

ÉTUDE NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DE LA PROPAGATION ULTRASONORE GUIDÉE EN VUE DE L'ÉVALUATION NON- DESTRUCTIVE DES CÂBLES DE PRÉCONTRAINTÉ

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF GUIDED ULTRASONIC PROPAGATION FOR NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF EMBEDDED PRESTRESSING STRANDS

Slah YAACOUBI ^{1,2}, Laurent LAGUERRE ¹, Eric DUCASSE ², Marc DESCHAMPS ²

1 : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées –Centre de Nantes -Route de Bouaye

BP 4129, 44341 Bouguenais Cédex Tél. 02 40 84 59 10 – Fax. 02 40 84 59 97

E-mail : Slah.Yaacoubi@lcpc.fr, Laurent.Laquerre@lcpc.fr

2 : Laboratoire de Mécanique Physique, CNRS UMR 5469, Université Bordeaux 1,
351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cédex

Résumé

Une méthodologie d'évaluation non-destructive des torons de précontrainte intérieure par ondes ultrasonores guidées est présentée. A partir de modélisations semi-analytiques basées sur l'acoustique de Fourier pour des configurations simplifiées (barre cylindrique enrobée), nous mettons en évidence le comportement spectral de l'atténuation par fuites dans ce type de structure. Ces résultats théoriques sont ensuite validés par des expérimentations de laboratoire. Les expérimentations de laboratoire sont ensuite étendues au cas du toron de précontrainte. Dans ce cas, des résultats expérimentaux similaires en termes de comportement spectral sont observés pour les torons de précontrainte. Ceci nous permet de sélectionner les fréquences et la largeur de bande de l'impulsion d'excitation pour minimiser l'atténuation par fuites du milieu et donc maximiser la distance d'inspection (les 10 premiers mètres). Ces fréquences sont retenues pour la détection de défauts artificiels par réflectométrie d'ondes ultrasonores guidées.

Abstract

A methodology for the non destructive evaluation of prestressing strands using ultrasonic guided waves is presented herein. From semi-analytical Fourier acoustics modelling, the leaking attenuation spectral behaviour is shown for simplified configurations such as embedded cylindrical bar. These theoretical results are then validated from laboratory based experiments on embedded bars. The experiment procedure is then performed for embedded prestressing strand and similar experimental result trends are observed. These allow us to select the central frequencies and frequency bands of the excitation to minimize the leaky attenuation and consequently maximize the inspection distance (the first ten meters). According to these selected frequencies, detection of artificial defects in embedded prestressing strand is performed using ultrasonic guided wave reflectometry.

INTRODUCTION

La durabilité et la sécurité des câbles de génie civil (éléments structuraux de ponts de longue portée suspendu, haubanés ou en béton précontraint) dépendent en partie de la capacité des techniques d'auscultation à détecter à temps les défauts. Ces derniers étant principalement liés aux ruptures de fils provoqués par les phénomènes de corrosion ou de fatigue mécanique. Toutefois, la détection de ces défauts, par des méthodes non-

destructives, est rendue très délicate par les difficiles conditions d'accès des câbles très souvent liée à : (1) leur propre protection (gaine, coulis de graisse ou de ciment), (2) leur configuration structurale (noyée dans le béton, câble sous collier, zones d'ancrages) et/ou (3) leur géométrie complexe (torons multicouches, câbles multi-torons). Dans ce contexte, les méthodes non-destructives basées sur la propagation d'ondes mécaniques sont potentiellement attrayantes. Qu'elles soient passives, comme la surveillance acoustique ([1], [4]) ou actives comme les méthodes ultrasonores ([2], [3]), elles utilisent le câble comme guide d'onde élastique. Ils peuvent ainsi permettre l'auscultation de parties cachées et inaccessibles à d'autres techniques. Dans le cas des méthodes ultrasonores, la détection est réalisée par réflectométrie. Dans cette présentation, nous montrons dans un premier temps comment la modélisation basée sur l'acoustique physique ([5]) peut nous aider à bâtir une méthodologie d'auscultation de ces éléments structuraux d'acier noyés dans du coulis de ciment. A l'aide de ce modèle, nous montrons comment les conditions de propagations sont altérées par la présence de l'enrobant solide et peuvent modifier significativement les distances d'inspection. Dans un deuxième temps, les résultats du modèle sont confrontés à des expérimentations de laboratoire. Enfin, des mesures sont réalisées sur des torons de précontrainte sains et présentant des défauts artificiels.

