_{p1} \cdot a \approx 1$  avec le nombre d'onde dans la matrice  $k_{p1} = 2\pi \cdot f / c_{p1}$ . Ce domaine porte des informations liées aux interactions importantes entre les ondes et les diffuseurs sous forme de diffusion.

D'une part, en considérant la taille maximale des granulats (rayon effectif d'environ 11 mm) dans le béton VeRCoRs, nous déterminons la fréquence minimale d'interaction à  $f=50$  kHz, ce qui donne  $k_{p1} \cdot a \approx 1$ .

D'autre part, l'augmentation de la fréquence des ondes engendre une croissance importante de l'atténuation qui est observée dans les mesures. Par conséquent, nous imposons que la fréquence maximale pour notre étude est de l'ordre de 500 kHz, qui soit souvent la fréquence utilisée lors des mesures faites dans les méthodes de diffusion.

Afin d'étudier dans le domaine fréquentiel entre 50 kHz et 500 kHz, nous utilisons une fonction temporelle de Ricker (dérivée seconde de Gaussienne) pour notre onde incidente, avec une fréquence dominante de 250 kHz dans toutes nos simulations numériques du béton. Ses formes temporelle et fréquentielle sont illustrées sur la Figure 1, et nous observons que l'énergie de cette onde se concentre bien sur la gamme fréquentielle intéressée. Sa forme est proche des réponses impulsionnelles des capteurs utilisées en expérimentations.

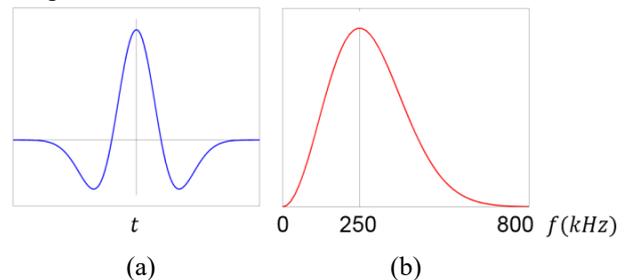


Figure 1: Ondelette de Ricker (dérivée seconde de Gaussienne) avec une fréquence dominante de 250 kHz : (a) forme temporelle et (b) forme fréquentielle

La taille des granulats est de rayon effectif  $a$  allant de 0 à 11 mm. Sur le domaine fréquentiel de 50 kHz à 500 kHz, la diffusion devient importante quand la taille augmente. Nous observons qu'en dessous de  $a=1$  mm, la valeur  $k_{p1} \cdot a$  est inférieure à 1 sur toute la gamme fréquentielle, et nous considérons donc que la diffusion est trop faible et négligeable. Par conséquent, les granulats en dessous de  $a=1$  mm sont homogénéisés dans le mortier, et nous ne prenons en compte que ceux au-dessus de  $a=1$  mm. Dans ce cas, la fraction volumique des granulats dans le béton VeRCoRs diminue à 44 %.

## 3 Modèle numérique élastique

Nous construisons un modèle élastique de la propagation des ondes dans un milieu hétérogène adapté au béton dans le logiciel SPECFEM2D.

### 3.1 Configuration

Dans la configuration numérique indiquée sur la Figure 2, une onde plane longitudinale incidente de Ricker se propage de gauche à droite dans une géométrie composée de trois zones : une zone du milieu hétérogène de dimension  $X \times Z$ , et deux zones de la matrice homogène de dimension  $X' \times Z$  et  $X'' \times Z$ .

Pour la longueur du milieu hétérogène  $X$ , nous prenons  $X = 400$  mm qui est l'épaisseur du mur de l'enceinte de VeRCoRs. Elle est également assez grande devant les tailles des granulats et les longueurs d'onde dans le domaine fréquentiel étudié (elle correspond à  $4,6\lambda_{\max}$  lorsque  $\lambda_{\max} = \lambda_{p1}$  à la fréquence 50 kHz). Pour la largeur du milieu hétérogène  $Z$ , nous prenons des dimensions du même ordre : 400 mm ou 600 mm (600 mm uniquement dans le cas avec des cercles de taille uniforme 6 mm). Nous déterminons  $X' = X'' = 100$  mm, et l'onde plane de Ricker se situe dans la zone  $X' \times Z$  et à 20 mm de l'interface entre les zones  $X' \times Z$  et  $X \times Z$  à  $t = 0$  s.

