

Utilisation de fibres optiques à réseaux de Bragg pour la surveillance d'une structure cimentaire : modélisation ultrasonore à échelle réduite

Nicolas Derrien¹, Maximilien Lehujeur¹, Béatrice Yven², Guillaume Laffont³, Nicolas Roussel³, Thomas Blanchet³, Olivier Durand¹, Gautier Gugole¹, Odile Abraham¹

¹ Université Gustave Eiffel, France

² ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), France

³ Université Paris-Saclay, CEA LIST, F-91120, Palaiseau, France

RESUME Les fibres optiques permettent de mesurer différentes grandeurs physiques comme la pression, la température ou les déformations. Leur petit diamètre et leur résistance aux environnements difficiles (température élevée, corrosion, radioactivité, ...), en font un candidat privilégié dans le domaine du contrôle de santé des structures (SHM pour Structure Health Monitoring) depuis plusieurs dizaines d'années. Cependant, ce n'est qu'assez récemment que cet outil est utilisé comme capteur à ultrasons avec l'arrivée des *réseaux de Bragg* qui offrent la possibilité de réaliser des mesures à très haute fréquence (quelques MHz). Dans ce travail, des mesures aux fréquences ultrasonores sont réalisées à l'aide de réseaux de Bragg dans le cadre d'une expérimentation à échelle réduite en laboratoire d'un milieu géophysique pluri-métrique qui sera instrumenté de fibres optiques noyées dans un matériau cimentaire. Différentes études numériques sont proposées afin de comparer et valider les résultats d'expérience.

Mots-clefs Fibres optiques, Réseaux de Bragg, Ultrasons, Modélisation physique à échelle réduite, SHM

Key-words Optical fiber, Bragg gratings, Ultrasound, Reduce scale physical modelling, SHM

I. INTRODUCTION

De par leur petit diamètre et leur résistance aux environnements difficiles (température élevée, corrosion, radioactivité, ...), les fibres optiques sont une technologie prometteuse dans le domaine du SHM et de l'END (Évaluations Non Destructives). Au cours des dernières décennies, elles ont été largement utilisées comme capteurs permettant de mesurer les déformations statiques [Waeytens et al., 2015], ou les variations de température [Siska et al., 2016]. Elles peuvent être noyées dans un matériau [Kinet et al., 2016] avec un effet négligeable sur ses propriétés mécaniques. De plus, plusieurs points de mesure peuvent être placés sur une même fibre ce qui allège le dispositif instrumental. Plus récemment, il a été montré que ces fibres peuvent être employées pour mesurer le champ de déformation dynamique causé par le passage d'une onde mécanique [Bradford et al., 2017]. En géophysique, les fibres optiques DAS (Distributed Acoustic Sensing) sont de plus en plus exploitées pour sonder le sous sol à l'aide d'ondes sismiques [Mateeva et al., 2014]. Cependant, cette technologie implique d'intégrer la déformation subie par la fibre sur une longueur de gauge (typiquement quelques mètres) ce qui interdit l'usage de cette technologie pour des applications ultrasonores. Au contraire, les fibres optiques à réseaux de Bragg (RdB) offrent un élément sensible suffisamment petit (du mm au cm) qui permet de mesurer le champ de déformation dynamique aux fréquences ultrasonores. Cette technologie est par exemple exploitée pour détecter des ondes guidées telles que les ondes de Lamb se propageant dans des plaques [Druet, 2017]. Cependant, ce système de mesure dispose d'une réponse angulaire spécifique qui maximise la mesure de déformation pour les mouvements de particules dirigés selon l'axe de la fibre. De plus, les niveaux

de bruit instrumentaux sont généralement plus élevés que pour des capteurs ultrasonores conventionnels et l'interrogation des fibres requiert un système optoélectronique de pointe.

Dans le cadre du projet ANR-21-CE04-0007 FO-US, l'utilisation de réseaux de Bragg intégrés au béton est envisagée pour caractériser l'impact du creusement des galeries expérimentales du laboratoire de recherche souterrain de Bure sur la roche d'une zone excavée. Plus précisément, l'idée est de développer des outils basés sur les RdBs pour la tomographie différentielle (i.e pour l'imagerie des variations des propriétés mécaniques du milieu au cours du temps) de la zone d'intérêt située à l'intersection entre un tunnel d'accès principal et un micro-tunnel transverse. Un des enjeux principaux sera d'évaluer notre capacité à détecter au cours du temps de petites variations de vitesse des ondes de compression (ondes P) du milieu.

