

# Inspection sans contact de cylindres en fibre par ultrasons

**Nicolas Quaegebeur, Patrice Masson,**

GAUS  
Université de Sherbrooke  
Sherbrooke, QC, J1K 2R1  
Canada  
E-mail : Nicolas.Quaegebeur@USherbrooke.ca  
Patrice.Masson@USherbrooke.ca

**Cedric Ardin, Pierre-Michel D'Anglade**

ABZAC Canada  
Drummondville, QC, J2B 6Y8  
Canada

## Résumé

Les cylindres en fibre sont couramment utilisés comme cœur pour les enroulements industriels de plastique industriel en raison de leur faible coût, leur force de compression élevée, leur fiabilité et la faible sensibilité aux changements environnementaux. Afin de garantir la résistance pendant le processus de fabrication, des essais destructifs tels que l'épluchage manuel ou des essais non-destructifs utilisant des mesures acoustiques d'impédance mécanique sont actuellement effectués sur une base régulière. Afin d'obtenir un contrôle qualité en continu, une inspection automatique et sans contact doit encore être développée. Dans cet article, une méthode et un appareil pour l'inspection sans contact rapide des cylindres en fibre sont présentés. Le principe est fondé sur l'utilisation de transducteurs capacitifs couplés par air (air coupled) à des fréquences inférieures à 50 kHz pour la génération et la mesure des ondes de flexion en configuration pitch-and-catch. L'analyse de sensibilité est effectuée pour différents modes et types de défauts et est validée expérimentalement pour quatre types de défauts généralement observés pendant le processus de fabrication. La validation expérimentale de la détection et de défauts calibrés est démontrée à l'aide de métriques d'amplitude et de temps de vol de paquets d'ondes à différentes fréquences, permettant une qualité automatique contrôlée du processus de fabrication. L'application industrielle en service est ensuite présentée.

## Abstract

Fiber cylinders are commonly used for industrial plastic film wrapping due to their low cost, high compression strength, reliability and low sensitivity to environmental changes. In order to guarantee the compression strength during the manufacturing process, destructive testing such as manual peeling or non-destructive testing using acoustic impedance measurements are currently performed on a regular basis. In order to achieve a continuous quality control, automatic and non-contact inspection still need to be developed. In this paper, a method and apparatus for non-contact and rapid inspection of fiber cylinders is presented. The principle is based on the use of capacitive air-coupled transducers at frequencies below 20 kHz for generation and measurement of propagative flexural waves in a pitch-and-catch configuration. Sensitivity analysis is performed for different modes and damage types and is validated experimentally for four flaw types typically observed during the manufacturing process. Experimental validation of detection and flaw quantification is demonstrated using both amplitude and time-of-flight of wave packets at different frequencies, allowing automatic quality control of the manufacturing process. The industrial application in service is then presented.



Les cylindres en fibre sont couramment utilisés pour l'enroulement de films plastiques industriels en raison de leur faible coût, de leur haute résistance à la compression, de leur fiabilité et de leur faible sensibilité aux changements environnementaux. Cependant, comme les cylindres en fibre sont soumis à de très fortes charges de compression pendant le processus d'enroulement, une légère diminution de la résistance peut entraîner des conséquences dramatiques telles que la perte d'un rouleau de film de matériau entier ou l'endommagement de la machine. Parmi les défauts typiques signalés au cours du processus de fabrication, mentionnons l'absence d'adhésif, la présence d'un joint de gaine lors de la connexion de rouleaux successifs

de gaine, les changements d'épaisseur de gaine, la diminution de la surface stratifiée due à une réduction de la largeur de gaine ou un processus de durcissement incorrect entraînant une humidité excessive à l'intérieur du cylindre. Pour ce faire, une stratégie affinée de contrôle de la qualité des cylindres en fibre est nécessaire. Les essais destructifs sont généralement effectués à intervalles réguliers et comprennent la mesure manuelle de l'épaisseur, du rayon et de la longueur, ou le pelage manuel d'un cylindre afin de détecter les délaminations ou les vides, ou des expériences d'écrasement radial du cœur. La limite de compression est ainsi évaluée et comparée aux valeurs de référence afin de rejeter ou d'accepter l'ensemble du lot de cylindres.

Ce processus prend beaucoup de temps puisqu'un technicien qualifié est nécessaire et est relativement inefficace pour rejeter les cylindres localement endommagés ou mal polymérisés.

Sur la base de ces observations, une procédure d'inspection systématique, rapide et automatique est requise et la sensibilité à ces différents types de défauts doit être démontrée. À cette fin, l'estimation du module de flexion a d'abord été proposée en utilisant la technique de flexion en trois points [1] ou les essais de traction [2]. Des mesures acoustiques ont également été proposées comme alternative intéressante pour estimer le module de flexion d'un cylindre à partir de ses premières fréquences de résonance [1,3]. Cependant, étant donné que ce processus nécessite l'installation du cylindre sur un dispositif de montage standard, il prend également beaucoup de temps, de sorte que des difficultés peuvent surgir lors de la mise en œuvre pratique dans le processus de fabrication.

De nombreuses stratégies de Contrôle Non-Destructif (CND) ont été proposées pour l'inspection des rouleaux et des feuilles de papier. Il s'agit notamment des transducteurs ultrasonores en contact [4], des transducteurs photo-acoustiques pour la caractérisation des ondes de volume [5], des ondes guidées [6], des sondes couplées par air (*air-coupled*) pour la caractérisation de la propagation des ondes guidées [7] ou utilisant des techniques de transmission par l'épaisseur [8]. Dans tous les cas, ces études utilisent des ondes ultrasonores pour la caractérisation mécanique ou la mesure de l'épaisseur des feuilles de papier en configuration statique. L'extension au mouvement de translation a ensuite été présentée à l'aide de techniques d'excitation et de mesure au laser [9]. À notre connaissance, aucune donnée n'est disponible pour les assemblages en fibre et les cylindres multicouches, à l'exception d'une approche modale qui n'est sensible qu'aux endommagements à grande échelle, tels que les fissures, trous ou humidité excessive [10].