Dans le milieu hétérogène ( $X \times Z$ ), nous positionnons des diffuseurs de manière aléatoire et de deux formes différentes : cercles et polygones.

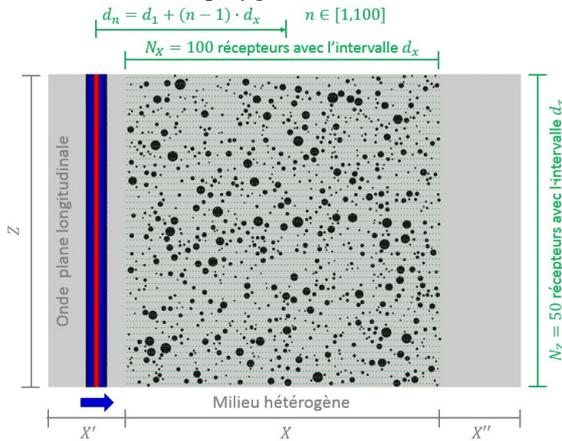


Figure 2: Géométrie numérique du milieu hétérogène : Exemple d'un milieu hétérogène avec des diffuseurs cylindriques de rayons variés et de fraction surfacique 24%.

### 3.2 Récepteurs et traitements

Afin de permettre la comparaison avec les modèles d'homogénéisation et d'évaluer la propagation des ondes en milieu hétérogène, nous pouvons analyser les déplacements pour obtenir les deux paramètres effectifs des ondes cohérentes, la vitesse de phase et l'atténuation.

Pour chaque simulation, nous utilisons 5000 récepteurs ponctuels pour enregistrer le champ de déplacement dans la zone du milieu hétérogène  $X \times Z$  comme indiqué sur la Figure 2 :  $N_Z = 50$  lignes de récepteurs avec une distance entre les lignes  $d_Z$  (8 mm ou 12 mm) et  $N_X = 100$  récepteurs par ligne espacés d'une distance  $d_X = 4$  mm.

Le calcul de la vitesse de phase  $c^*(\omega)$  et de l'atténuation  $\alpha^*(\omega)$  dépendantes de la pulsation  $\omega$ , est fondé sur l'hypothèse importante que l'onde cohérente dans ce milieu hétérogène se propage de la même manière que dans un milieu homogène viscoélastique effectif. À partir des phases de l'onde cohérente, nous utilisons la méthode de la transformée  $p-\omega$  pour estimer la vitesse de phase [5].

$\alpha^*(\omega)$  peut être estimée en supposant que l'amplitude diminue de manière exponentielle avec la distance de propagation

### 3.3 Validation du modèle

Dans le cas avec un seul cercle, nous avons validé le logiciel SPECFEM2D en comparant la solution analytique et la solution issue des résultats numériques pour la section différentielle de diffusion en champ lointain [6].

Dans le cas avec des cercles, ce modèle est validé expérimentalement à l'aide d'un milieu synthétique (bloc en résine avec des tiges en aluminium traversantes sur la figure 3) à forte hétérogénéité (jusqu'à 40 %) en comparant les deux paramètres effectifs des ondes cohérentes. Le modèle d'homogénéisation, le modèle Waterman-Truell [7] est également comparé. Nous ne détaillons pas les résultats ici.

