

Transducteurs ultrasonores noyés pour l'évaluation non destructive du béton

Rouba Hariri¹, Vincent Garnier², Jean-François Chaix², Cécile Muret², Florent Boudier², Olivier Durand¹, Odile Abraham¹

¹ Univ Gustave Eiffel, GERS-GeoEND, F-44344 Bouguenais, France

² LMA UMR7031, Aix Marseille University, F-13625 Aix en Provence, France

RESUME L'objectif principal de cette étude est de mettre en place un système de mesure ultrasonore qui permet de suivre en temps réel l'évolution de la vitesse des ondes de compression dans le béton. Des transducteurs ultrasonores sont fabriqués à base d'éléments piézoélectriques et sont noyés dans des blocs de béton de 30x30x30 cm³. La conception et la validation des transducteurs ainsi que les procédures d'installation sont présentées. L'objectif de ce travail est de mesurer des variations de la vitesse de propagation des ondes de compression liées aux changements de la température dans les blocs. Les traitements des signaux ont montré que la vitesse de propagation des ondes de compression est significativement sensible à la résolution temporelle du signal ainsi qu'aux méthodes de détection du temps de vol des ondes (TOF : Time Of Flight). En utilisant des méthodes de traitement du signal avancées, il est possible d'améliorer la résolution temporelle du signal afin de mesurer des faibles variations du TOF en fonction de la température. Ces résultats permettront de développer, dans le cadre du suivi de structures, des modèles de correction des mesures de la vitesse et de définir des lois d'extraction des observables découplées des facteurs indésirables, comme la température.

Mots-clefs Contrôle Non-Destructif, Vitesse des ondes ultrasonores, température, transducteur piézoélectrique

I. INTRODUCTION

Afin d'améliorer la durabilité et la maintenance des ouvrages, la gestion de la construction nécessite des informations sur l'évolution continue des indicateurs de performance du béton. Parmi les principales techniques d'évaluation non destructive du béton, les ondes ultrasonores ont un fort potentiel puisque la vitesse de ces ondes est directement liée aux propriétés mécaniques du béton telles que le module d'élasticité. Pour répondre à ce problème, des capteurs ultrasonores sont noyés dans des blocs cubiques de béton afin de suivre en temps réel les propriétés et les gradients de propriétés du béton au cœur de la structure. Ce type de transducteurs a été utilisé avec succès pour la surveillance continue des propriétés mécaniques du béton (Liu et al., 2017). On s'intéresse dans ce travail à quantifier l'influence de la variation de température sur la vitesse des ondes de compression (P) dans le béton. A cet égard, (Niederleithinger, 2013) et (Larose, 2006) ont rapporté qu'une variation uniforme de la température provoque un changement de la vitesse des ondes dans le béton.

II. Protocole Expérimental et résultats

A. Conception et description du capteur ultrasonore

Les capteurs ultrasonores sont fabriqués à base de matériaux piézoélectriques PZT (Lead Zirconate Titane). Le processus de fabrication d'un capteur comprend les étapes suivantes : soudage des fils

coaxiaux aux électrodes de l'élément PZT, insertion dans un tube en aluminium pour protéger l'élément PZT lors du coulage du béton et assurer son isolation électromagnétique, application d'une couche de résine sur la face arrière de la pastille pour amortir les résonances. Ensuite le capteur est enrobé d'une couche de résine pour assurer sa protection avec son étanchéité et son isolation électrique (Fig.1). La validation des capteurs fabriqués a nécessité plusieurs essais afin d'éviter le développement d'un couplage capacitif dans le béton. Le tube de blindage en aluminium est connecté à la masse. Cela permet à toute charge électrique perturbatrice d'être évacuée vers la masse (Deraemaeker, 2019).

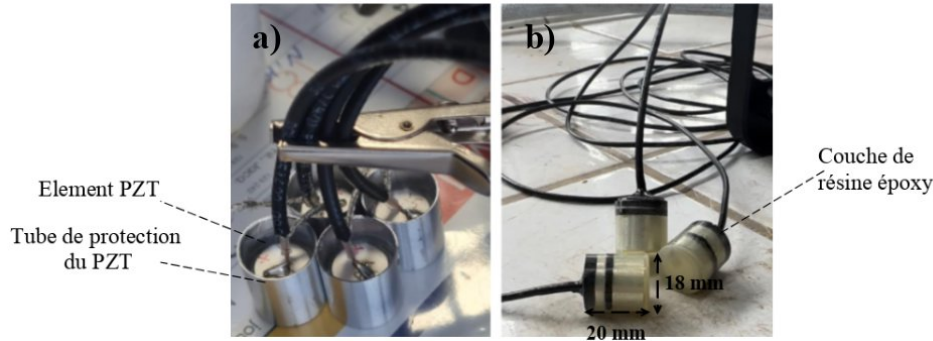


FIGURE 1. Transducteurs piézoélectriques ultrasonores (a) Fils et pastilles soudées et insérés dans les tubes d'aluminium (b) transducteurs finalisés avec une couche protection de résine époxy