Cet article présente une méthode et un appareil pour l'inspection rapide et sans contact des cylindres en fibre [11]. Le principe repose sur l'utilisation de transducteurs industriels couplés par air à des fréquences inférieures à 50 kHz pour la génération et la mesure d'ondes de flexion propagatives en configuration *pitch-and-catch*. La nouveauté réside dans la génération et la mesure sans contact de multiples modes de flexion pour la détection des défauts dans des cylindres en fibre de petite et de grande épaisseur. L'analyse de sensibilité est effectuée pour différents modes et types de défauts et est validée expérimentalement pour quatre types de défauts généralement observés pendant le processus de fabrication. La validation expérimentale de la détection et de la quantification des défauts est démontrée en utilisant à la fois l'amplitude et le temps de vol (*Time-of-Flight* ou temps de vol) des paquets d'ondes à différentes fréquences, permettant un contrôle automatique de la qualité du processus de fabrication.

La section "Contrôle non-destructif de cylindres en fibre par ultrasons" présente la structure à l'étude et l'analyse de sensibilité des ondes de flexion par rapport aux changements géométriques et matériels. La section "Validation expérimentale en laboratoire" présente le montage expérimental, les étapes de traitement du signal et les résultats obtenus sur 50 cylindres différents soumis à divers défauts typiques. Enfin, la section "Implantation sur site industriel" présente l'implantation industrielle ainsi que le montage en service dans différentes usines de Drummondville (QC) et Toronto (ON).

## Contrôle non-destructif de cylindres en fibre par ultrasons

### Structures considérées

La structure considérée est un cylindre en fibre de 81 mm de diamètre extérieur et 3,55 mm d'épaisseur de paroi. Cette structure est composée d'un assemblage de 10 plis de feuilles de papier recyclé de 130 mm de largeur et de 0,35 mm d'épaisseur qui sont collés ensemble à l'aide d'une colle à base d'eau et enveloppés selon une orientation spécifique afin d'augmenter la résistance du noyau à la compression de l'assemblage [12], comme présenté à la figure 1. L'ensemble est ensuite découpé avant durcissement dans une enceinte à environnement contrôlé pendant 24 h.



Fig. 1. Description de la géométrie du cylindre en fibre utilisée dans cette étude (en haut). Présentation du produit final emballé sous cellophane (en bas).

### Propagation d'ondes guidées dans les cylindres de fibre

Comme tous les cylindres doivent être inspectés sans ralentir la chaîne de production, une méthode d'inspection rapide et globale doit être proposée. À cette fin, les méthodes d'échographie locale pour les cylindres et tuyaux, telles que l'échographie de transmission, l'échographie par impulsions ou les réseaux phasés, offrent une inspection locale et ne peuvent être conservées [13]. En raison de leur longueur d'onde relativement faible, de leur sensibilité aux différents types de défauts et de leur capacité à se propager sur de grandes distances, les ondes guidées sont proposées ici, permettant une inspection globale du cylindre sur toute sa surface par l'utilisation de modes de flexion.

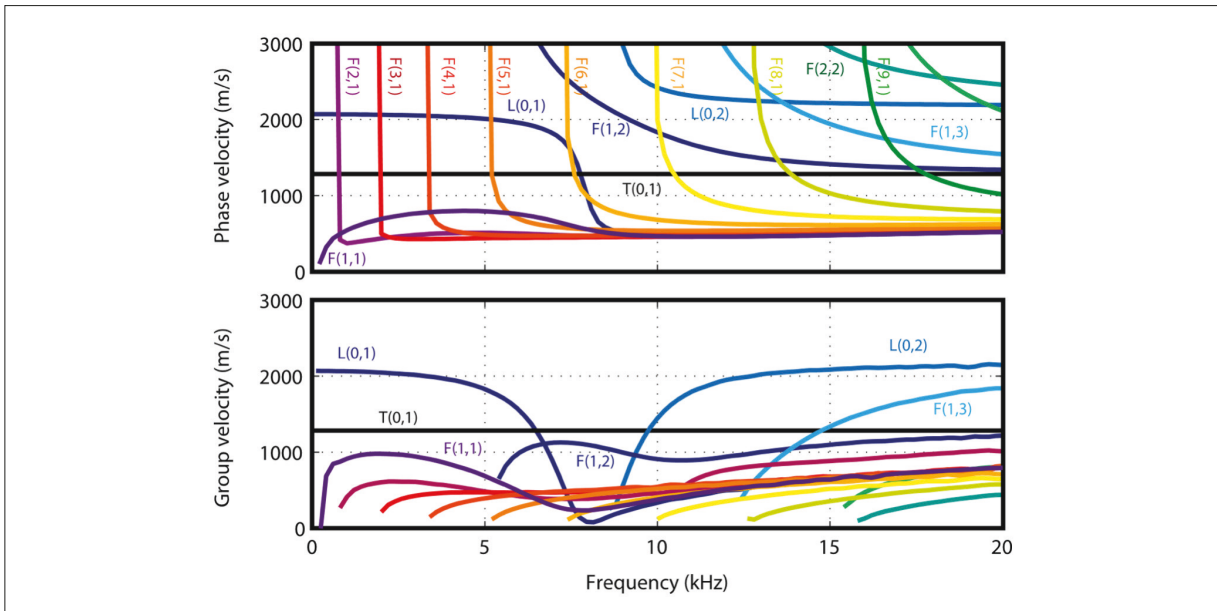


Fig. 2 : Vitesse de phase (haut) et de groupe (bas) pour un cylindre non-endommagé