ETUDE NUMERIQUE

Le modèle simplifié (Figure 1) considère la propagation des ondes dans un solide élastique cylindrique à base circulaire (barre d'acier) de rayon b et de longueur l ($l \gg b$) enrobé dans une matrice solide (coulis de ciment). La source ultrasonore centrée ou non sur la base du cylindre génère un faisceau borné dans le temps et l'espace. L'acoustique de Fourier nous permet de prédire le champ spatio-temporel 3D en n'importe quel point du guide. Ce champ est décrit au moyen de transformées intégrales faisant appel au formalisme des séries de Debye, de la transformée de Hankel d'ordre n , et des séries de Fourier. Ceci passe par trois grandes étapes :

- décomposition du champ source dans le domaine des fréquences spatiale et temporelle,
- calcul des coefficients de réflexion globaux (fonction de transfert du cylindre enrobé)
- reconstitution du champ propagé dans le domaine spatiotemporel en un plan distant du plan source.

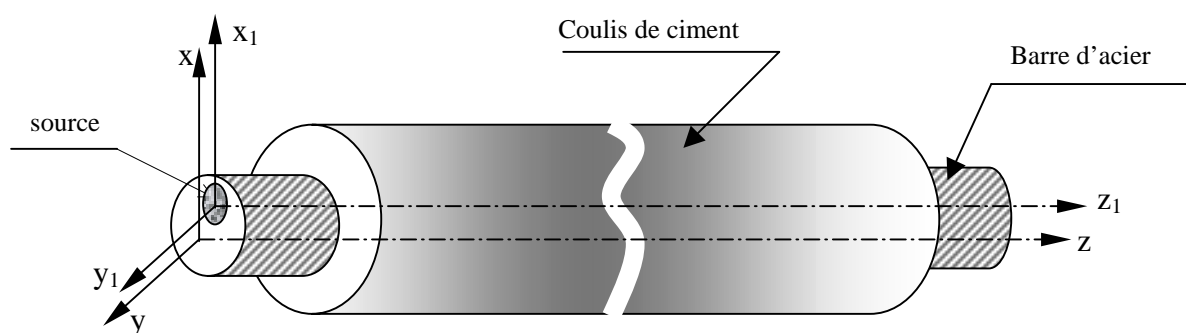


Figure 1 : Géométrie du problème

$$v^{ij}(r, \theta, z, t) =$$

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \varepsilon \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_0^{+\infty} 2\pi p \left[\eta + \underbrace{X_{ij}^n(p, f)}_{(1)} \right] \underbrace{V^n(p)}_{(2)} \underbrace{J_n(2\pi p r) e^{in\theta}}_{(3)} \underbrace{J_n(2\pi p r_0) e^{-in\theta_0}}_{(4)} \underbrace{e^{-i2\pi p z}}_{(5)} dp \right\} E(f) e^{-2i\pi f t} df$$

$$\text{avec } \varepsilon = \begin{cases} 1 & \text{si } n = 0 \\ 2 & \text{si } n \neq 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \eta = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

où ij indiquent respectivement la nature de l'onde incidente (longitudinale (L), transversale horizontale (T_1), transversale verticale (T_2))

et

- (1) représente le coefficient de réflexion global traduisant les réflexions multiples d'un mode n sur l'interface barre/enrobant explicité en fonction des coefficients de réflexion locaux sous forme de série de Debye.
- (2) représente l'amplitude spectrale de chaque onde source
- (3) représente la décomposition sous forme d'ondes cylindriques dans le plan (r, θ)
- (4) représente le décentrage de la source en (r_0, θ_0)
- (5) représente la décomposition en ondes planes suivant la direction z de propagation

Les figures 2 et 3 montrent des simulations, de la composante axiale de la vitesse particulaire pour une onde longitudinale en entrée ($i=L$) et longitudinale en sortie ($j=L$) pour une source axisymétrique placée au centre de la base du cylindre ($r_0 = 0, \theta_0 = 0$) dans le cas d'un cylindre dans le vide et enrobé dans du coulis de ciment.

