

De la modélisation numérique 2D à l'imagerie pour la caractérisation non destructive des bétons

Jean-François Chaix¹, Ting Yu², Vincent Garnier¹, Jean Mailhé¹, Jean-Marie Hénault²

¹ Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique UMR7031, Aix-Marseille Université, CNRS, Ecole Centrale - 4 Impasse Nikola Tesla - 13453 Marseille -, France

² Electricité de France R&D – PRISM - 78401 Chatou - France

RESUME

Les techniques ultrasonores sont utiles à la surveillance des structures de génie civil composées de béton armé et/ou précontraint. Le béton est très hétérogène, il est composé d'une matrice cimentaire poreuse, d'agrégats et de sable. Des armatures et/ou câbles de précontraintes sont insérés dans le béton pour assurer la tenue mécanique de l'ouvrage. Afin de modéliser le contrôle non destructif par ultrasons de ces structures un modèle Specfem2D est utilisé. Pour prendre en compte le matériau, une matrice de mortier incluant des hétérogénéités de type granulat et/ou porosité est intégré dans un modèle numérique 2D permettant de simulation la propagation des ondes ultrasonores. Le milieu est considéré élastique ou viscoélastique et hétérogène et inclut les phénomènes de diffusion multiple. Les granulats sont pris en compte par des cercles de différents rayons ou des polygones dont les formes sont proches des agrégats réels. Des armatures métalliques et/ou des macrodéfauts sont introduits. A partir de ce modèle numérique sont extraits les signaux ultrasonores qui peuvent être analysés pour construire des imageries du béton. Ces images permettent d'améliorer l'évaluation et le diagnostic de la structure.

Mots-clefs Ultrasons, Modélisation numérique, Bétons, Contrôles non Destructifs

I. INTRODUCTION

Les techniques ultrasonores sont de plus en plus utilisées pour la surveillance des structures de génie civil, généralement composées de béton armé. Le béton est un matériau qui répond aux chargements en compression et protège les barres d'acier de renfort de l'environnement corrosif. Les barres d'acier sont intégrées dans le béton et ne sont pas directement accessibles. Ainsi, le béton est systématiquement le premier matériau à explorer afin d'évaluer et d'améliorer la durabilité des structures en béton. Le béton est un milieu très hétérogène composé d'agrégats de différentes tailles et d'une matrice de mortier (ciment +sable) plus ou moins poreuse selon les formulations et conditions de mise en œuvre. La caractérisation de ce type de milieu est complexe à analyser et l'apport de modélisation est nécessaire pour affiner la compréhension et analyser les signaux et images correspondantes à ces structures [T. Yu]. Cet article présente une solution de modélisation de bétons et les résultats obtenus pour la modélisation et l'imagerie d'une structure réelle.

Afin de prendre en compte ce matériau complexe, une matrice de mortier viscoélastique incluant des hétérogénéités de type granulat et/ou porosité est intégré dans Specfem2D, un modèle

numérique 2D (utilisant des éléments spectraux : méthode par éléments finis utilisant des fonctions polynômes pour la description des champs -ici d'ordre 4) permettant de simulation la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux viscoélastiques hétérogènes incluant les phénomènes de diffusion multiple. Pour cela, un modèle géométrique de béton avec des cercles de différents rayons et un autre avec des polygones, dont les formes sont proches des agrégats réels en béton est intégré dans un premier temps intégré à la simulation. Dans un second temps sont introduites les armatures métalliques (barres de renfort ou gaines de précontrainte) et/ou des éléments typiques de macrodéfauts (nids de cailloux ou macroporosités) qui peuvent être rencontrés lors de la fabrication de ces structures.

A partir de ce modèle numérique sont extraits les signaux ultrasonores qui peuvent être analysés pour construire des imageries du béton et peuvent participer à l'évaluation et au diagnostic de la structure. Le modèle numérique est validé par des essais de laboratoire sur des milieux simples, il est ensuite appliqué puis sur la structure VERCORS d'Electricité de France [E Oukhemanou].

II. MODELISATION DE LA CARACTERISATION ULTRASONORE DE BETONS

A. Modèle numérique et validation de la propagation ultrasonores en milieux hétérogènes

Le logiciel libre Specfem2D [Specfem2D] est utilisé pour simuler la propagation des ondes élastiques dans les milieux hétérogènes. Les temps de calcul des simulations présentés sont de l'ordre de 3 à 8 heures sur des supercalculateurs (Athos et Genci). Ce modèle a été validé expérimentalement pour l'utilisation dans des milieux représentatifs des bétons [T. Yu & al], il permet notamment une bonne évaluation des paramètres de propagation linéaire tels que la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores.