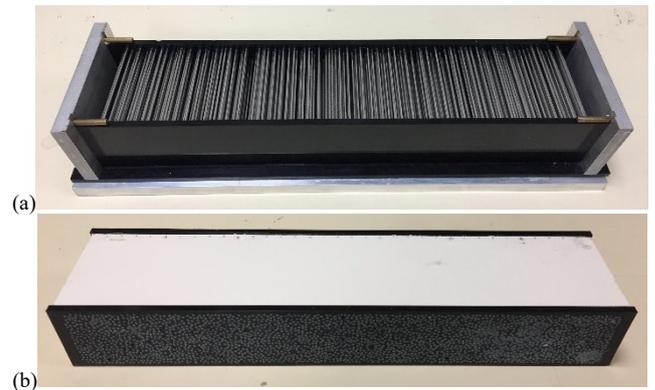


Figure 3: Exemple d'éprouvettes en résine avec des tiges en aluminium : (a) avant le coulage de résine et (b) après le démoulage.

## 4 Etude paramétrique

En nous basant sur le modèle construit, nous avons réalisé une étude paramétrique sur la concentration, la forme des diffuseurs et la distribution des tailles.

### 4.1 Concentration des diffuseurs

Dans un premier temps, nous avons simulé trois cas avec des cercles de taille unique de 6mm aux fractions surfaciques 12 %, 24 % et 42 % dans le logiciel SPECFEM2D. Nous les avons comparés avec le modèle Waterman-Truell (WT) [7], qui est le modèle le plus utilisé dans la littérature [8-9]. Il prend en considération la diffusion vers l'avant ainsi que vers l'arrière (la rétro-diffusion), et il peut être écrit à l'aide du nombre d'onde effectif  $k^* = \omega / c^* + i \cdot \alpha^*$ , sous la forme suivante :

$$(k_p^*)^2 = k_{p1}^2 + \delta_1 n_0 + \delta_2 n_0^2$$

avec

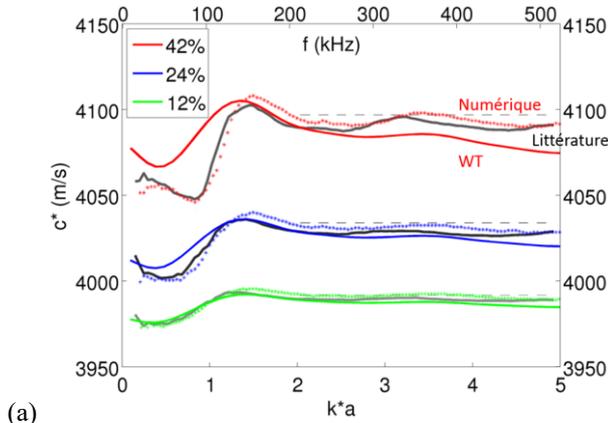
$$\delta_1 = \frac{4\sqrt{\pi k_{p1}}}{1+i} f_{pp1}(0), \quad \delta_2 = -\frac{2\pi \cdot i}{k_{p1}} ([f_{pp1}(0)]^2 - [f_{pp1}(\pi)]^2)$$

où  $n_0$  est la densité de diffuseurs dans le milieu,  $f_{pp1}(0)$ ,  $f_{pp1}(\pi)$  sont les amplitudes de diffusion en champ lointain des ondes diffusées longitudinales respectivement vers l'avant et vers l'arrière pour une onde plane longitudinale incidente avec une amplitude unitaire.