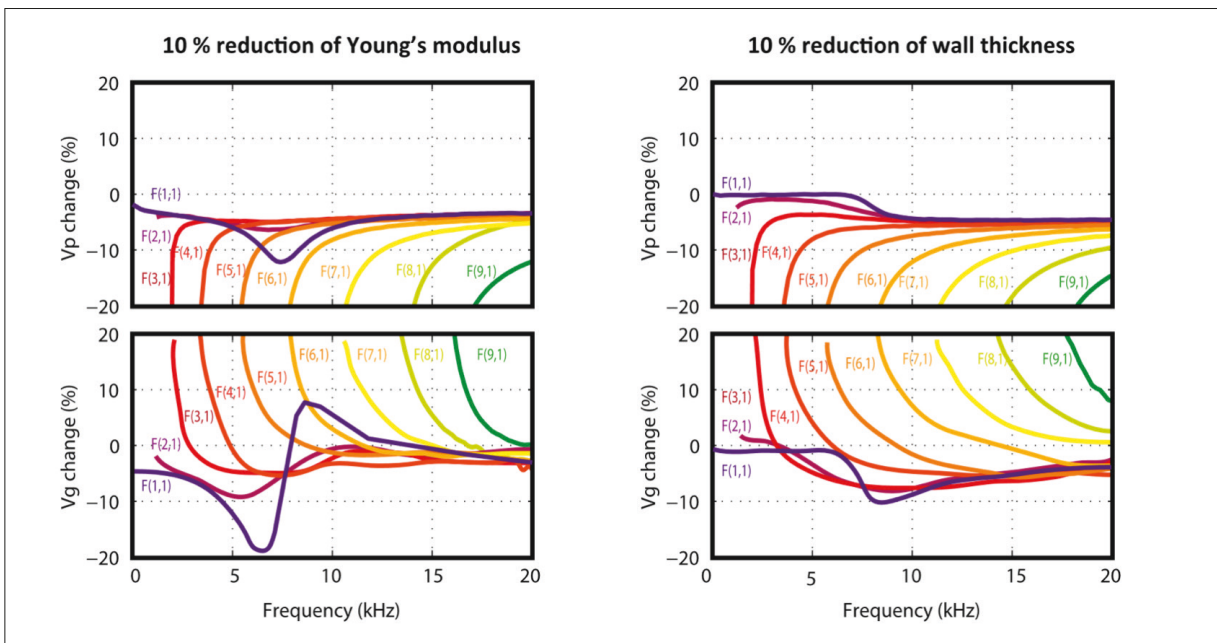


Fig. 3 : Variations de vitesse de phase (en haut) et de groupe (en bas) (en pourcentage) pour les différents modes de flexion dans le cas d'une variation de 10% du module de Young (à gauche) ou de l'épaisseur (à droite).

La figure 2 présente les courbes de dispersion des ondes guidées se propageant dans le cylindre en fibre, c'est-à-dire la vitesse de phase et la vitesse de groupe des premiers modes en fonction de la fréquence. La nomenclature et la méthode utilisées pour le calcul des courbes de phase et de vitesse de groupe suivent celles proposées dans [27], pour lesquels les modes Longitudinaux sont notés par (L), les modes de Torsion par (T) et les modes de Flexion par (F). Deux indices sont utilisés, correspondant respectivement aux ordres de mode radial et d'épaisseur. Pour le calcul des courbes de dispersion, les cylindres sont considérés comme infiniment longs et exempts de charges externes.

De plus, l'assemblage carton est supposé isotrope avec une densité moyenne de  $750 \text{ kg/m}^3$ , un module de Young de  $3 \text{ GPa}$  et un coefficient de Poisson de  $0,3$  suite à une étude antérieure sur des matériaux similaires [3]. En raison de la grande épaisseur et du petit diamètre de la géométrie d'intérêt, un grand nombre de modes est observé dans la bande passante audible, c'est-à-dire en dessous de  $20 \text{ kHz}$ . Le mode longitudinal  $L(0,1)$  et le mode de torsion  $T(0,1)$  correspondant à la compression pure et à la torsion dans le sens longitudinal et radial, respectivement, sont présentés mais ne sont pas considérés dans l'étude suivante. Cela peut s'expliquer par la difficulté de les générer à l'aide de trans-

ducteurs acoustiques dans cette gamme de fréquences puisqu'ils sont majoritairement constitués de mouvements dans le plan. Ainsi, les techniques classiques de détection des défauts utilisées pour l'inspection des pipelines en utilisant les modes  $L(0,1)$  ou  $L(0,2)$  ne peuvent être utilisées ici.

Les modes de flexion sont plutôt proposés en raison de la facilité de génération et de mesure utilisant des transducteurs en contact et sans contact classiques qui sont surtout sensibles aux mouvements transverses (hors-plan). Dans la gamme de fréquences d'intérêt, c'est-à-dire au-dessous de 50 kHz, les neuf premiers modes de flexion  $F(1,n)$  où  $n$  représente le nombre de cycles de variation autour de la circonférence, ont approximativement la même vitesse de phase de 450 m/s au-dessus de 2 kHz, de sorte que la sélectivité du mode est difficile à atteindre et que la propagation multimode se produit.

### Sensibilité aux défauts typiques

Afin de déterminer l'effet d'un endommagement potentiel sur la propagation des ondes des modes de flexion, les variations des vitesses de phase et de groupe par rapport à une réduction de l'épaisseur ou du module de flexion sont décrites sur la figure 3, page précédente. Afin d'être représentatives, des diminutions typiques de 10% sont appliquées aux deux paramètres comme suggéré dans [15]. Seuls les modes de flexion  $F(1,n)$  avec  $n < 9$  sont présentés pour plus de clarté et les résultats sont exprimés en termes de changements relatifs par rapport au cas non endommagé. Une réduction de 10% de l'épaisseur correspond au cas d'une couche manquante qui peut survenir lors du processus de fabrication. L'autre scénario d'endommagement correspond à une diminution du module de Young qui peut être causée par une humidité excessive ou à une réduction de la surface laminée.