Afin de préparer la mise en œuvre d'un tel système in situ, il est nécessaire de modéliser les processus physiques en jeu grâce à la modélisation numérique et physique en laboratoire. Pour cela, un modèle réduit de la zone d'étude a été réalisé en résine polyuréthane dans laquelle nous avons coulé des fibres optiques équipées de réseaux de Bragg. L'objectif est de modéliser à la fois la géométrie et le matériau dans la zone d'intérêt et d'évaluer notre capacité à l'imager à l'aide de fibres optiques noyées dedans. Dans cette contribution, nous présentons la maquette réalisée et les premiers signaux obtenus dans ce contexte. Nous détaillons ensuite l'approche numérique employée pour modéliser des variations plus ou moins fortes du milieu.

II. OUTILS ET MÉTHODES

Le code de simulation utilisé pour effectuer les études numériques se dénomme SPEC2DY [Capdeville, 2000]. Ce code est développé par Yann Capdeville (Université de Nantes, LPG) et résout l'équation des ondes 2-D par la méthode des éléments spectraux. Le logiciel de maillage utilisé est GMSH [Geuzaine et al., 2009].

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Modélisation physique à échelle réduite

Une campagne de mesures portant sur la mesure de déformations dynamiques par fibres optiques avec réseaux de Bragg enfouies a été effectuée. Ces déformations dynamiques sont causées par la propagation d'ondes mécaniques aux fréquences ultrasonores. Le domaine de propagation des ultrasons est une maquette en résine polyuréthane de dimensions 400 x 400 x 200 mm (Fig. 1a) constituée d'une couche mince d'épaisseur 15 mm, représentant la zone affectée par le creusement de la galerie principale et d'une couche épaisse d'épaisseur 185 mm, représentant le milieu sain non affecté par le creusement (argilite saine, plus rapide). La maquette est forée verticalement en son centre sur 200 mm de hauteur et 24 mm de diamètre (Fig 1b et 1c), représentant le micro-tunnel, dans lequel sont positionnées quatre fibres comportant quatre réseaux de Bragg chacune. Les fibres optiques sont mises en tension par l'intermédiaire de poids légers (pâte à fixe) afin de s'assurer que leur positionnement vertical reste le plus stable possible (Fig 1d). Les réseaux de Bragg de chaque fibre sont respectivement gravés aux longueurs d'onde 1531, 1551, 1571 et 1591 nm. La même résine que la couche mince est coulée dans le forage avec les fibres.

Un exemple de déformation dynamique mesurée par un réseau de Bragg est visible sur la Fig. 2 (courbe rouge). Cette déformation est engendrée par la propagation d'une onde ultrasonore émise depuis la couche mince de la maquette par l'intermédiaire d'une source Acsys P à couplage sec qui émet un signal Ricker de fréquence centrale 100 kHz. Nous avons décidé de fixer le nombre de moyennes par signaux à 64, car cela donnait un RSB (Ratio Signal Bruit) globalement suffisant. Une cinquantaine de signaux sont enregistrés par point de mesure, au cas où certaines traces nécessiteraient un nombre de moyennes plus élevé.

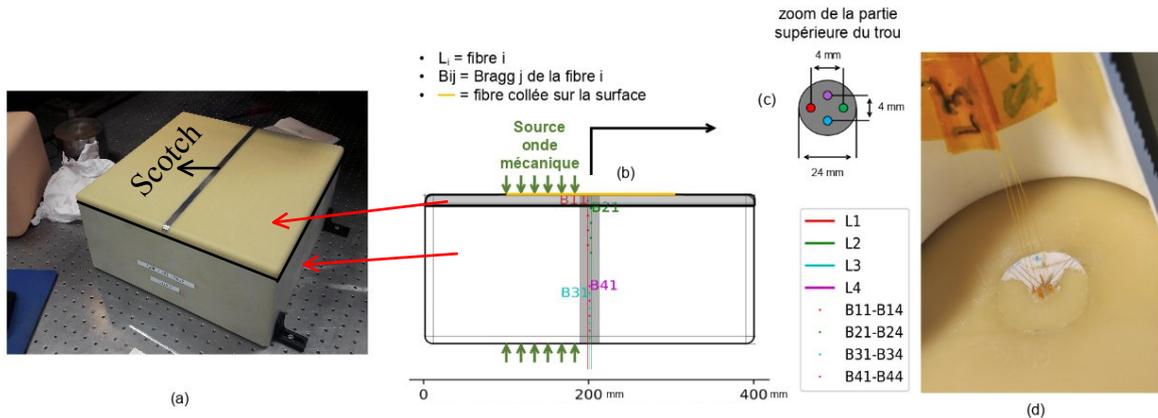


FIGURE 1. (a) Photographie de la maquette utilisée lors de la campagne de mesure. (b) Coupe transversale de la maquette selon la ligne de tir (scotch) montrant la position du forage et les RdBs. (c) Positionnement horizontal des fibres dans le micro-tunnel. (d) Photographie montrant la face supérieure de la maquette et la sortie des 4 fibres noyées.