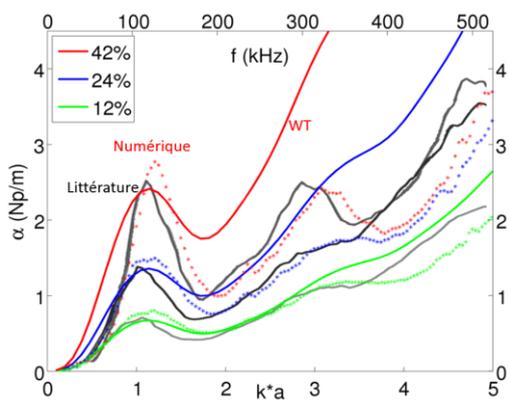
Les résultats numériques sont montrés sur la Figure 4. La vitesse de phase varie quasiment de manière linéaire avec la fraction surfacique des cercles pour une fréquence donnée. À basse fréquence ( $\leq 200$  kHz), une variation de l'amplitude de la vitesse est observée et la valeur maximale est obtenue autour de la fréquence de 150 kHz. Plus la fraction surfacique est élevée, plus la variation est importante. À haute fréquence ( $\geq 200$  kHz), la vitesse reste quasiment constante. Concernant l'atténuation, deux « bosses » sont observées respectivement autour de 130 kHz et 340 kHz; elles sont de plus en plus marquées avec l'augmentation de la fraction surfacique. Cela peut s'expliquer par les nombreux espaces de taille similaire entre les cercles de même taille. En effet, bien que les positions des cercles soient aléatoirement distribuées dans une zone limite, leur arrangement global s'approche d'un arrangement périodique et de plus en plus d'espaces entre les cercles convergent vers une même taille lorsque la fraction surfacique augmente.

En nous basant sur les évolutions de vitesse de phase et d'atténuation effectives, nos simulations effectuées sous SPECFEM2D sont également comparées avec d'autres résultats numériques indépendants (en trait plein noir sur la Figure 4) obtenus avec un autre logiciel, appelé Prospero, et qui sont disponibles dans la littérature [9]. Les deux résultats numériques résolus avec les deux logiciels sont quasiment superposés, à part de faibles écarts entre les atténuations à haute fréquence ( $>300$  kHz). Cet accord valide également notre modèle numérique.

Le modèle WT (en traits pleins colorés) permet une bonne description de la vitesse et de l'atténuation pour des diffuseurs cylindriques jusqu'à la fraction 12 %.



(a)



(b)

Figure 4: Comparaison de (a) la vitesse de phase et de (b) l'atténuation effectives entre les simulations avec le logiciel Specfem2D (en pointillés), le modèle de WT (en

traits pleins colorés) et des résultats numériques indépendants obtenus avec un autre logiciel, appelé PROSPERO, dans la littérature (en traits pleins noirs) pour le cas avec des cercles de 6 mm à la fraction surfacique 12 %, 24 % et 42 %.

Dans le cas suivant, nous avons simulé des cercles des tailles variées aux trois fractions surfaciques 12 %, 24 % et 42 %. La distribution des tailles est issue du béton VeRCoRs, et elle est donnée par la courbe en bleu sur la Figure 5.

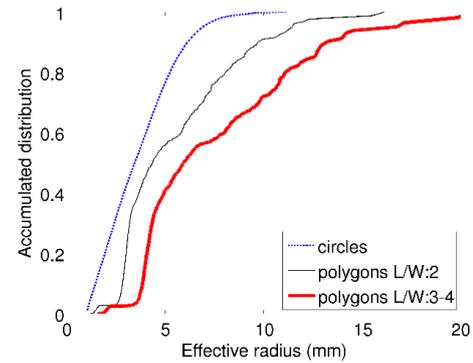
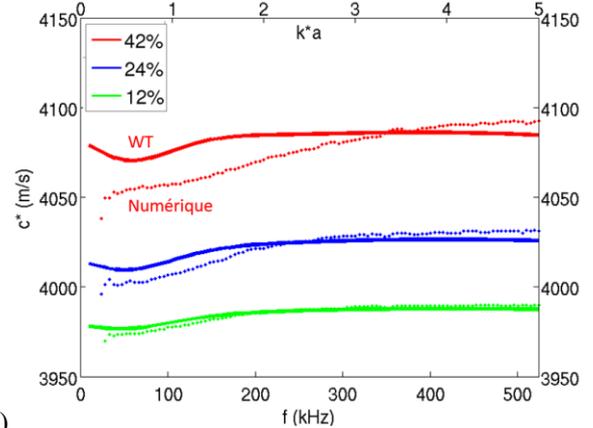


Figure 5: Distributions des tailles dans le cas des cercles de tailles variées (en bleu), des polygones (rayon effectif d'un cercle équivalent de même surface) de rapport longueur sur largeur ( $l/w$ ) égal à environ 2 (en rouge) et égal à environ 3 à 4 (en noir).