Dans le cas d'une réduction d'épaisseur, une diminution de 5% des vitesses de phase et de groupe est observée au-dessus de 10 kHz pour le mode  $F(1,1)$ . Dans le cas d'une réduction du module de Young, on observe la même réduction globale de la vitesse de phase avec un pic autour de 8 kHz correspondant à une réduction maximale de 12%. La vitesse de groupe pour ce mode présente une forte variation dans la gamme de fréquences d'intérêt avec une diminution jusqu'à 20% au-dessous de 8 kHz et une augmentation de la vitesse de groupe jusqu'à 10% au-dessus de 8 kHz. Dans le cas d'une réduction de l'épaisseur de paroi, seule une diminution de la vitesse de groupe jusqu'à 10% est observée pour ce mode. Pour les modes d'ordres supérieurs, une réduction globale de la vitesse de phase et une augmentation de la vitesse de groupe jusqu'à 20% près des fréquences de coupure sont observées.

Ainsi, en fonction du scénario d'endommagement et de la sévérité des défauts, on s'attend à des changements de la vitesse du groupe, et donc du temps de vol des paquets d'ondes qui se propagent. De plus, la diminution de la vitesse de phase est responsable d'un changement de couplage acoustique, c'est-à-dire d'un changement d'angle de réfraction entre les ondes acoustiques et les ondes mécaniques, de sorte qu'un changement d'amplitude est attendu en utilisant des transducteurs couplés par air comme décrit dans [7].

## Validation expérimentale en laboratoire

### Stratégie pour la génération et la mesure sans contact

Afin de garantir un contrôle rapide de chaque cylindre dans la ligne de production, des solutions sans contact sont préférées aux systèmes en contact classiques tels que les piézocéramiques montées sur des sabots (*wedges*). Parmi les solutions sans contact existantes pour la génération d'ondes guidées, des sondes couplées par air ou des solutions optiques sont disponibles pour la génération et la mesure des ondes de flexion. Cependant, dans la gamme de fréquences d'intérêt (inférieure à 20 kHz), l'excitation pulsée par laser (Nd:Yag par exemple) serait inefficace, et seules des solutions couplées par air peuvent être envisagées pour une application pratique.

La figure 4 présente le montage expérimental en laboratoire. Deux transducteurs capacitifs à large bande couplés par air fabriqués à l'Université de Bordeaux - I2M sont situés aux deux extrémités du cylindre avec un angle d'incidence de  $38^\circ$ , ce qui correspond à une vitesse de phase de 430 m/s. Ceci permet la génération sélective de tous les modes de flexion  $F(n,1)$  dans la gamme de fréquences d'intérêt, c'est-à-dire entre 2 kHz et 50 kHz. Afin d'éviter une propagation directe dans l'air, un panneau de mélamine poreux de 50 mm d'épaisseur est placé entre les deux sondes.

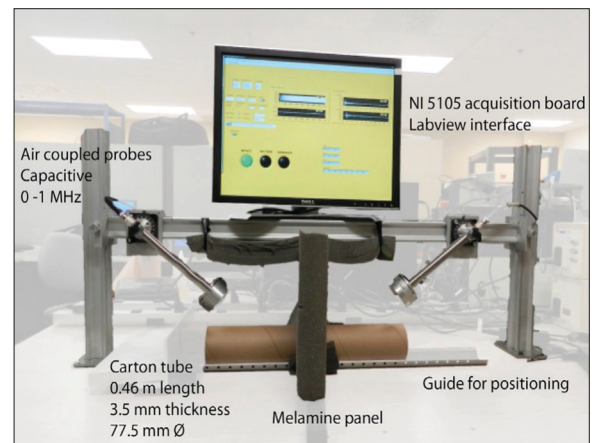


Fig. 4 : Montage expérimental en laboratoire à l'aide de sondes capacitives à couplage par air

La mesure de la fonction de transfert entre l'actionneur et le capteur s'effectue par excitation en sous-bandes [16]. Le principe réside dans l'utilisation d'une séquence de signaux en rafales multiples de largeur de bande limitée en entrée en conjonction avec des filtres de reconstruction appropriés afin d'extraire la fonction de transfert d'un système donné avec un rapport signal sur bruit (*Signal to Noise Ratio* ou SNR) élevé sur une largeur de bande donnée. Pour ce faire, cinq sous-bandes sont utilisées de 5 kHz à 45 kHz par pas de 10 kHz. Les signaux d'entrée sont ensuite amplifiés à l'aide d'un amplificateur haute tension (NOVO UA-8200) et la mesure est effectuée par une carte d'acquisition haute impédance (National Instrument NI 5105) contrôlée via une interface LabVIEW personnalisée.

