

Conception et développement d'un système d'inspection par ondes guidées pour la détection des défauts dans les tubes

M. Kharrat^a, M. Ichchou^a, O. Bareille^a, W. Zhou^a

a. LTDS, Ecole Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Collongue 69134 Ecully.

Résumé :

La propagation des ondes guidées dans les tubes permet l'inspection rapide et l'identification des défauts (fissures, corrosion ...). Parmi les modes de propagation, les ondes de torsion ont de nombreux avantages prouvés pour l'inspection des canalisations. Dans ce contexte, un outil d'inspection basé sur la génération du mode de torsion par des transducteurs piézoélectriques a été développé. Le générateur des ondes guidées permet l'émission des ondes de torsion et la réception des échos réfléchis. Par la suite, certains outils de traitement du signal pour le filtrage et l'analyse des signaux enregistrés sont utilisés dans le but d'éliminer les bruits de fonds et les parasites et d'extraire les informations les plus pertinentes. Plusieurs tests expérimentaux ont été effectués sur des installations réelles. Le mode T est bien excité et sa vitesse est vérifiée. D'après les réponses enregistrées, l'identification des échos permet la reconnaissance des défauts et des singularités dans la canalisation.

Abstract :

Guided-waves propagation in pipes allows the rapid inspection and defects identification (cracks, corrosion...). Among the propagation modes, torsional waves have many proven benefits for the inspection of pipelines. In this context, an inspection tool based on the generation of torsional mode by piezoelectric transducers has been developed. The guided-waves generator allows the emission of torsional waves and receiving of reflected echoes. Subsequently, some signal processing tools for filtering and analyzing the recorded signals are used to eliminate background noise and parasites and extract the most relevant information. Several experimental tests were conducted on real installations. The T mode is well excited and its speed verified. According to the responses recorded, the identification of echoes allows the recognition of defects and singularities in the pipeline.

Mots clefs : identification des défauts ; contrôle non destructif ; onde de torsion

1 Introduction

L'inspection des pipelines est une opération nécessaire et obligatoire dans les industries au cours de la maintenance des canalisations. En utilisant les méthodes conventionnelles de contrôle non destructif, cette opération devient de plus en plus délicate et inefficace notamment si on parle de centaines voire des milliers de kilomètres de tuyaux. Il est donc primordial d'utiliser une méthode plus rapide et moins coûteuse pour la surveillance des pipelines. La technique de détection des défauts par ondes guidées est la solution qui devient de plus en plus répandue dans le domaine de contrôle non destructif. Cette technique permet le balayage de longues distances de tuyauteries à partir d'une seule position par l'utilisation d'ondes guidées propagatrices au long des tubes à tester et permettent la détection des défauts.

L'utilisation des ondes guidées et l'étude de leur interaction avec les discontinuités géométriques présentes dans les structures examinées, ont été investiguées dans plusieurs travaux. Certaines études ont examinée la détection des défauts en utilisant les ondes L(0,2) [1, 2, 3]. D'autres études montrent

l'efficacité du mode de torsion à la détection des défauts en présentant une comparaison entre les ondes $L(0,2)$ et $T(0,1)$ avec des essais expérimentaux et des simulations numériques [4, 5, 6]. Plusieurs travaux ont élaboré des essais expérimentaux en utilisant des systèmes d'inspection par ondes guidées sur des structures présentant des anomalies [7, 8].

Dans ce cadre, un prototype expérimental a été développé permettant d'exciter la structure par des ondes bien définies qui se propagent dans le tube et se réfléchissent des défauts et des singularités rencontrés. Le mode de torsion $T(0,1)$ est le mode choisi à générer par notre système. Ce choix est basé sur les propriétés intrinsèques de ce mode. La génération des ondes de torsion dans notre système est opérée par l'utilisation d'un nombre de transducteurs piézoélectriques bien déterminés fixés autour de la circonférence du tube. Une fois alimentés par une tension électrique, ils se mettent à vibrer suivant la direction circonférentielle du tube créant ainsi un mouvement de torsion. Notre prototype, dénommé WiBe (Wave Inspection Belt), comporte deux rangées de transducteurs : une pour l'excitation des ondes incidentes et l'autre pour la réception des signaux réfléchis.