Dans ce cas, nous observons que les évolutions de vitesse de phase et d'atténuation sont plus « lisses » (Figure 6) : la variation d'amplitude de la vitesse à basse fréquence et les « bosses » de l'atténuation sont moins marquées et disparaissent progressivement. Pour une fréquence donnée, les deux paramètres varient quasiment linéairement avec la fraction surfacique. En ce qui concerne la vitesse de phase, elle est quasiment constante pour la fraction surfacique 12 % et une tendance croissante apparaît pour des fractions plus importantes. L'atténuation augmente monotonement avec la fréquence.

En comparant avec le modèle WT, nous obtenons à nouveau un bon accord pour la fraction surfacique 12 %. Bien qu'il prédise correctement le niveau global de la vitesse de phase, ce modèle surestime l'atténuation aux fractions de 24 % et 42 %, notamment à haute fréquence.



(a)

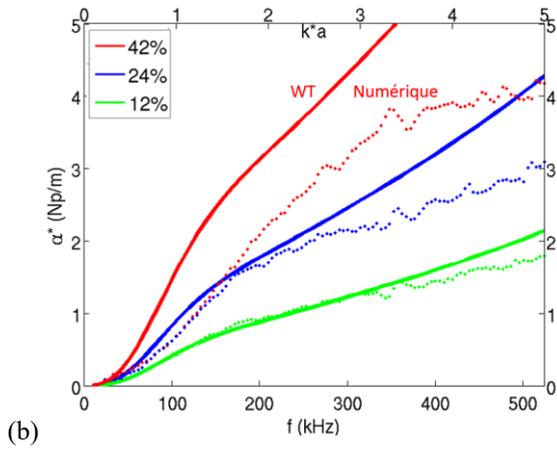


Figure 6: Comparisons de (a) la vitesse de phase et de (b) l'atténuation effectives entre les simulations faites avec le logiciel Specfem2D (en traits pleins) et le modèle de WT (en pointillés) pour le cas avec des cercles des tailles variées aux fractions surfaciques de 12 %, 24 % et 42 %.

## 4.2 Forme des diffuseurs

Dans la littérature, le choix de la forme des diffuseurs en 2D est couramment le cercle car c'est le cas le plus simple. Ce choix est également considéré comme une simplification des directions aléatoires des diffuseurs de forme allongée ou irrégulière. Afin de vérifier si ce choix de forme est pertinent, nous avons étudié l'influence de la forme des diffuseurs sur les deux paramètres effectifs de diffusion en utilisant comme formes des polygones ou des cercles.

Comme illustrés sur la Figure 7 (a) et (b), nous avons généré deux cas avec des polygones : peu allongés ayant un rapport longueur/largeur ( $l/w$ ) convergeant vers 2, ou très allongés avec un rapport  $l/w$  convergeant vers 3 à 4. Ils ont pour concentration surfacique 42 % et 44 %. Les polygones sont aléatoirement positionnés et orientés. De plus, pour chaque cas avec des polygones, nous avons créé une géométrie équivalente avec des cercles : chaque polygone est remplacé par un cercle équivalent de même surface, et puis tous les cercles équivalents sont aléatoirement repositionnés dans la zone hétérogène. Pour les deux cas avec des polygones, leurs distributions des rayons de cercles équivalents sont données sur la Figure 5.