La figure 2 représente des signaux dans le domaine temporel, la figure 3 est dans le domaine spectral (ce diagramme est obtenu après transformée (f, k) des signaux temporels obtenus à différentes distances de la source). On observe sur la figure 2 que l'onde propagée dans l'acier enrobée dans le coulis de ciment subit une forte atténuation en amplitude. La fin du signal est plus atténuée que son début car sa fin est constituée de contributions multiples réfléchies. Cette atténuation est liée aux fuites de l'onde dans le coulis à l'interface acier/coulis.

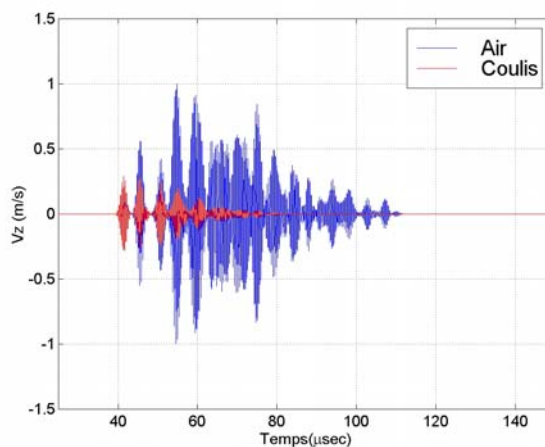


Figure 2 : signaux temporels pour un guide dans l'air et un guide enrobé dans du coulis de ciment

La représentation sous forme des diagrammes de dispersion 3D (fréquence temporelle, fréquence spatiale, amplitude) montre que la présence de l'enrobant se traduit par la disparition de couples (fréquence spatiale, fréquence temporelle) particuliers

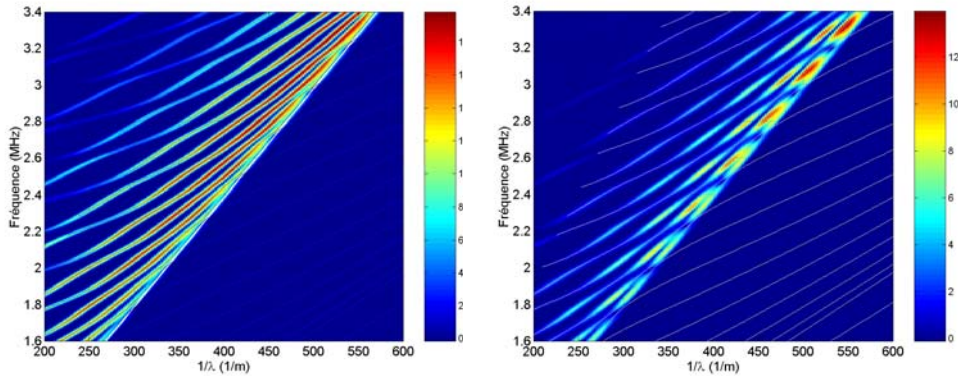


Figure 3 : diagrammes de dispersion pour un guide d'acier (à gauche) dans l'air et (à droite) du coulis de ciment

Le diagramme de dispersion 3D simulé dans le cas de la barre enrobée, pour une distance à la source plus importante que précédemment (figure 4) montre que les atténuations par fuites les plus faibles se produisent pour des ondes ayant des vitesses de phases proches de la vitesse de phase longitudinale dans l'acier et plutôt dans le domaine haute-fréquence. On observe donc que l'atténuation par fuites est minimisée, et donc la distance d'inspection augmentée, si l'on centre l'excitation sur des fréquences précises en imposant un contenu spectral étroit.