Dans ce papier, l'élaboration d'un outil d'inspection de pipelines est décrite. Quelques résultats expérimentaux sont présentés pour vérifier la capabilité du système d'inspection à générer les ondes de torsion et à détecter les défauts dans un tube d'essai en PVC et dans un autre en acier. Les résultats expérimentaux permettent de valider le concept.

2 Conception du générateur d'ondes

La figure 1 montre les courbes de dispersion de la vitesse de groupe des modes de propagation dans un tube cylindrique creux de diamètre 140mm et d'épaisseur 4mm. On peut distinguer dans cette figure la présence de trois types de modes de propagation : $L(0,n)$, $T(0,n)$ et $F(m,n)$, qui sont respectivement, les modes longitudinal, de torsion, et de flexion. Le premier indice m indique l'ordre de la variation harmonique du déplacement et de la contrainte autour de la circonférence, le deuxième indice n est un compteur [3]. Les modes axisymétriques sont préférés pour la détection des défauts. Plusieurs travaux précédents ont utilisés le mode longitudinal $L(0,2)$ caractérisé par sa sensibilité aux défauts, sa rapidité et sa non-dispersivité à partir d'une certaine fréquence. Ces travaux montrent aussi l'intérêt de l'utilisation du mode de torsion $T(0,1)$. En effet, ce dernier est le seul mode de torsion présent dans la gamme de fréquence, il garde sa vitesse constante et, il se propage dans les tubes remplis de liquides sans aucun problème d'interférence [4, 5].

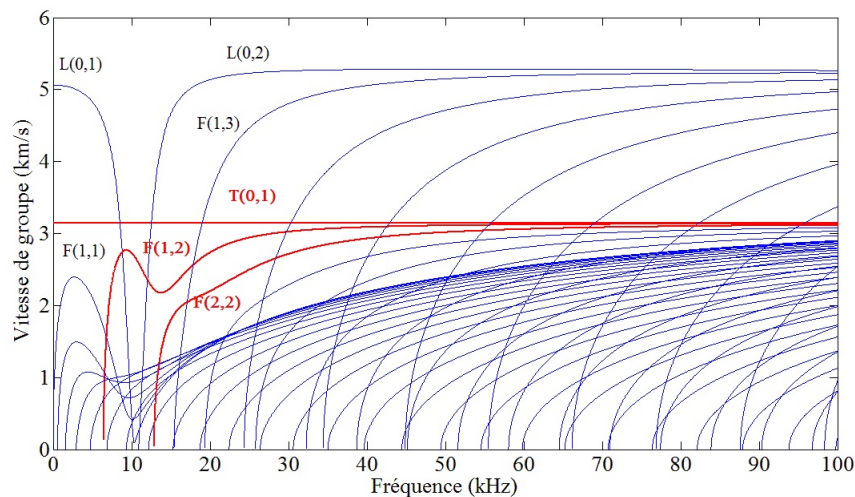


FIGURE 1 – Courbes de dispersion de la vitesse de groupe des modes de propagation dans un tube $\Phi 140\text{mm}$ épaisseur 4mm

Un élément clé dans la conception du système d'inspection est le choix et l'exploitation d'un seul mode. Généralement une source d'excitation peut exciter tous les modes qui existent dans sa bande de fréquence, ce qui donne comme résultat un signal beaucoup plus compliqué pour l'interpréter. En

effet, même avec un seul mode, le grand soin est nécessaire pour l'identification correcte des réflexions des défauts et des particularités qui existent dans le tube tels que les soudures et les supports de maintien. Par conséquent, bien que ce ne soit pas évident à réaliser, il est essentiel de concevoir le générateur d'ondes de façon à exciter seulement le mode choisi.

Afin d'exciter le mode $T(0,1)$, seize transducteurs piézoélectriques de cisaillement sont distribués et fixés uniformément autour de la circonférence du tube. Les électrodes d'alimentation sont montées selon la direction d'épaisseur de l'élément piézoélectrique. Quand ces éléments sont soumis à une tension, leurs faces supérieures et inférieures se mettent à vibrer en sens opposés, ce qui génère un cisaillement dans la direction circonférentielle du tube et par la suite le mode de torsion est produit. La partie réceptrice est constituée aussi de seize transducteurs piézoélectriques de même nature que ceux dans la partie excitatrice mais qui travaillent en effet direct en captant les vibrations réfléchies. Le signal d'excitation utilisé pour notre système est une fonction sinusoïdale multipliée par une fenêtre de Hanning (figure 2). Le fenêtrage est utile pour observer le signal sur une durée finie.