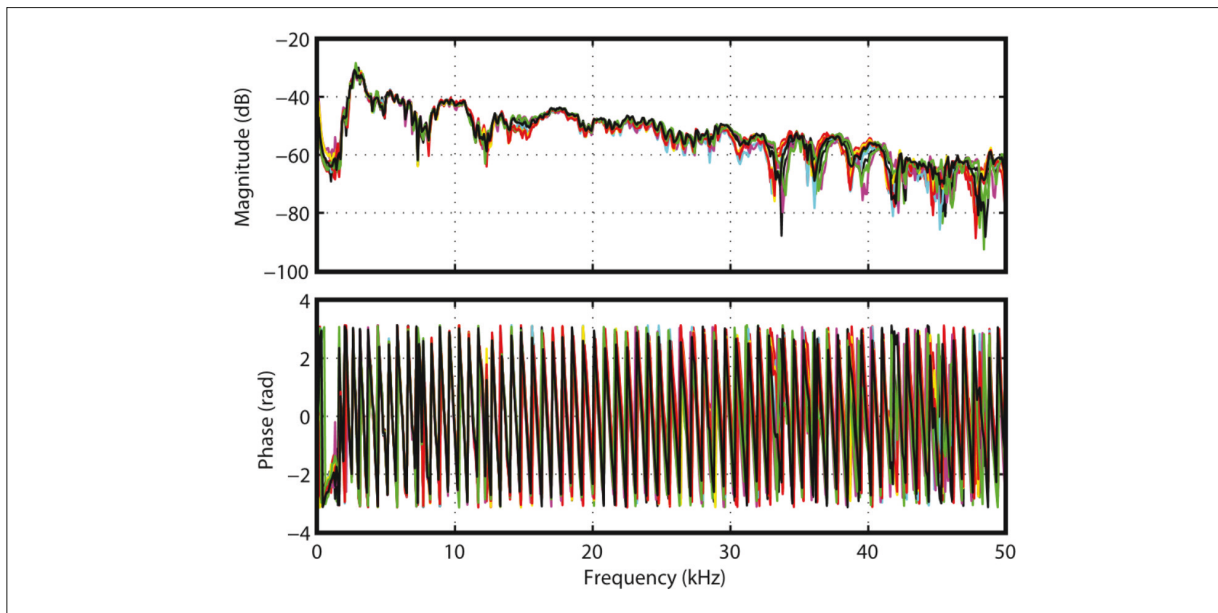


Fig. 5 : Fonctions de transfert en amplitude (haut) et phase (bas) pour différents cylindres non endommagés afin de démontrer la variabilité entre échantillons du même groupe

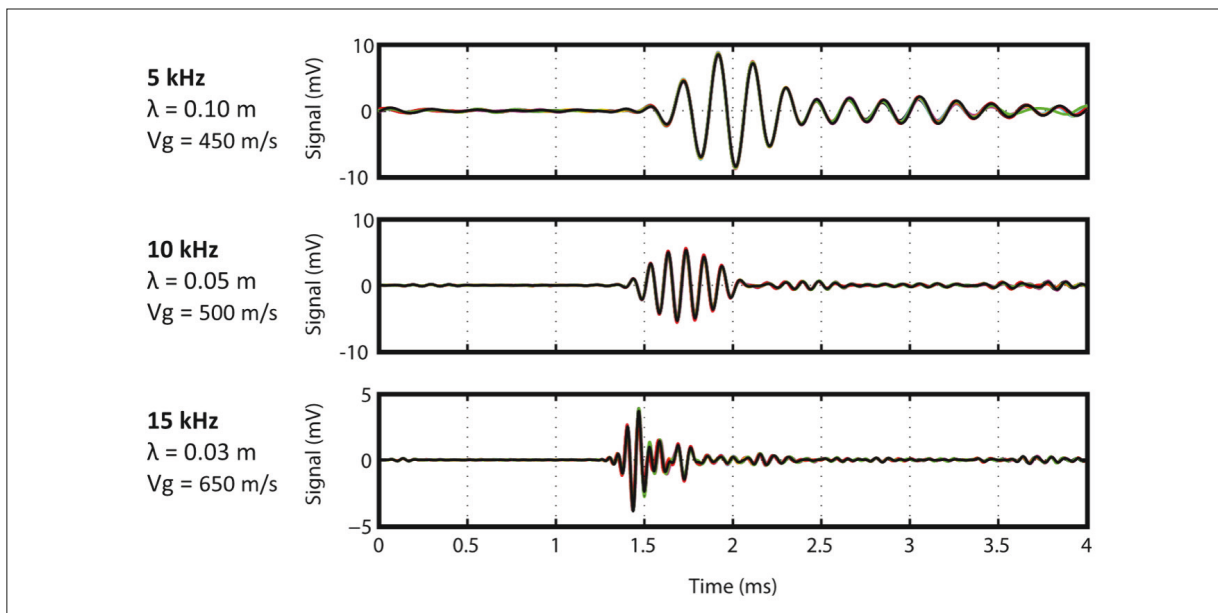


Fig. 6 : Signaux temporels reconstruits au niveau du capteur pour une salve de 3,5 cycles à 5 kHz (haut), 10 kHz (milieu) et 15 kHz (bas). Les dix signaux obtenus sur différents cylindres non-endommagés sont superposés afin de démontrer la variabilité des mesures

La figure 5 présente la fonction de transfert reconstruite entre le signal de l'émetteur et la réponse mesurée à l'autre sonde couplée par air en termes d'amplitude et de phase pour dix différents cylindres en fibre non endommagés jusqu'à 50 kHz. Cette fonction de transfert tient compte de la propagation dans l'espace entre les sondes et le cylindre et de la propagation de l'onde guidée dans le cylindre lui-même. Étant donné qu'un rail de guidage est utilisé pour le positionnement, l'espace entre le cylindre et les sondes est supposé constant pour l'ensemble de l'essai, de sorte que les écarts entre la fonction de transfert mesurée peuvent

être attribués à des changements dans la propagation des ondes guidées dans le cylindre. En raison de petites variations locales dans le matériau, la largeur ou l'épaisseur de la gaine, la répétabilité de la fonction de transfert mesurée n'est pas garantie pour tous les échantillons non endommagés au-dessus de 25 kHz. De plus, en raison de l'amortissement élevé du matériau, on observe un faible SNR au-dessus de 20 kHz. Ceci justifie le choix de la plage de fréquences d'intérêt entre 2 kHz et 20 kHz, pour laquelle la répétabilité est assurée dans un lot non endommagé et un rapport signal-bruit supérieur à 40 dB est observé.