La comparaison des évolutions de vitesse de phase et d'atténuation est illustrée sur la Figure 8. En comparant les deux formes dans chaque cas, nous observons très peu d'influence sur la vitesse de phase. La vitesse augmente légèrement à basse fréquence ( $<250$  kHz) et elle reste quasiment constante à haute fréquence ( $>250$  kHz). La vitesse dans le cas correspondant à la fraction surfacique 44 % (en rouge) est légèrement plus élevée que celle à la fraction surfacique 42 % (en noir). Pour l'atténuation, la « bosse » dans l'évolution de l'atténuation réapparaît mais autour de la fréquence de 200 kHz. Un petit écart entre les deux formes est observé lorsque les polygones se rapprochent de la forme des cercles ( $l/w$  proche de 2, en noir), alors qu'il devient plus important lorsque les polygones sont très allongés ( $l/w$  proche de 3 à 4, en rouge).

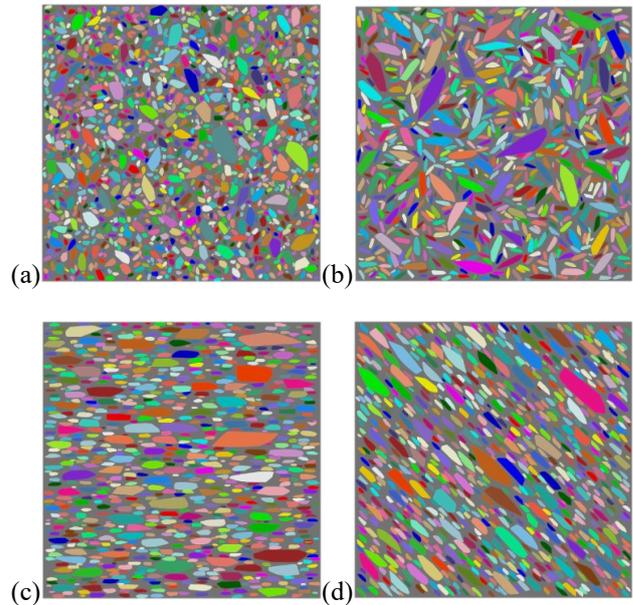


Figure 7: Géométries de dimension 400 mm  $\times$  400 mm des cas des polygones : (a)  $l/w \sim 2$  et (b) (c) (d)  $l/w$  voisin de 3 à 4 avec une direction privilégiée en (c) et (d).

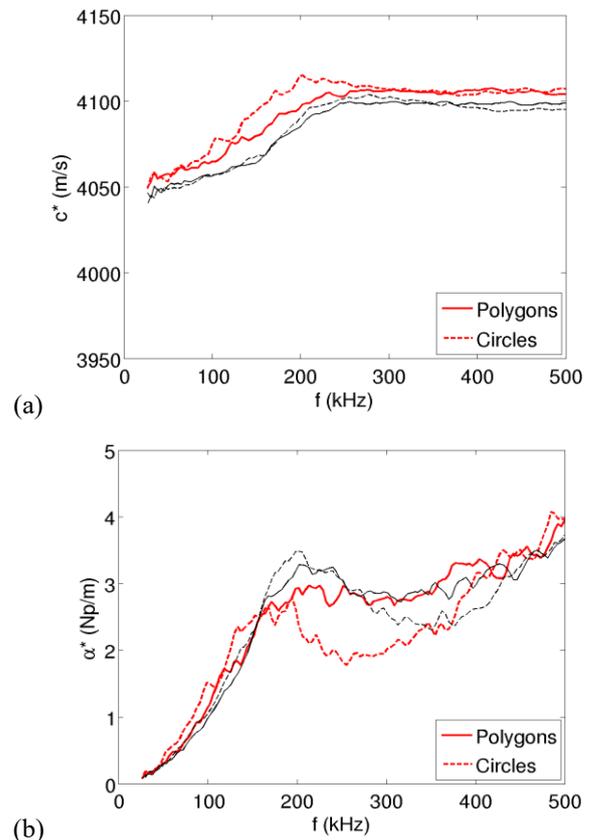


Figure 8: Comparaison de (a) la vitesse de phase et de (b) l'atténuation effectives entre les simulations avec des diffuseurs ayant la forme de polygones (traits pleins) et de cercles (pointillés) : polygones avec un rapport longueur/largeur valant environ 2 à la fraction surfacique 42 % (en noir) et valant environ 3 à 4 à la fraction surfacique 44 % (en rouge).