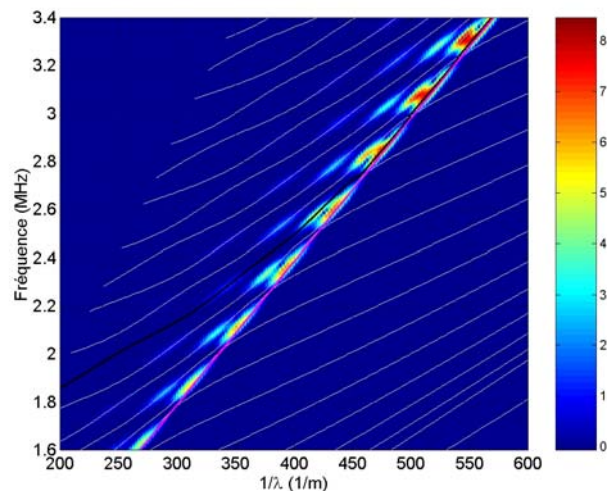


Figure 4 : Diagrammes de dispersion à 1 mètre de la source, pour une barre d'acier cylindrique de 16 mm de diamètre enrobée dans du coulis de ciment

ETUDE EXPERIMENTALE

Barre cylindrique enrobée saine

Des mesures ultrasonores ont été réalisées dans un premier temps en transmission, sur une barre cylindrique enrobée. Le coulis utilisé est du coulis de ciment Superstresscem[®] dont la formulation et la composition sont homologuées pour l'injection des gaines de précontrainte des ouvrages en béton. L'émetteur et le détecteur utilisés sont des transducteurs large-bande. Un générateur de signaux arbitraires couplé à un amplificateur de puissance envoie un signal temporel à l'émetteur. Le signal d'excitation est une impulsion à bande étroite centrée à f_0 . L'onde ultrasonore ainsi créée se propage dans la barre enrobée. Le signal temporel détecté par le récepteur ultrasonore placé à l'autre extrémité de la barre est ensuite amplifié puis visualisé sur ordinateur. Un balayage de la fréquence centrale de l'excitation (à largeur de bande de l'excitation constante) est ensuite réalisé.

On montre ici les résultats de mesure pour une plage de fréquence centrale f_0 entre 1.5 et 4 MHz. Le jeu de mesures représente 251 enregistrements temporels en transmission. La figure 5 (à gauche) montre que l'amplitude des signaux détectés après transmission est fortement dépendante de la fréquence centrale f_0 du signal d'excitation. La figure 5 (à droite) est une superposition de l'ensemble des modules des spectres des 251 signaux détectés après transmission (il est à noter, dans l'encart, la très bonne corrélation entre les valeurs prédites par le modèle et mesurées des fréquences pour lesquelles l'atténuation par fuites est faible).

Ces résultats expérimentaux confirment clairement la nécessité d'optimiser l'excitation en termes de fréquence centrale et de largeur de bande pour minimiser l'atténuation par fuites et augmenter ainsi la distance d'inspection.