Cette campagne de mesures démontre la capacité du dispositif expérimental et de la chaîne de traitement associée à détecter et exploiter les signaux acquis par les RdBs (Fig. 2, courbe rouge) compte tenu de la géométrie de la structure, de la disposition des sources et des récepteurs, des contrastes de vitesse attendus ou encore des spécificités des RdBs utilisés comme capteurs de déformation dynamique.

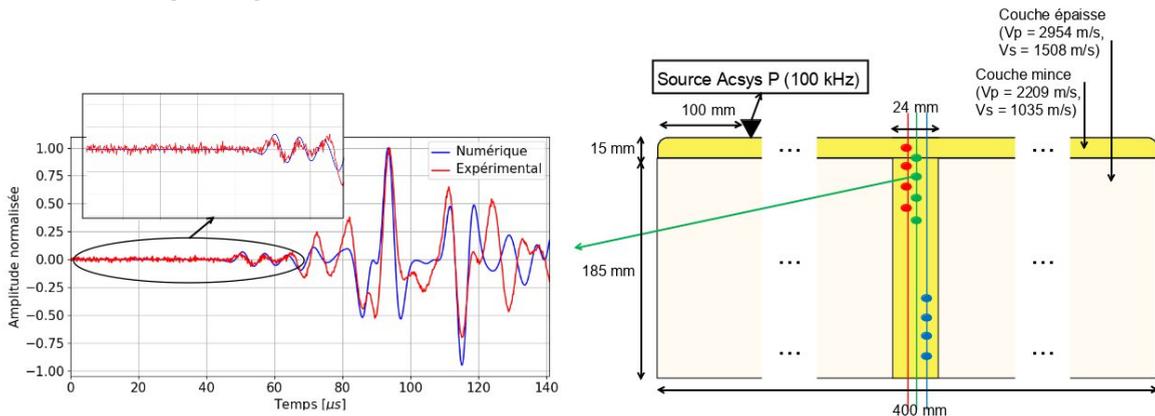


FIGURE 2. Exemple de la déformation mesurée (courbe rouge) et modélisée (courbe bleue) pour un réseau de Bragg situé à 37,5 mm de profondeur et pour une source placée sur la couche mince de la maquette.

B. Modélisation numérique 2-D par la méthode des éléments spectraux pour la conception d'un modèle physique à échelle réduite

Tout d'abord, des données synthétiques sont générées et comparées aux données expérimentales dans la même configuration (Fig. 2 courbe bleue). Les temps de trajet obtenus avec SPEC2DY sont globalement cohérents avec les mesures expérimentales. Cependant, des différences notables au niveau de la phase et de l'amplitude sont observées. Ces différences peuvent être dues à plusieurs sources d'erreur : le signal source émis dans le milieu, la position réel des récepteurs (RdBs), les propriétés mécaniques de la résine coulée dans le trou et l'approximation 2-D/3-D.

De plus, des simulations numériques permettent de mesurer des différences de temps de trajet des ondes P en faisant varier la géométrie et les propriétés mécaniques d'une zone du milieu de propagation (Fig.3 zone orange). Les résultats pour une configuration sont visibles sur la Fig. 3. Une source placée à 10 cm du bord gauche de la maquette émet un signal Ricker de fréquence centrale $f_0 = 100$ kHz depuis la surface supérieure. Le déplacement vertical est calculé en un point de mesure (rectangles rouges), puis converti en déformation selon le même axe en appliquant un schéma aux différences finies centré d'ordre 1 avec un pas d'échantillonnage spatial $dx = 1$ mm.

Ensuite, un paramètre de la zone orange varie (épaisseur ou vitesse des ondes P et des ondes de cisaillement S) d'une simulation à l'autre.

Les contrastes de vitesse retenus sont volontairement forts pour facilement distinguer les différences de temps de trajet. La vitesse des ondes P et S étant les seuls paramètres variables pour cet exemple, des écarts de temps de trajet proportionnel à la valeur de vitesse de l'onde P sont trouvés. De plus, la différence de l'amplitude de l'onde P varie d'un facteur 1 à un facteur 2 en fonction de la variation de vitesse de la zone orange. Finalement, ce code nous permet aussi de mesurer des différences de temps de trajet et d'amplitude des ondes P.