Ensuite, afin d'étudier l'influence des directions des polygones, nous avons également créé trois géométries avec des polygones de fraction surfacique 44 % en

appliquant une direction privilégiée : la longueur des polygones est parallèle ( $0^\circ$ , Figure 7(c)),  $45^\circ$  (Figure 7(d)), ou perpendiculaire ( $90^\circ$ ) à la direction de la propagation des ondes.

Les simulations de ces trois cas sont comparées sur la Figure 9 avec celle du cas avec des polygones de directions aléatoires (Figure 7(b)). La vitesse de phase et l'atténuation sont quasiment superposées dans les cas des polygones aléatoires et avec la direction privilégiée  $45^\circ$  : la vitesse augmente à basse fréquence ( $\leq 200$  kHz) et reste quasiment constante à haute fréquence ( $\geq 200$  kHz) ; l'atténuation augmente fortement à basse fréquence ( $\leq 200$  kHz) et puis légèrement à haute fréquence ( $\geq 200$  kHz). Lorsque la direction privilégiée est  $0^\circ$ , nous observons les mêmes tendances de l'évolution des deux paramètres en fonction de la fréquence, alors que la vitesse est généralement plus élevée et l'atténuation moins importante. Cela peut s'expliquer par une diminution du nombre des interfaces matrice/diffuseurs à traverser sur la même distance de propagation dans ce cas-là. Au contraire, lorsque les polygones sont orientés à  $90^\circ$ , le nombre d'interfaces est plus grand et nous observons que la vitesse de phase effective est plus petite et l'atténuation effective plus importante.

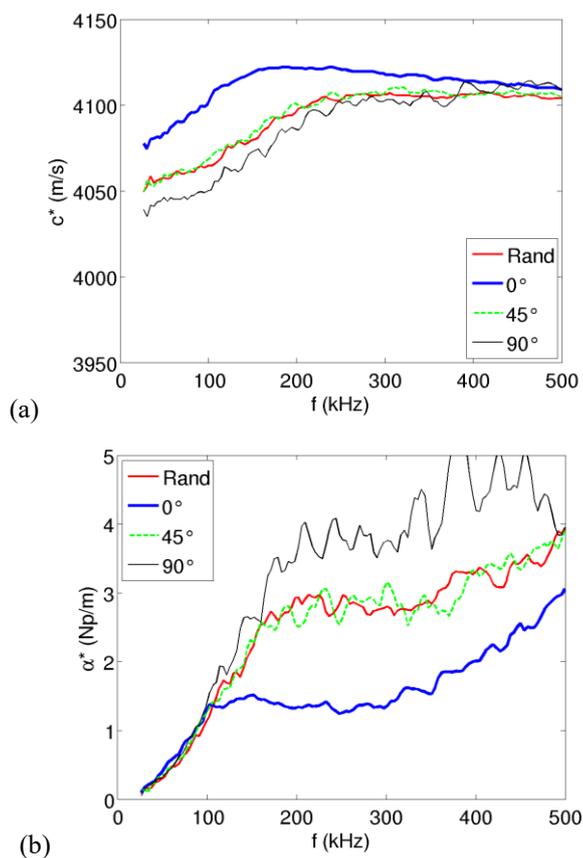


Figure 9: Comparaisons de (a) la vitesse de phase et de (b) l'atténuation effectives entre les simulations pour des polygones de  $l/w$  valant environ 3 à 4 et à la fraction surfacique 44 % : directions des polygones aléatoire (en rouge) et définies à  $0^\circ$  (en bleu), à  $45^\circ$  (en vert) et à  $90^\circ$  (en noir).