### Métriques d'intérêt

Afin d'extraire les métriques liées au type et à la gravité des défauts, une reconstruction en bande étroite (burst) du signal mesuré est effectuée à partir des fonctions de transfert mesurées en utilisant la transformée de Fourier inverse. Ceci permet d'interroger à différentes fréquences et de mesurer facilement la vitesse de groupe (par temps de vol) et l'amplitude de la réponse mesurée qui est liée à l'amortissement du matériau mais aussi aux changements de vitesse de phase par une modification de l'angle de réfraction entre les ondes acoustiques et mécaniques comme décrit dans la section "Sensibilité aux défauts typiques" et indiqué dans [7]. Pour ce faire, on utilise des salves de Hanning à 5 kHz, 10 kHz et 15 kHz pour couvrir différentes gammes de fréquences, et donc différentes longueurs d'onde de 10,0 mm à 3,3 mm. La figure 6 présente les signaux reconstitués pour le lot non endommagé de dix cylindres différents afin de démontrer la répétabilité et la complexité des signaux mesurés. Les vitesses et longueurs d'onde moyennes des groupes pour les modes de propagation de la flexion sont également indiquées à la figure 6. À 5 kHz et 10 kHz, on observe une propagation multimodale et dispersive avec une distorsion du paquet d'ondes de 3,5 cycles à presque 7 cycles à 10 kHz. Au-dessus de 15 kHz, la dispersion de l'onde est limitée en fonction de la vitesse de groupe constante prévue pour tous les modes de flexion, telle qu'observée sur la figure 2. L'extraction du temps de vol et de l'amplitude à la valeur maximale de crête est ensuite effectuée en utilisant l'enveloppe du signal calculée en utilisant l'amplitude du signal analytique (transformée de Hilbert).

### Résultats sur défauts typiques

Afin de démontrer la répétabilité et la robustesse des paramètres proposés, des mesures ont été effectuées sur cinq lots spécialement fabriqués de dix cylindres en fibre chacun, afin de représenter les quatre défauts typiques rencontrés au cours du processus de fabrication, tel que décrit au tableau 1. Les valeurs relatives des résistances à la compression radiale mesurées sur dix cylindres différents sont présentées afin de classer l'influence sur la qualité du produit par rapport au type de défaut.

Nom	Description		Résistance à la compression radiale relative
U	Undamaged	Mesures de référence	100%
J	Liner Joint	Présence d'un joint d'adhésion dans une couche	97%
W	Liner width	Reduction de 1 mm de la largeur de 5 couches	95%
T	Wall thickness	Réduction de 15% de l'épaisseur	93%
H	Humidity	Augmentation du taux d'humidité	47%

Tabl. 1 : Présentation des défauts typiques et de leur influence sur la compression radiale

Les résultats obtenus sur les cinq lots à 5 kHz et 10 kHz sont présentés à la figure 7 en utilisant les deux mesures proposées dans la section précédente (amplitude et temps de vol). Les résultats obtenus à 15 kHz ne sont pas présentés ici car la sensibilité aux différents types de défauts est maximale entre 5 kHz et 10 kHz comme le montre la figure 3. Les fréquences utilisées pour la détection et l'identification des défauts sont ainsi choisies dans le domaine audible (c'est-à-dire en dessous de 20 kHz). Ainsi, le processus sera audible et également affecté par la parole et le bruit ambiant. À cet effet, une zone de confinement avec des conditions anéchoïques devrait être assurée pour l'implantation pratique du procédé.

Une simple analyse statistique est effectuée afin de déterminer les seuils de détection des défauts. Dans chaque cas, on utilise une représentation sous forme de diagramme de boîte, pour laquelle la marque centrale indique la médiane, les bords inférieur et supérieur de la boîte indiquent respectivement les 25<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> percentiles. Un nuancier est également ajouté sur la base des métriques obtenues pour tous les cylindres d'un lot par rapport aux valeurs extrêmes du lot non endommagé (U). Par exemple, si tous les cylindres d'un lot sont identifiés comme défectueux, la charte de couleurs associée aux paramètres d'intérêt est rouge, tandis qu'une couleur jaune ou verte indique un paramètre pour lequel les cylindres sont partiellement ou pas du tout identifiés comme défectueux.

Dans la figure 7, page suivante, il semble que les quatre types de défauts peuvent être identifiés avec précision en les comparant au cas non endommagé (U). Pour ce faire, un groupe de référence est nécessaire afin de définir les valeurs limites des paramètres d'intérêt. Le joint de gaine (J) peut être détecté en regardant le temps de vol à 5 kHz, alors qu'aucune influence à 10 kHz (et au-dessus) n'est observée. Comme ce défaut est très local (le joint de gaine mesure environ 50 mm de long et peut être localisé n'importe où dans le cylindre), tous les modes de flexion peuvent ne pas y être sensibles. Cela pourrait expliquer pourquoi le joint ne peut être détecté qu'à 5 kHz. Le changement de largeur (W) ou d'humidité (H) de la gaine est responsable d'une diminution de l'amplitude et du temps de vol à 10 kHz, de sorte que ces deux types de défauts peuvent avoir une cause similaire. En effet, la diminution de temps de vol, c'est-à-dire une augmentation de la vitesse de groupe à 10 kHz, peut être attribuée à une diminution du module de Young, comme le suggère la figure 3 pour le mode  $F(1,1)$ . De plus, la sensibilité peut également être prévue par le modèle numérique et les écarts à 5 kHz permettent une discrimination entre ces deux types de défauts, puisqu'une diminution de temps de vol à 5 kHz est observée pour le lot (H) et une diminution d'amplitude est observée pour le lot (W). Cela pourrait être attribué à la sensibilité des deux types de défauts à des modes de flexion différents.

En ce qui concerne la diminution de l'épaisseur (T), un effet inverse est observé avec une augmentation de l'amplitude et du temps de vol à 10 kHz. L'augmentation de temps de vol attribuée à une diminution de la vitesse de groupe et l'insensibilité à 5 kHz sont cohérentes avec les prévisions numériques de la figure 3 pour le mode  $F(1,1)$ .

