

Inspection des conduites en béton à âme-tôle par méthodes ultrasonores

Thilakson RAVEENDRAN¹, Jean-Marie HENAULT¹, Arnaud RECOQUILLAY², Denis VAUTRIN¹, Guy D'URSO¹, Vincent GARNIER³, Jean MAILHE³, Philippe BISARAH⁴, Alexandre BOULE⁴, Jean-François CHAIX³

¹ EDF R&D, PRISME, Chatou, France

² Université Paris-Saclay, CEA, List, Palaiseau, France

³ LMA, Université d'Aix-Marseille, CNRS, Ecole Centrale, UMR7031, Aix-en-Provence, France

⁴EDF-DI, TEGG, Aix-en-Provence, France

RESUME Les méthodes ultrasonores sont mises en œuvre dans cette étude dans le cadre de l'inspection des conduites en béton à âme-tôle (CBAT). Ces conduites, composées d'un assemblage béton/acier/béton, sont présentes dans les centrales nucléaires et se corrodent lorsqu'elles transportent de l'eau de mer. Les méthodes conventionnelles en ondes de volume ne permettent pas d'investiguer la partie en acier compte tenu de la multidiffusion importante dans le béton pour les longueurs d'ondes utiles à la mesure sur les aciers. Des méthodes de compression d'impulsion ont été mises en œuvre et montrent que la détection des zones de percement est possible. L'estimation de l'épaisseur résiduelle est envisageable à partir de mesures en ondes guidées. En effet, un mode sensible à l'épaisseur résiduelle d'acier a été identifiée.

Mots-clefs CBAT, ultrason, ondes de volume, ondes guidées, corrosion

Key-words Concrete/Steel/Concrete pipes, ultrasound, bulk waves, guided waves, corrosion

I. INTRODUCTION

Les conduites en béton à âme-tôle (CBAT) sont présentes dans les centrales nucléaires françaises. Ces conduites ont une structure particulière avec une couche en acier d'une épaisseur millimétrique prise en sandwich entre deux couches de béton d'épaisseur centimétrique. Le béton extrados est armé (figure 1a)).

Les CBAT situées en bord de mer subissent une corrosion de la partie en acier causée par les chlorures présents dans l'eau de mer qu'elles transportent. La corrosion se traduit par une perte de l'épaisseur d'acier allant jusqu'au percement. Les fonctions de la couche en acier qui sont l'étanchéité et la tenue mécanique de la structure peuvent alors être compromises.

Aujourd'hui, le diagnostic de corrosion se fait par des mesures électrochimiques pratiquées depuis l'extérieur de la conduite. Elles permettent d'estimer qualitativement les zones où il y a de la corrosion à l'extrados de l'âme-tôle. Ainsi, il n'existe pas de méthodes permettant de quantifier l'épaisseur résiduelle de cette tôle (avec une incertitude cible de l'ordre 100 μm) ni d'évaluer la taille d'éventuels trous dans celle-ci (avec un diamètre cible de 1 cm), et cela depuis l'extérieur de la tuyauterie. Ainsi, dans le cadre de l'optimisation de

la maintenance des CBAT du parc nucléaire, les ondes ultrasonores de volume et les ondes ultrasonores guidées sont étudiées.



FIGURE 1. (a) Schéma d'une coupe de CBAT, photos (b) d'une CBAT en galerie et (c) de morceaux de l'âme tôle corrodée après découpage du tronçon et piquage du béton.

II. TECHNIQUES EN ONDES DE VOLUME

La technique usuelle dans le cadre du CND par ultrason est la technique Pulse Echo. Pour avoir une information sur l'état de l'âme-tôle, la gamme fréquentielle utilisée doit être de l'ordre du MHz compte tenu de l'épaisseur millimétrique de l'âme-tôle. La difficulté majeure de ce type de mesure dans le béton réside dans le caractère très hétérogène du béton à haute fréquence. La multidiffusion des ondes par le béton accroît drastiquement l'atténuation des ondes (*Philippidis and Aggelis, 2005*).

Sur la figure 2, des mesures de type Pulse Echo avec un capteur de fréquence nominale de 5 MHz ont été réalisées en laboratoire sur des assemblages maîtrisés plats. La première mesure a été réalisée sur un assemblage béton/acier/béton qui représente une structure saine. La seconde mesure a été réalisée sur un assemblage béton/eau/béton qui représente une structure où l'âme tôle est entièrement corrodée. Les produits de corrosion peuvent être modélisés par de l'eau (*Henault et al., 2022*) car le béton interne est saturé en eau in situ et les produits de corrosion sont fortement poreux (*Zhao et al., 2011*). Les échantillons de béton ont été réalisés à partir de granulats de diamètre maximum de 8 mm.