## 5 Conclusions et perspectives

Nous avons construit un modèle élastique adapté au béton et ce modèle validé nous permet une étude paramétrique :

- La vitesse de phase et l'atténuation effectives augmentent avec la concentration des diffuseurs ;
- La forme des diffuseurs a peu d'impact sur la vitesse et l'atténuation effectives si les diffuseurs sont aléatoirement positionnés et orientés ;
- Lors de la présence d'une direction privilégiée des diffuseurs, il est nécessaire de prendre en compte cette direction dans la propagation des ondes ;
- La vitesse de phase et l'atténuation sont sensibles à la distribution de leur taille.

Suite à cette étude, la viscoélasticité (modèle à facteur de qualité constant) a été introduite dans ce modèle pour la prise en compte de la dispersion dans le mortier, afin de donner un outil numérique. Cet outil complet permet de simuler des mesures dans un contexte industriel, par exemple, une mesure en réflexion sur VerCoRs pour détecter la position des gaines autour des câbles de précontraintes (Figure 10).

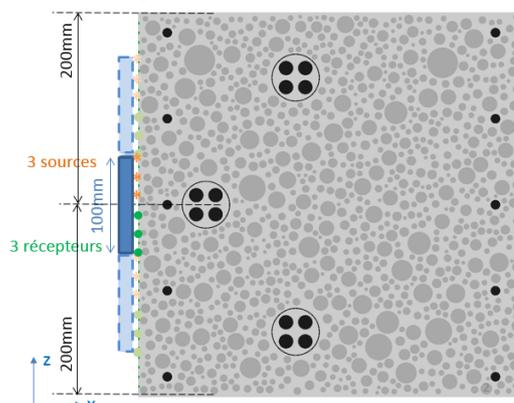


Figure 10: Exemple de configuration des géométries étudiées pour la mesure en réflexion sur VerCoRs.

## Remerciements

Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du CINES au travers de l'allocation de ressources 2018- A0031010316 attribuée par GENCI, ainsi que ceux d'EDF au travers du cluster ATHOS.

## Références

- [1] V. Garnier, Evaluation Non Destructive du béton contribution des méthodes acoustiques linéaire et non linéaire : Apport de la fusion de donnée. HDR, Université de la Méditerranée (2010).
- [2] D. Komatitsch, J. P. Vilotte, R. Vai, J. M. Castillo-Covarrubias, F. J. Sanchez-Sesma. *The spectral-element method for elastic wave equations - Application to 2-D and 3-D seismic problems*. Int. J. Numer. Meth. Engng. **45**, 1139-1164 (1999).
- [3] F. Schubert, B. Koehler, *Numerical time-domain simulation of diffusive ultrasound in concrete*, Ultrasonics, **42**, 781-786 (2004).
- [4] VeRCoRs, Une maquette de 30 mètres de haut pour la recherche, Actes disponibles sur : <https://www.edf.fr/edf/accueil-magazine/une-maquette-de-30-metres-de-haut-pour-la-recherche>.
- [5] T. A. Mokhtar, R. B. Herrmann, D. R. Russell. *Seismic velocity and Q model for the shallow structure of the Arabian shield from short-period Rayleigh waves*. Geophysics, **53**(11), 1379-1387 (1988).
- [6] T. YU, J.F. Chaix, D. Komatitsch, V. Garnier, L. Audibert, J.M. Henault. *2D numerical modeling of the ultrasonic wave propagation in concrete : a parameterization study in the multiple scattering medium*. 43th Quantitative Nondestructive Evaluation, Atlanta, 17-22 juin 2016. Actes disponibles sur : <https://lib.dr.iastate.edu/qnde/2016/abstracts/204/>
- [7] P.C. Waterman, R. Truell. *Multiple scattering of waves*, J. Math. Phys, **2** (4), 512-537 (1961).
- [8] J.F. Chaix, V. Garnier, G. Corneloup. *Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media: Theoretical analysis and experimental validation*. Ultrasonics, **44**: 200-210 (2006).
- [9] M. Chekroun, L. Le 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).