Avant qu'ils soient noyés dans le béton, les capteurs sont testés dans l'eau. L'objectif de ce test est de vérifier l'isolation des capteurs et déterminer la qualité de la mesure, sachant que la vitesse des ondes dans l'eau est égale à 1482 m/s à 20°C. On observe sur les signaux enregistrés dans l'eau un RSB de 80dB.

B. Instrumentation des blocs

Des paires de capteurs ultrasonores sont fixées sur des supports, fabriqués par impression 3D et noyées dans des blocs cubiques de dimensions $0.3 \times 0.3 \times 0.3 \text{ m}^3$. Ces supports sont montés avec les capteurs dans les blocs à l'aide de plusieurs tubes en PVC pour assurer la rigidité du support lors du coulage du béton. Dans les mêmes blocs, d'autres capteurs capacitifs et résistifs sont mis en place afin de combiner les résultats obtenus pour remonter à une estimation quantitative de la teneur en eau et de la porosité du béton (Fig.2). Pour le coulage du béton, nous avons utilisé la formulation de référence à base de CEM I qui est employée depuis de nombreuses années par l'ANDRA. Partant de cette formulation, le rapport E/C est modifié pour obtenir trois types de bétons différents (B30, B40 et B60) aux propriétés mécaniques différentes, liées notamment à la porosité accessible à l'eau.

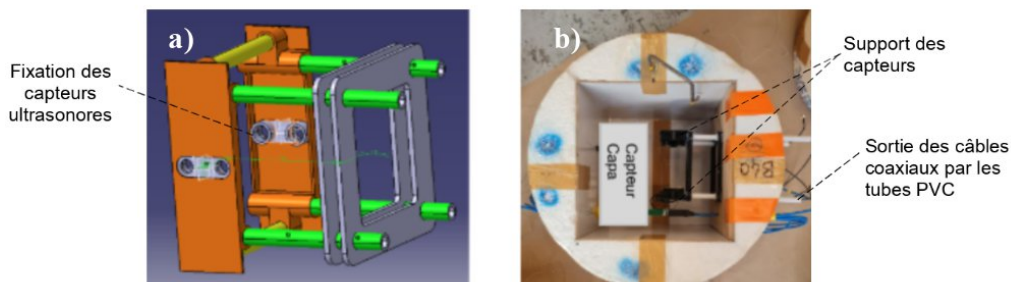


FIGURE 2. (a) Conception du support des capteurs sur le logiciel CatiaV5 et (b) installation du système de mesure US dans le coffrage

C. Résultats expérimentaux et analyse

Les effets de la température sont généralement considérés comme un facteur d'influence indésirable dans les mesures de la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton. La résolution spatiale, la fréquence du signal émis et d'autres paramètres physiques génèrent des incertitudes qui s'ajoutent également à la dispersion de cette mesure. Pour établir des lois de correction qui permettent de mesurer la vitesse des ondes P découplée de l'effet de la température, un bloc de béton est utilisé. Ce bloc a été conservé dans un état humide pendant 60 jours afin d'atteindre une saturation complète. Une première mesure de la vitesse des ondes P (V_p) est effectuée à une température constante de 20°C et une humidité relative de 95% avant le démarrage de test de changement de température. Ensuite, le bloc de béton, enrubanné dans de l'aluminium, est placé dans une étuve où la température augmente progressivement de 10°C à 40°C (taux d'humidité à 95%).

Des premiers résultats ont montré que la mesure des variations de vitesse (V_p) vis à vis de la température, est sensible à la méthode de pointé du TOF des ondes ainsi qu'à la résolution des signaux. Pour améliorer la résolution temporelle du signal et ainsi la qualité de la mesure du TOF nous procédons à un « oversampling » temporel en faisant un « padding » dans le domaine de Fourier. La fonction d'inter-corrélation est calculée entre le signal initial à $T=20^\circ\text{C}$ et les signaux enregistrés pendant la montée en température. Ainsi, on peut déterminer le décalage temporel entre les signaux vis à vis de l'augmentation de la température dans l'étuve et calculer la variation de la vitesse des ondes P tel que $\frac{dV}{V_{ref}} = \frac{dt}{t_{ref}}$ (Fig.3).