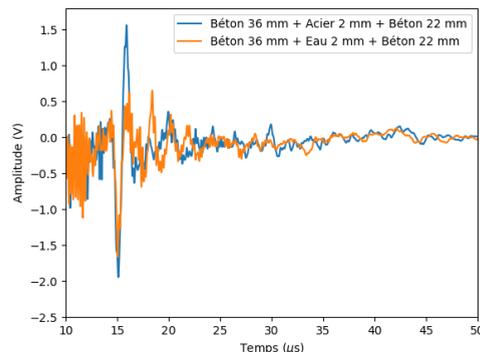


FIGURE 2. Mesures Pulse Echo réalisées en laboratoire avec un capteur de 5 MHz sur des assemblages béton/acier/béton et béton/eau/béton.

Dans ces deux cas, on distingue un écho à environ 15 μs caractéristique d'un aller-retour dans la première couche de béton. Au-delà de cet écho principal, il est difficile d'identifier des échos caractéristiques d'un aller-retour dans l'acier ou dans l'eau. Enfin, l'écho de fond n'est pas visible.

Une analyse fréquentielle de l'écho à environ 15 μs montre que le contenu fréquentiel est limité aux basses fréquences, jusqu'à environ 800 kHz, alors que le contenu fréquentiel du signal d'émission s'étend jusque 7 MHz. Comme attendu, le béton se comporte comme un filtre passe-bas.

Pour optimiser la mesure, nous avons mis en œuvre une technique de compression d'impulsion (*Ciccarone, 2020*). Au lieu d'imposer un pulse de tension au capteur, un chirp linéaire est envoyé. Le signal mesuré par le capteur est enregistré et son autocorrélation est calculée. Un exemple de résultat obtenu sur un assemblage béton/eau/béton est présenté sur la figure 3. Outre l'écho d'aller-retour dans le béton à environ 15 μs , deux échos supplémentaires sont maintenant observables. Ces deux échos sont séparés de 2.3 μs , temps caractéristique d'un aller-retour dans 2 mm d'eau. Cette méthode permet donc de détecter un percement total de l'âme tôle. Le calcul du spectre indique que la technique permet de repousser la fréquence de coupure jusque 1.5 MHz.

Des mesures ont également été réalisées sur un assemblage béton/acier/béton. Les échos d'aller-retour dans l'épaisseur d'acier de 2 mm ne sont pas observables. En effet, une longueur d'onde de 2 mm dans ce matériau correspond à une fréquence de 5 MHz. Il est donc nécessaire d'avoir accès à des fréquences de cet ordre pour avoir la résolution nécessaire.

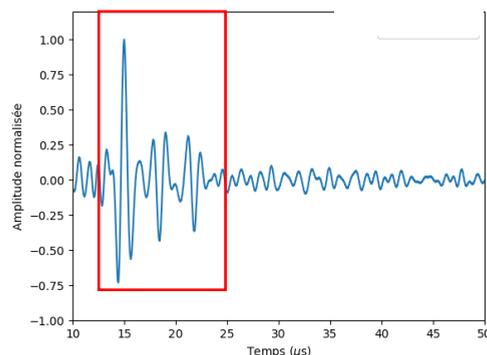


FIGURE 3. Mesure de type Chirp linéaire réalisée sur un assemblage béton(36 mm)/eau(2 mm)/béton(22 mm)

III. TECHNIQUE EN ONDES GUIDEES

Les ondes guidées sont une alternative aux ondes de volume pour inspecter ce type d'assemblage.

Une étude paramétrique en simulation numérique a été réalisée avec le logiciel CIVA® (<https://www.extende.com/fr>) pour identifier un mode sensible à l'épaisseur d'acier. Les simulations ont été réalisées pour des fréquences comprises entre 20 kHz et 200 kHz. Dans

cette gamme fréquentielle, nous considérons des longueurs d'onde qui sont, d'une part, suffisamment petite par rapport au rayon de courbure de la conduite ce qui permet de justifier l'hypothèse d'assemblages de plaques, et d'autre part, supérieures à la taille des granulats pour minimiser la multidiffusion et pour pouvoir considérer le béton comme un matériau homogène.

Les courbes de dispersion ont été calculées pour des assemblages béton extrados/acier/eau/béton intrados. Les épaisseurs de béton sont respectivement de 36 mm et 22 mm pour le béton extrados et pour le béton intrados. L'épaisseur d'acier varie de 2 mm à 0 mm et l'épaisseur d'eau est complémentaire de l'épaisseur d'acier. Encore une fois, nous avons modélisé les produits de corrosion par de l'eau.

Les courbes de dispersion obtenues pour certaines valeurs d'épaisseur d'acier sont présentées sur la figure 4 (l'épaisseur d'acier varie ici de 1.7 mm à 1.99 mm).

Nous observons que le mode Lamb 4 est sensible à l'épaisseur de l'acier pour des fréquences comprises entre 120 kHz et 200 kHz où les courbes ne se superposent plus. D'autres simulations ont montré que la sensibilité à l'épaisseur d'acier est supérieure à la possible variabilité des propriétés du béton. Pour ces raisons, ce mode semble être un bon candidat pour estimer l'épaisseur résiduelle d'acier.