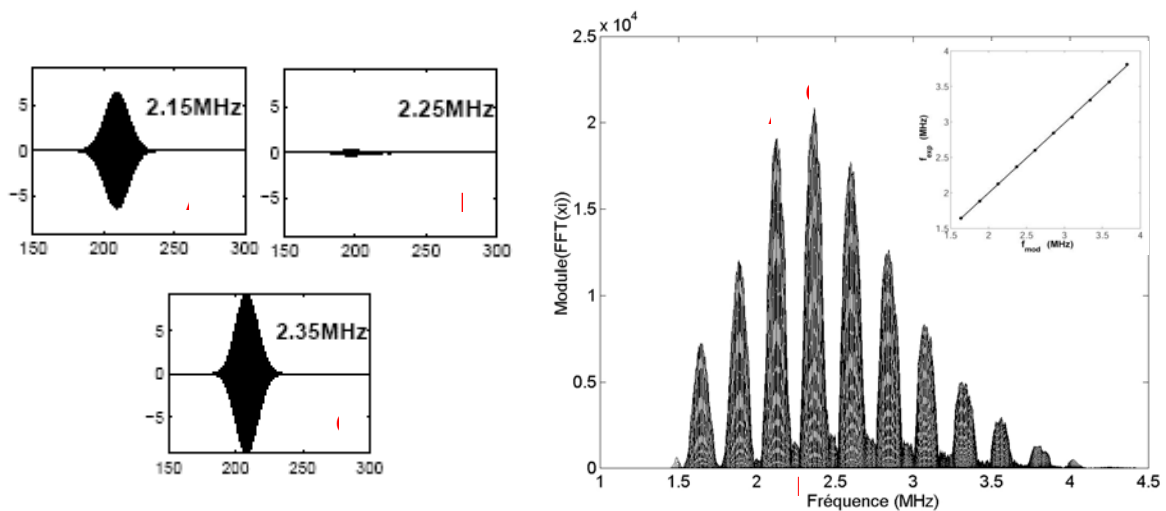


Figure 5 : Expérimentation en transmission sur barre d'acier cylindrique de 16 mm de diamètre enrobée dans un coulis de ciment (à gauche) et exemples de signaux temporels détectés, (à droite) modules des spectres des 251 signaux détectés après balayage de la fréquence centrale f_0

Toron de précontrainte enrobé sain

Les mesures en transmission ont ensuite été étendues au toron de précontrainte enrobé dans du coulis sur une longueur de 2 m. Le toron de précontrainte utilisé ici est de type T15_7, est constitué d'un fil central rectiligne autour duquel s'enroulent 6 fils périphériques hélicoïdaux.

Le protocole de mesure est identique à celui de la barre enrobée. La figure 6 montre l'ensemble des résultats obtenus sous la forme des modules des spectres des signaux temporels pour les différentes fréquences d'excitation et pour les configurations suivantes :

- section entière du toron transducteur 2.25MHz, 0.5pouces
- fil central, transducteur 2.25MHz, 0.25 pouces
- fil central, transducteur 5MHz, 0.25 pouces
- fil périphérique, transducteur 5MHz, 0.25 pouces

Les modules des spectres sont normalisés par les résultats obtenus pour le brin central à 5MHz. On observe les meilleurs résultats en transmission sont obtenus pour le brin central et la fréquence la plus élevée. La transmission dans le fil central est meilleure que la transmission dans le toron entier. Ceci est confirmé par la mauvaise transmission dans le fil périphérique liée fort probablement à sa forme géométrique (fil hélicoïdal). On retrouve également un comportement spectral analogue à celui de la barre, constitué de bandes de transmission et d'atténuation. De plus les fenêtres de transmission pour 2.25MHz sur le toron ou sur le fil central sont approximativement les mêmes confirmant que la propagation pour le toron (non-tendu) s'effectue de manière préférentielle dans le fil central.

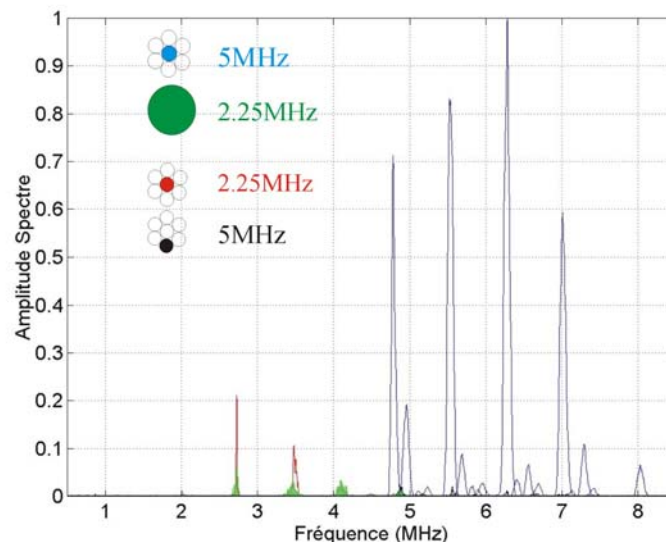


Figure 6 : Expérimentation en transmission sur toron de précontrainte T15_7 enrobé dans coulis de ciment pour des transducteurs émetteur/détecteur sur fil central, sur fil hélicoïdal, ou sur toron.

Toron de précontrainte enrobé avec défauts

Enfin, des expérimentations ont été conduites en réflexion sur un toron enrobé dans du coulis de ciment sur 2.3 m et présentant des défauts artificiels créés avant coulage. Ainsi, le fil central est coupé sur toute sa section à 1.24m du début de l'enrobage (coté transducteur) et un fil hélicoïdal est coupé sur toute sa section à 0.72m du début de l'enrobage (coté transducteur).