Ainsi, avec cette simple mesure à deux fréquences différentes, il est possible de distinguer entre les quatre types de défauts. Cela dépend de la définition correcte des seuils pour les cylindres non endommagés, de sorte qu'un protocole de mesure de base est nécessaire.

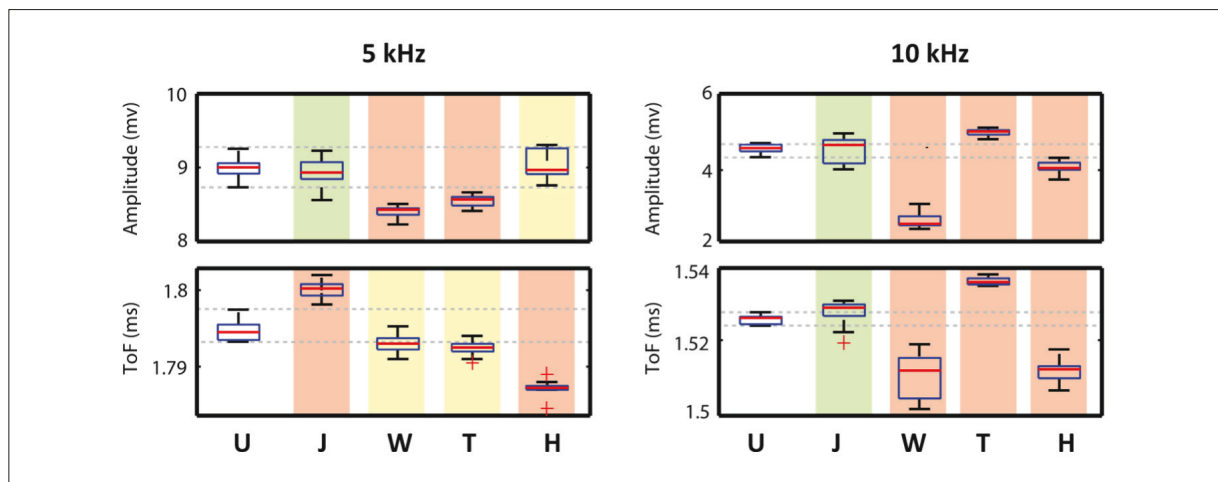


Fig. 7 : Résultats typiques obtenus pour les différents groupes d'échantillons



Fig. 8 : Prototype autonome sur site à Drummondville (gauche) et système CompactDAQ pour une utilisation embarquée robuste (droite)

## Implantation sur site industriel

### Adaptation aux contraintes de production industrielle

Afin de s'adapter aux contraintes industrielles en termes de volume de production et de versatilité des produits offerts, le contrôle qualité de chaque cylindre produit une fois le séchage effectué s'avère trop fastidieux en termes de manipulation et de temps d'inspection. Aussi, une stratégie d'inspection en production avant la découpe a été retenue afin de pouvoir tester tous les cylindres avant séchage. Cela comporte de nombreux avantages puisque les cylindres sont humides et les ondes sont donc moins amorties que dans le cas de cylindres secs. Également, les cylindres étant non découpés, l'influence de la position des sondes et de la longueur de découpe ne sont plus des paramètres expérimentaux à considérer. En revanche, l'utilisation directe sur la ligne de production engendre la présence de vibrations parasites dans le domaine de fréquences d'intérêt et la proximité de la ligne d'assemblage expose le montage à des ondes acoustiques extérieures (air comprimé, passage de chariots de maintenance par exemple). Aussi, il a été nécessaire de concevoir un caisson d'isolation monté sur rouleaux afin de stabili-

ser le système de contrôle avec la dynamique du cylindre humide, comme indiqué à la figure 8.

Dans le but d'augmenter la robustesse du montage, des transducteurs ultrasonores industriels distribués par PROWAVE ont été utilisés à des fréquences de résonance de 25 kHz et 40 kHz afin de couvrir une bande passante allant de 20 kHz à 50 kHz environ. Comme la propagation dans ondes dans l'air et des ondes guidées est sensible à la température et à l'humidité ambiantes, des mesures de référence sont nécessaires à intervalles réguliers afin de compenser les changements environnementaux. Toutefois, comme le processus d'évaluation doit être automatisé, un processus de moyenne glissante est utilisé lors de l'implantation sur site.

Afin de rendre le système utilisable sur une chaîne de production en continu (24 h / 24 et 7j / 7), une plateforme CompactDAQ de National Instruments a été adaptée au projet en incluant des entrées et sorties analogiques ainsi qu'un protocole de communication par MODBUS afin de pouvoir dialoguer avec un automate programmable en usine (interactions avec le technicien, témoins lumineux, rejet automatique des cylindres non conformes).