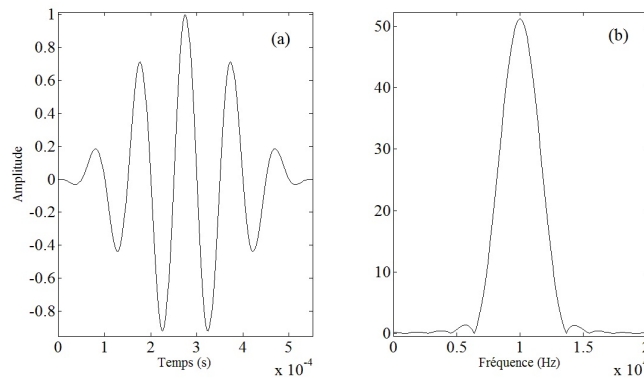


FIGURE 2 – Signal d'excitation de fréquence 10kHz , 5.5 cycles : (a) signal temporel ; (b) spectre de fréquence

3 Résultats expérimentaux

3.1 Installation expérimentale

La maquette d'essai (figure 3) comporte des cartes électroniques *National Instruments* commandées par un ordinateur. Ces modules assurent l'envoi des signaux analogiques vers le WiBe et l'acquisition des signaux reçus pour les numériser et les renvoyer à l'ordinateur. Un amplificateur de tension est installé pour fournir l'énergie nécessaire à l'excitation des transducteurs.

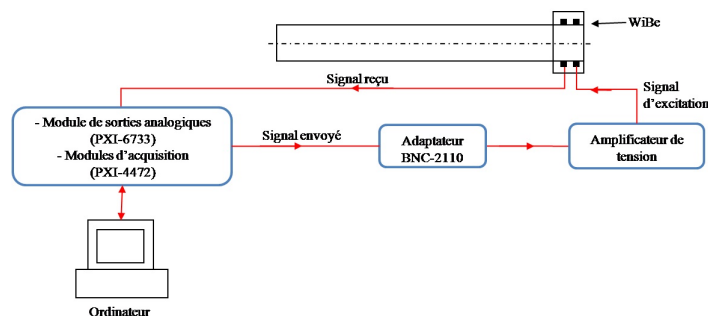


FIGURE 3 – Schéma de l'installation expérimentale

3.2 Essais sur un tube en PVC

Des tests de notre système WiBe sur un tuyau en PVC ont été effectués. Le choix de ce type de matériau est basé sur ses propriétés. En fait, on élimine la résonance qu'on rencontre dans l'acier et

qui génère pas mal de perturbations au niveau du signal mesuré. Le signal émis est beaucoup plus atténué que celui dans l'acier. De plus, la mise en oeuvre est facile avec le PVC et on a la possibilité de créer des défauts avec des formes et des positions variées. La longueur d'onde du signal incident est relativement plus faible par rapport à celle dans l'acier ce qui permet de détecter les défauts les plus petites.

3.2.1 Tube intact

Les essais sont effectués sur un tube en acier de longueur $2.8m$, de diamètre extérieur $140mm$ et d'une épaisseur $4mm$. Le WiBe émetteur est placé au bout du tube afin d'assurer une émission des signaux dans un seul sens. Le WiBe récepteur est placé à $1m$ de l'émetteur. Les résultats présentés ci-dessous (figure 4) sont pour un signal d'excitation de $10kHz$ et 3.5 cycles sur quatre voies réceptrices.

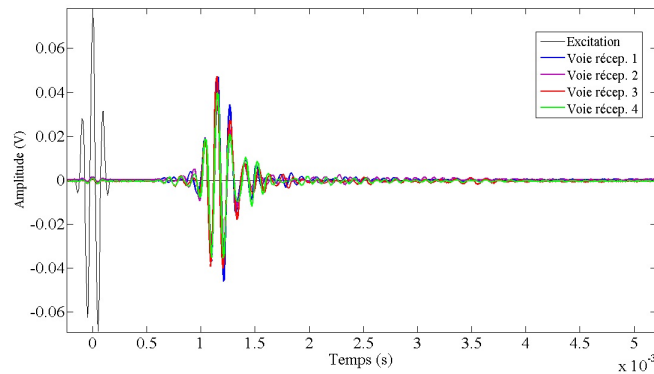


FIGURE 4 – Réponses temporelles de quatre voies réceptrices sur un tube en PVC $\phi 140mm$ épaisseur $4mm$, $f = 10kHz$, 3.5 cycles.