Pour la détection des défauts, un capteur est placé soit sur le fil central, soit sur le fil hélicoïdal sur l'extrémité droite de la barre.

Les 2 enregistrements temporels (A-scan) de la figure 7 montrent tout l'intérêt d'une sélection précise de la fréquence centrale de l'excitation.

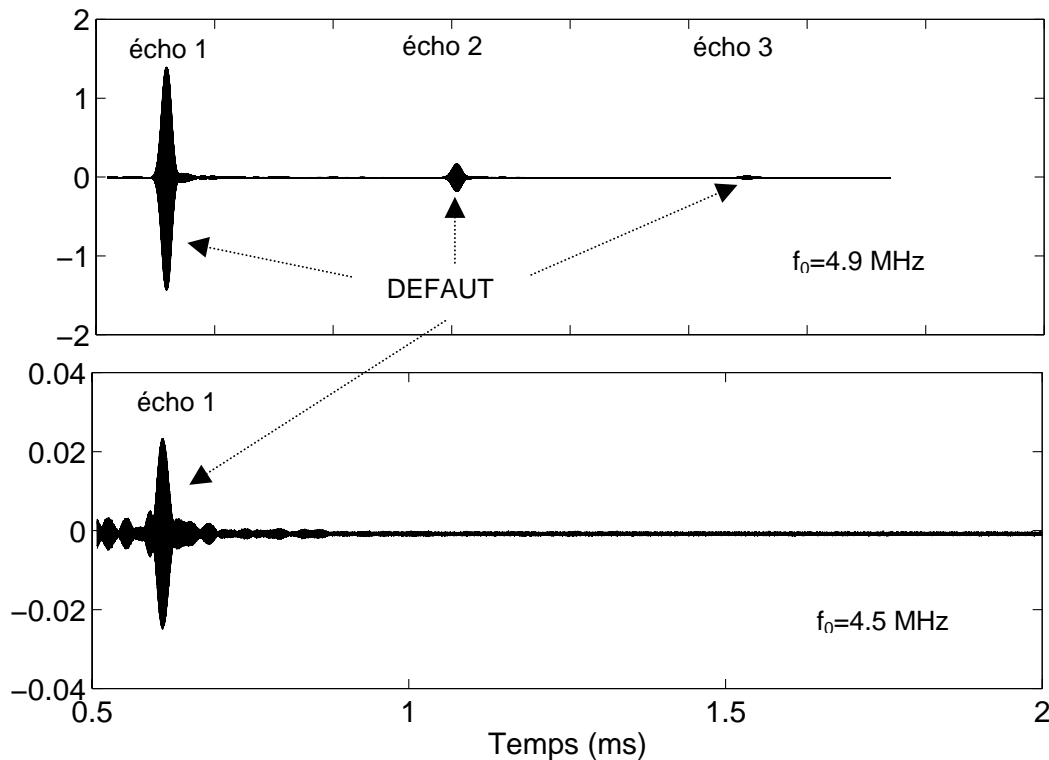


Figure 7 : signaux temporels en réflexion obtenus sur le fil central du toron présentant un défaut (en haut) pour $f_0=4.9\text{MHz}$ (en bas) $f_0=4.5\text{MHz}$.

En effet, dans l'enregistrement temporel du haut, pour une fréquence centrale de 4.9 MHz, on distingue clairement 3 échos, le premier correspondant à la réflexion de l'onde incidente sur le défaut, le deuxième écho ayant effectuée 2 aller-retour entre le défaut et l'extrémité de la barre la plus proche et le troisième écho correspondant à 3 aller-retour. L'onde dans ce dernier cas a parcouru $1.24 \times 2 \times 3$ m soit 7.44 m. Il est à noter que les paramètres relatifs à l'amplitude de l'excitation, au gain en réception, à la fréquence centrale de l'excitation et au nombre de signaux moyennés en détection n'a pas été particulièrement optimisé pour obtenir ce résultat. La distance mentionnée est donc seulement indicative de la portée maximale de la technique utilisée pour détecter ce type de défaut.