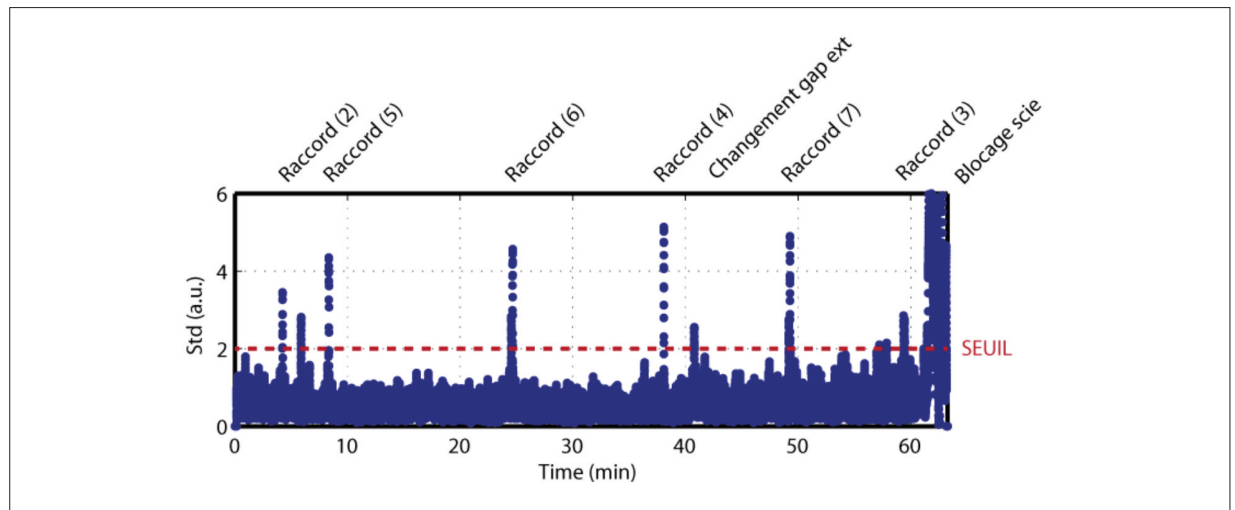


Fig. 9 : Résultats typiques sur site en production avec détection de 8 défauts sur 1h, représentant un taux de rejet de l'ordre de 0.5%

### Résultats sur site

Le système a été validé sur une période de plusieurs jours de manière continue à l'usine ABZAC de Drummondville (QC). Durant cette période, le système a effectué des contrôles de qualité toutes les 500 ms, correspondant à une analyse sur des longueurs de 0,5 m de cylindre environ. Les résultats typiques présentés à la figure 9, démontrent un taux de rejet moyen sur une période de production normale, ce qui correspond à environ 18 rejets par heure. Une grande sensibilité du système dans le cas de différents types de défauts est observée et ce indépendamment du temps et des conditions extérieures.

### Conclusion

Cet article présente une méthode et un appareil pour l'inspection rapide et sans contact des cylindres en fibre. Le principe repose sur l'utilisation de transducteurs capacitifs couplés par air à des fréquences inférieures à 20 kHz pour la génération et la mesure des ondes de flexion. L'analyse de sensibilité est effectuée pour différents modes et types de défauts et est validée expérimentalement pour quatre types de défauts généralement observés pendant le processus de fabrication. La détection de tous les types de défauts est démontrée en utilisant à la fois l'amplitude et le temps de vol des paquets d'ondes à deux fréquences différentes, ce qui permet de contrôler la qualité du processus. L'implantation industrielle sur site permet de démontrer le potentiel de la méthode et les performances entrevues.

### Remerciements

Ces travaux ont en partie été réalisés grâce au soutien financier du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) dans le cadre du programme de subventions ENGAGEMENT et ENGAGEMENT PLUS.

### Références bibliographiques

- [1] Tech. rep., CCTi Standard Testing Procedure - T 150 Determination of the flexural modulus and bending stiffness of a fiber core by: (A) modal analysis and (B) three point bending. 2008
- [2] Yokoyama T, Nakai K. Evaluation of in-plane orthotropic elastic constants of paper and paperboard. *Dimensions* 2007;60:50
- [3] Bank L, Gerhardt T, Gordis J. Dynamic mechanical properties of spirally wound paper tubes. *J Vib Acoust Stress Reliab Des* 1989;111(4):489-90
- [4] Habeger C, Wink W. Ultrasonic velocity measurements in the thickness direction of paper. *J Appl Polym Sci* 1986;32(4):4503-40
- [5] Brodeur PH, Johnson MA, Berthelot YH, Gerhardstein JP. Noncontact laser generation and detection of lamb waves in paper. *J Pulp Pap Sci* 1997;23(5):J238
- [6] Zhang X, Jackson T, Lafond E. Stiffness properties and stiffness orientation distributions for various paper grades by non-contact laser ultrasonics. *NDT E Int* 2006;39(7):594-601
- [7] Alvarez-Arenas TG, Soto D. Characterization of mineral paper by air-coupled ultrasonic spectroscopy. *Ultrasonics* 2012;52(6):794-801
- [8] McIntyre CS, Hutchins DA, Billson DR, Stor-Pellinen J. The use of air-coupled ultrasound to test paper. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 2001;48(3): 717-27
- [9] Jong JH, Brodeur PH, Lafond E, Gerhardstein JP, Pufahl BM. Laser ultrasonics for noncontact measurement of lamb waves in static and moving paper. *J Pulp Pap Sci* 2000;26(10):358-66
- [10] E. Kibirktis, A. Kabelkaite, A. Dabkevieius, L. Ragulskis, Investigation of vibrations of packaging materials., *Journal of Vibroengineering* 10(2), 225-235, 2008
- [11] Quaegebeur N, Masson P, Berry A, Ardin C, D'Anglade PM. Ultrasonic non-destructive testing of cardboard tubes using air-coupled transducers. *NDT & E International* 2017. 93
- [12] G. Biagiotti, Machine for producing cardboard or similar tubes, with means for cutting the tube into sections of predetermined lengths, US Patent 5,873,806 (Feb. 23 1999)
- [13] Tech. rep., ASTM E213-E214e1 A. International, Standard practice for ultrasonic testing of metal pipe and tubing. 2014
- [14] Silk M, Bainton K. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to lamb waves. *Ultrasonics* 1979;17(1):11-9
- [15] Quaegebeur N, Micheau P, Masson P, Castaings M. Methodology for optimal configuration in structural health monitoring of composite bonded joints. *Smart Mater Struct* 2012;21(10):105001
- [16] N. Quaegebeur, P. Masson, P. Micheau, N. Mrad, Broadband generation of ultrasonic guided waves using piezoceramics and sub-band decomposition, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 59(5), 928-938, 2012