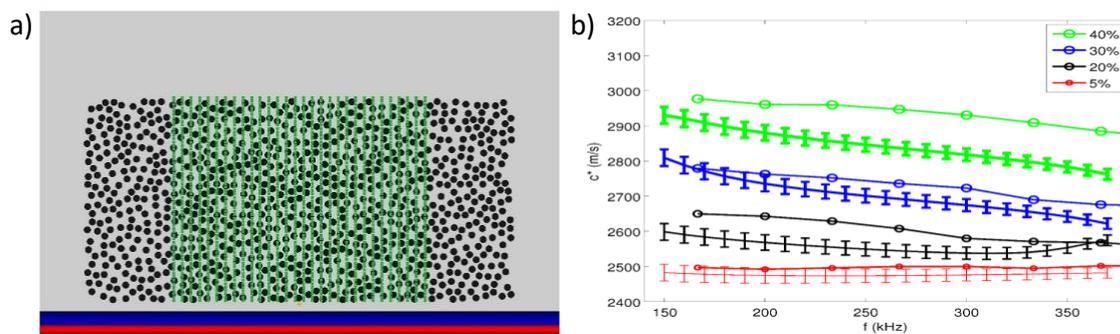


FIGURE 1. a) Propagation dans un milieu hétérogène - b) Comparaisons simulation(-o)/expérience (-I) : évolution des vitesses ultrasonores

La figure 1 montre la modélisation géométrique et la propagation dans un milieu hétérogène 2D (matrice homogène + diffuseur circulaire) et sa validation expérimentale (valeur des vitesses ultrasonores en fonction de la fréquence pour différentes concentrations de diffuseurs) dans des milieux 2D composés d'une matrice de résine dans laquelle sont incluses des tiges cylindriques d'aluminium. L'accord est de bonne qualité (écart inférieur à 5% sur la plage de mesure) pour l'ensemble de concentrations testées.

B. Modélisation numérique et imagerie de structure du génie Civil

La simulation présentée a été faite dans le cadre de projets incluant des essais sur une maquette d'enceinte de bâtiment réacteur à double paroi à échelle 1/3 appelé VERCORS (figure 2) réalisé par Electricité de France (EDF). C'est la paroi interne qui est soumise aux plus fortes contraintes qui est modélisée dans cette étude. Les plans de ferrailage sont illustrés en figure 2b.

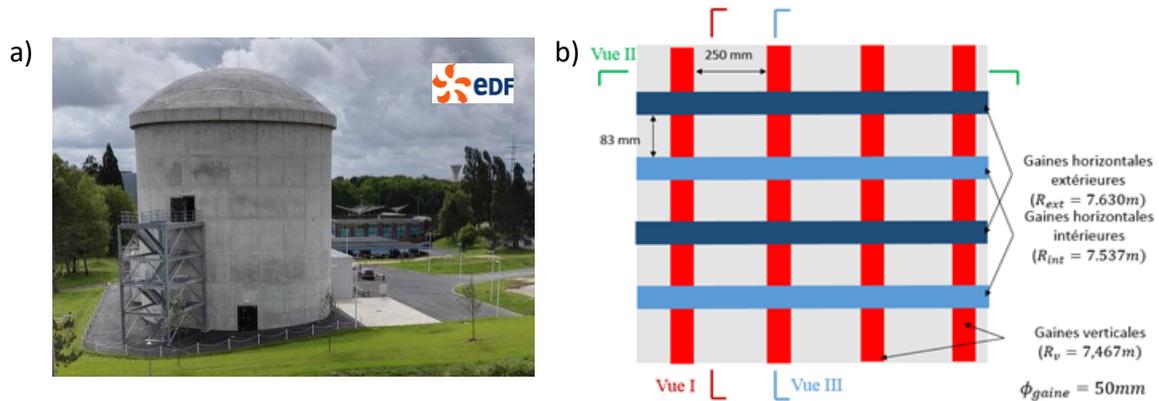


FIGURE 2. a) Structure VERCORS en vue extérieur - b) Exemple de plan de ferrailage de l'ouvrage

Les milieux modélisés en 2D correspondent au plan de coupe de la structure noté sur la figure 2b par l'indication « Vue II » et un milieu de référence sans armature. Dans le plan « Vue II » sont présents, les bétons, des armatures métalliques ainsi que des câbles de précontrainte à différentes profondeurs (figure 3). Les propriétés de matériaux présents dans VERCORS sont prises en compte à partir des valeurs du tableau 1.

TABLEAU 1. Propriétés de matériaux utilisés dans les simulations

| Matériaux | Masse volumique ρ (kg/m^3) | Vitesse longitudinale c_l (m/s) | Vitesse transversale c_t (m/s) |
|-----------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Granulats | 2610 | 4300 | 2475 |
| Mortier | 2050 | 3950 | 2250 |
| Aciers | 7850 | 5700 | 3050 |