Dans l'enregistrement temporel figure 7 bas, pour une fréquence centrale légèrement différente, 4.5MHz au lieu de 4.9MHz, on distingue seulement le premier écho car

l'atténuation par fuites est trop importante à cette fréquence pour distinguer le suivant.

La figure 8 représente le signal temporel en réflexion obtenu pour une excitation (fréquence centrale de 5.1 MHz) sur le fil hélicoïdal du toron enrobé présentant un défaut. Ainsi, même si la position du défaut du fil hélicoïdal est plus proche de l'extrémité que celle du défaut du fil central, on observe seulement deux échos. Ceci est dû à une atténuation pour le fil hélicoïdal plus importante que pour le fil central. La distance parcourue dans ce cas de la détection du multiple est de $0.72 \times 2 \times 2$ soit 2.48m.

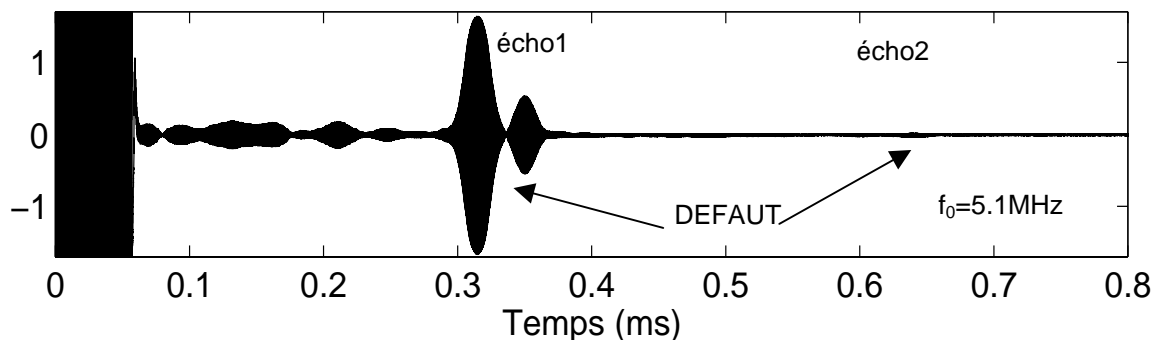


Figure 8 : Signaux temporels en réflexion obtenus sur le fil hélicoïdal du toron présentant un défaut pour $f_0=5.1\text{MHz}$.

Ces premiers résultats de détection de défauts montrent que la méthode proposée est potentiellement efficace pour la détection de défaut dans la zone d'ancrage.

PERSPECTIVES

Les travaux futurs dans le cadre d'ACTENA et au-delà porteront aussi bien sur la réalisation de campagnes expérimentales intégrant le système d'ancrage du toron de précontrainte et son influence sur la détection des défauts ainsi que sur le développement de modélisations sur l'interaction onde-défauts dans des guides simplifiés et la modélisation du comportement de guide plus complexes [6]

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Agence Nationale de la Recherche et EDF Recherche et Développement pour leur support financier dans le programme ACTENA.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Robert J.-L., Bruhat D., Gervais J.-P., Laloux R., Rumiano N., Desmas M. (1985), Surveillance acoustique des câbles. Approche théorique et appareillage, *Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées*, 139, pp 71-78.
- [2] Laguerre L., Aime J.-C, Brissaud M., « Magnetostrictive pulse-echo device for non-destructive evaluation of cylindrical steel materials using longitudinal guided waves », *Ultrasonics*, 2002, 39, pp503-514.
- [3] Laguerre L., Bouhelier M., Grimault A. « Application of ultrasonic guided waves to the evaluation of steel members integrity », *Proceeding of the 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2004, pp 68-75.

- [4] Gaillet L., Tessier C., Bruhat D., Michel R., Auscultation par émission acoustique d'ancrages de câbles multicouches, *Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées*, 250-51, pp 55-63.
- [5] Laguerre L., Grimault A., Deschamps M., « Ultrasonic transient bounded-beam propagation in a solid cylinder waveguide embedded in a solid medium », *J. Acous. Soc. Am.*, 121(4), 2007, pp1924-1934.
- [6] Treyssède F., Numerical investigation of elastic modes of propagation in helical waveguides, *J. Acous. Soc. Am.*, 121(6), 2007, pp 3398-3408.