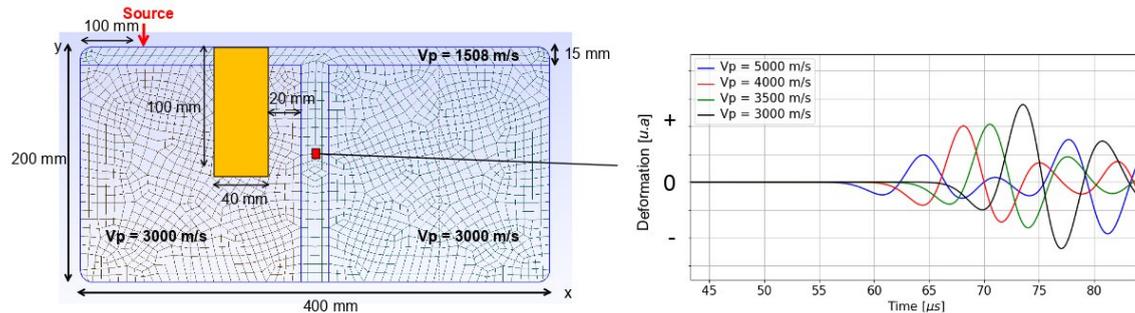


FIGURE 3. Comparaison de la déformation mesurée par un récepteur placé à 90 mm de profondeur dans le trou pour différentes variations locales (zone orange) de vitesse des ondes P.

IV. CONCLUSION

Les signaux expérimentaux obtenus en utilisant des Réseaux de Bragg intégrés dans une maquette en résines polyuréthane, comme récepteur des ondes acoustiques, montrent qu'il est possible d'extraire des temps de propagation des ondes P. Les études numériques montrent la possibilité de valider des temps de trajet expérimentaux et de mesurer à la fois des différences de temps de vol et d'amplitude des ondes P. Nos travaux futurs consisteront à mieux comprendre l'ensemble des signaux acquis grâce à la modélisation numérique de la propagation d'ondes. Ces modèles permettront d'exploiter ces signaux dans une démarche de surveillance dans le but de détecter de faibles variations temporelles des vitesses sismiques.

V. REMERCIEMENT

Mes travaux de recherche sont rendus possible grâce au financement du projet ANR-21-CE04-0007 FO-US.

REFERENCES

- Waeytens, J., Limongelli, M.P., Merliot, E., Siegert, D., Chapeleau, X., Vidal, R., Le Corvec, V., Cottineau, L.M. (2015). Détection d'endommagement dans une poutre en béton précontraint par recalage de modèles et mesures par fibres optiques. RUGC15 : 33ème Rencontres Universitaires de Génie Civil. Bayonne, France. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167579>.
- Siska, P., Latal, J., Bujok, P., Vanderka, A., Klempa, M., Koudelka, P., Vasinek, V., Pospisil, P. (2016). Optical fiber based distributed temperature systems deployment for measurement of boreholes temperature profiles in the rock massif. *Optical and Quantum Electronics* 48.2, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0379-3>
- Kinet, D., Chah, K., Gusarov, A., Faustov, A., Areias, L., Troullinos, I., Marcke, P.V., Craeye, B., Coppens, E., Raymaekers, D., Mégret, P. (2016). Proof of Concept for Temperature and Strain Measurements With Fiber Bragg Gratings Embedded in Supercontainers Designed for Nuclear Waste Storage. 1955-1962. <https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2555337>
- Bradford, P., Wee, J., Peters, K., Hackney, D. (2017). Bi-directional ultrasonic wave coupling to FBGs in continuously bonded optical fiber sensing. *Applied Optics*, Vol. 56, Issue 25, 7262-7268. <https://doi.org/10.1364/AO.56.007262>.

Mateeva,A.,Lopez,J.,Potters,H.,Mestayer,J.,Cox,B.,Kiyashchenko,D.,Wills,P.,Grandi,S.,Hornman,K.,Kuvshinov,B.,Berlang,W.,Yang,Z.,Detomo,R. (2014). Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling. *Geophysical Prospecting* 62.4, 679-692. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12116>.

Druet,T.(2017).Tomographie Passive par Ondes Guidées pour des Applications de Contrôle Santé Intégré. *Thèse de doct.*

Geuzaine,C.,Remacle, JF. (2009). Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International*. <https://doi.org/10.1002/nme.2579>.

Capdeville ,Y. (2000). Méthode couplée éléments spectraux - solution modale pour la propagation d'ondes dans la Terre à l'échelle globale. *Thèse de doct.*