La configuration de contrôle modélisée correspond à une tranche de la paroi interne de la structure (400x400mm). Sur la figure 3, partie gauche, nous pouvons observer 2 modélisations différentes, une première de référence ne contenant que du béton (ciment et granulats) et une autre prenant en compte les différents ferrailages. Dans tous les cas, la surface accessible au contrôle est celle de gauche, la surface de droite étant la surface interne du réacteur. Les limites hautes et basses sont modélisées avec des conditions absorbantes pour prendre en compte les massifs de bétons présents de part et d'autre. Le transducteur ultrasonore mis en oeuvre est un multiélément à contacts ponctuels secs posé sur la surface de gauche. Il comporte dans ces vues 6 éléments (3 émetteurs et 3 récepteurs) d'une longueur totale de 100mm (20mm entre chaque élément). Ce sont des ondes transversales polarisées perpendiculairement au plan de simulation, soit parallèlement aux armatures de la figure 3 qui sont envoyées à une fréquence centrale de 50kHz. Ces paramètres permettent de modéliser un capteur ultrasonore disponible dans le commerce. Pour les imageries SAFT présentées (Synthetic Aperture Focusing Technique, [A.W. Elbern]), le capteur est déplacé verticalement le long de sa surface d'appui par pas successifs de 20 mm.

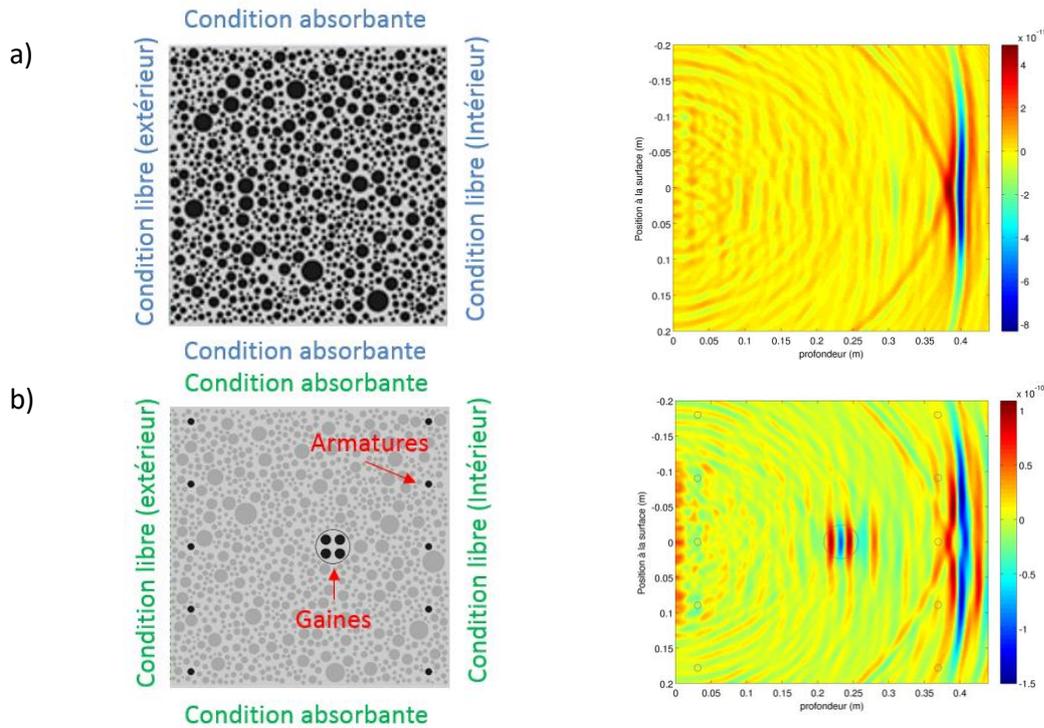


FIGURE 3. a) Simulation d'un béton de référence – b) Simulation de la structure VERCORS

Sur la figure 3, nous observons que l'écho de fond de structure est obtenu pour les deux simulations. Les images montrent les variations de contraste liées au caractère hétérogène du béton pris en compte. Nous observons également que la gaine de précontrainte est clairement imagée alors que les ferrillages de petites dimensions en surface et en fond de pièce ne le sont pas. En fond de pièce, les perturbations de l'écho de fond peuvent être liées à ces ferrillages.

III. CONCLUSION

Une modélisation de structure en béton armé performante a été présentée. Cet outil permet de prévoir et analyser les contrôles non destructifs associés à des structures complexes.

REFERENCES

A.W. Elbern, L. Guimarães. Synthetic Aperture Focusing Technique for Image Restoration, *International Symposium on NDT Contribution to the Infrastructure Safety Systems*, 1999 nov 22-26, Torres, published by UFSM, Santa Maria, RS, Brazil.

E. Oukhemanou, S. Desforges, E. Buchoud, S. Michel-Ponnelle, A. Courtois. VerCoRs Mock-Up: Comprehensive Monitoring System for Reduced Scale Containment Model, *TINCE-2016*, Paris (France), September 5th – 9th, 2016

Specfem2d : <https://geodynamics.org/cig/software/specfem2d/>

T. Yu. Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton pour l'amélioration du diagnostic des structures de génie civil, *Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille ED353*, 31 mai 2018, 157 pages.

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 (2019) 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.018>