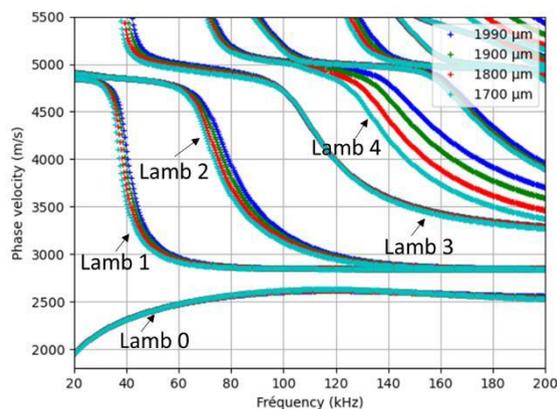


FIGURE 4. Courbes de dispersion calculées avec CIVA pour des assemblages plats béton/acier/eau/béton pour différentes épaisseurs d'acier

Une première étude expérimentale a été réalisée sur une plaque d'aluminium de 50 mm d'épaisseur. Un sabot en plexiglass a été usiné correspondant à un angle d'incidence de 26° pour solliciter préférentiellement les modes ayant une vitesse de phase de l'ordre de 6000 m/s. Un capteur de 1.5 pouce de fréquence nominale 100 kHz est utilisé en émission et est positionné sur le sabot. Le récepteur utilisé est un capteur à contact sec de fréquence nominale 100 kHz. Le capteur en réception est déplacé successivement tous les 1 cm sur 25 cm. Les 26 signaux enregistrés sont utilisés pour calculer le diagramme de dispersion expérimental à l'aide d'une transformée p-w (Park et al., 1999). Le résultat est donné sur la figure 5 qui intègre les courbes de dispersion théoriques calculées avec CIVA®. Les courbes de dispersion expérimentales sont en accord avec les résultats théoriques. Le dispositif expérimental permet de mettre en évidence plusieurs modes d'ordre supérieur. L'étude expérimentale avec ce dispositif de mesure sur des assemblages comprenant des plaques de béton est en cours. Les résultats obtenus démontrent du fort potentiel de cette

méthode avec un bon accord entre modèle numérique et expérience qui a permis l'identification d'un mode ayant une bonne sensibilité à l'épaisseur de l'âme-tôle recherchée.

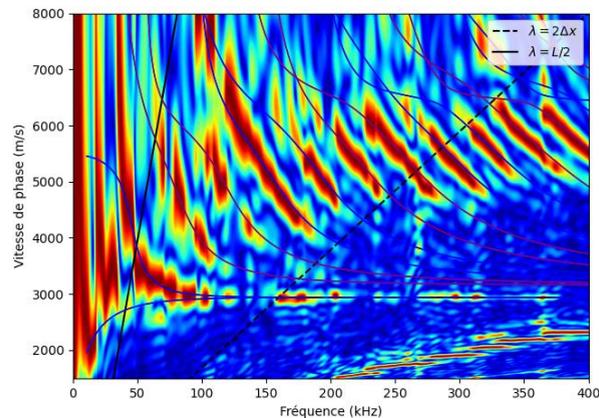


FIGURE 5. Diagramme de dispersion expérimental et courbes de dispersion théoriques pour une plaque en aluminium de 50 mm d'épaisseur.

IV. CONCLUSION

Les méthodes ultrasonores sont prometteuses pour diagnostiquer l'état de l'âme tôle en acier dans le cadre de l'inspection des conduites CBAT.

En ondes de volume, les techniques de compensation fréquentielle, comparées à la technique Pulse Echo traditionnelle, permettent de repousser la limite haute fréquentielle du signal mesuré de 800 kHz à 1.5 MHz. Ceci a permis de mettre en évidence les échos caractéristiques d'un percement total de l'âme tôle.

En ondes guidées, une étude numérique a mis en évidence un mode supérieur sensible à l'épaisseur d'acier, à des fréquences comprise entre 120 kHz 200 kHz. Une chaîne de mesure a été proposée. L'étude expérimentale dans un assemblage béton/acier/béton est en cours.

REFERENCES

- Ciccarone, C., 2020. Utilisation d'ondes de surface à l'aide de scanners acoustiques sans contact pour le contrôle non destructif de structures en béton (PhD Thesis). Centrale Lille Institut.
- Henault, J.-M., Moulouel, R., Raveendran, T., Denos, Y., Boule, A., Bisarah, P., Balayssac, J.-P., Chaix, J.-F., Garnier, V., Mailhé, J., 2022. Development of a portable measuring system using ultrasound guided and surface waves to characterize concrete structures, in: NDT-CE Conference.
- Park, C., Miller, R., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics* 64. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Philippidis, T.P., Aggelis, D.G., 2005. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics* 43, 584–595.
- Zhao, Y., Ren, H., Dai, H., Jin, W., 2011. Composition and expansion coefficient of rust based on X-ray diffraction and thermal analysis. *Corros. Sci.* 53, 1646–1658.