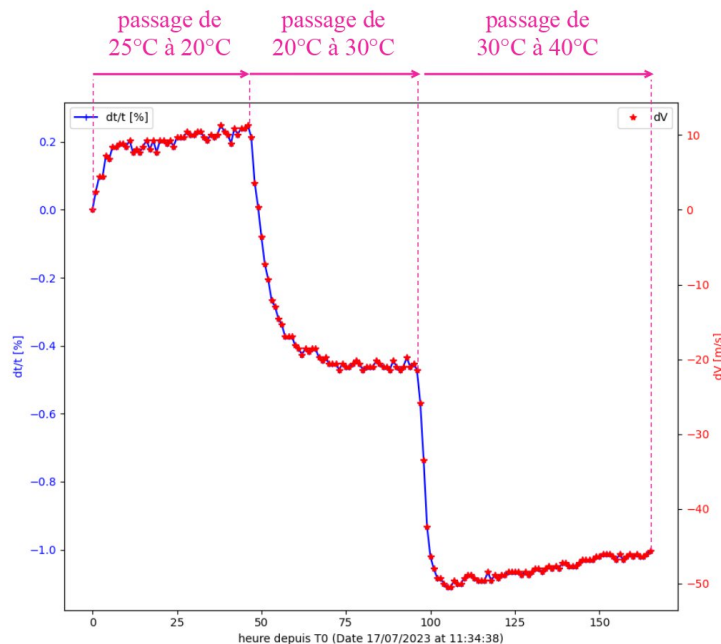


FIGURE 3. Résultat de test du changement de la température sur un bloc de béton instrumenté. En bleu, le décalage temporel entre les signaux enregistrés pendant l'augmentation de la température dans le béton et le signal initial. En rouge, la variation de la vitesse des ondes P de 1,3% pour une augmentation de température de 20°C.

Lorsque la température atteint son maximum à 40°C, le temps d'inter corrélation entre les signaux de 0.8 μs indique une diminution dans la vitesse de propagation des ondes P de 1,3% comme attendu.

III. Conclusion

Dans cette étude, des transducteurs ultrasonores sont conçus et noyés dans une structure en béton lors de la phase de construction. En fonction du traitement des signaux enregistrés à des intervalles réguliers, des informations sur la vitesse des ondes P sont obtenues à différentes températures. L'utilisation des outils numériques avancés en traitement du signal est nécessaire pour améliorer la qualité de la mesure du TOF. Cette étude permet de répondre au besoin d'automatisation des méthodes d'analyse et de traitement de l'information. Une dépendance linéaire de la vitesse des ondes (V_p) dans le béton par rapport à la température a été identifiée. Elle peut être confirmée sur d'autres échantillons puis utilisée, pour définir des modèles de correction de la mesure de V_p . On s'intéressera particulièrement au degré de qualité des mesures effectuées, en quantifiant les incertitudes du calcul et l'effet des facteurs d'influence, comme la température. Les travaux présentés dans cet article font partie du projet ANR-SCaNING dont l'objectif est de développer une approche systémique pour la surveillance de la santé des structures en béton, y compris la validation des technologies de capteurs intégrés et l'extraction d'observables qualifiés, découplés des facteurs d'influence.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le comité de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) d'avoir sélectionné le projet SCaNING pour financement.

REFERENCES

- Liu, T., Zou, D., Du, C., Wang, Y. (2017). Influence of axial loads on the health monitoring of concrete structures using embedded piezoelectric transducers. *Structural Health Monitoring*, 16(2), 202–214. <https://doi.org/10.1177/1475921716670573>
- Zhong, B., Zhu, J. (2022). Applications of stretching technique and time window effects on ultrasonic velocity monitoring in concrete. *Applied Sciences*, 12(14), 7130. <https://doi.org/10.3390/app12147130>
- Kurz, J. H., Grosse, C. U., & Reinhardt, H. W. (2005). Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete. *Ultrasonics*, 43(7), 538–546. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.005>
- Deraemaeker, A., Dumoulin, C. (2019). Embedding ultrasonic transducers in concrete: A lifelong monitoring technology. *Construction and building materials*, 194, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.013>
- Chung, H. W. (1985). Ultrasonic testing of concrete after exposure to high temperatures. *NDT international*, 18(5), 275–278. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(85\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0308-9126(85)90007-0)
- Larose, E., de Rosny, J., Margerin, L., Anache, D., Gouedard, P., Campillo, M., & van Tiggelen, B. (2006). Observation of multiple scattering of kHz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes. *Physical Review E*, 73(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.016609>
- Niederleithinger, E., & Wunderlich, C. (2013). Influence of small temperature variations on the ultrasonic velocity in concrete. *AIP Conference Proceedings*, 1511(1), 390–397. <https://doi.org/10.1063/1.4789074>