Ces résultats montrent la détection par le WiBe récepteur du passage de l'onde incidente selon le mode de torsion (le grand pic) avec une vitesse de propagation correspondante à celle dans le PVC ($\approx 850m/s$). La génération du mode de torsion dans un tube PVC sain est donc bien validée et ceci pour plusieurs fréquences d'excitations. On peut aussi bien remarquer de cette figure que le signal incident est brusquement atténué au long du tube et on ne voit même pas l'écho de son extrémité qui doit normalement être localisé temporellement à environ $t = 5.10^{-3}s$.

D'après la réponse temporelle, le mode de torsion est accompagné de quelques oscillations correspondantes à d'autres modes de propagation. Ceci est expliqué par le fait que les transducteurs piézoélectriques, dû à ses propriétés physiques, ne génèrent pas uniquement le mode de torsion, qui est le plus dominant bien évidemment, mais aussi du longitudinal et de la flexion. De cette façon la lecture des réponses temporelles se complique notamment lorsqu'on aura des réflexions des défauts et des singularités présentes dans la structure. La solution trouvée pour ce genre de situation est de calculer la réponse temporelle moyenne des voies réceptrices de façon à annuler ou diminuer l'influence des modes non-axisymétriques. La génération et la détection des signaux se propageant dans le tube PVC par notre système étant vérifiées, la création de défauts artificiels dans le tube et l'étude de la réponse temporelle résultante seront traitées par la suite.

3.2.2 Tube avec défaut

Les emplacements des deux parties du WiBe étant maintenues inchangés, une fissure (F) distante de $1.5m$ de l'extrémité du tube a été usinée. On présente sur la figure 5 la réponse moyenne sur quatre voies de réception pour un tube en PVC avec et sans défaut. Dans cette figure on voit bien la différence entre les deux courbes et on peut distinguer la présence du défaut.

Les réponses temporelles présentées ci-dessus montrent une forte atténuation du signal incident pendant sa propagation à travers le tube PVC. Il est donc intéressant de déterminer la courbe d'atténuation afin de savoir à partir de quelle position le niveau du signal devient quasiment non détectable.

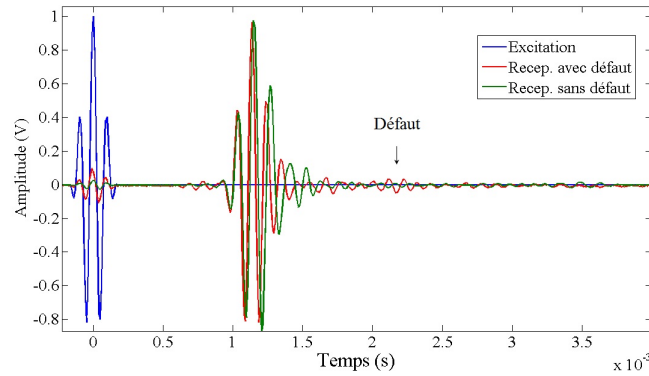


FIGURE 5 – Réponses moyennes sur un tube PVC $\phi 140\text{mm}$ épaisseur 4mm , $f = 10\text{kHz}$, 3.5cycles , avec et sans défaut.

3.2.3 Détermination de la courbe d'atténuation dans le tube PVC

La manipulation consiste à faire varier la position axiale d'un capteur piézoélectrique de même nature que celles utilisés dans le WiBe. Ce capteur relève à chaque position le signal temporel reçu du WiBe excitateur. La courbe d'atténuation est ensuite tracée en reportant pour chaque position axiale le niveau d'amplitude enregistré. La figure 6 montre l'allure de la courbe trouvée à partir des points de mesure relevés. L'évolution spatiale de la courbe expérimentale montre une décroissance exponentielle de l'amplitude en fonction de la position axiale. Le signal reçu atteint un niveau très faible et devient non détectable à l'extrémité du tube.

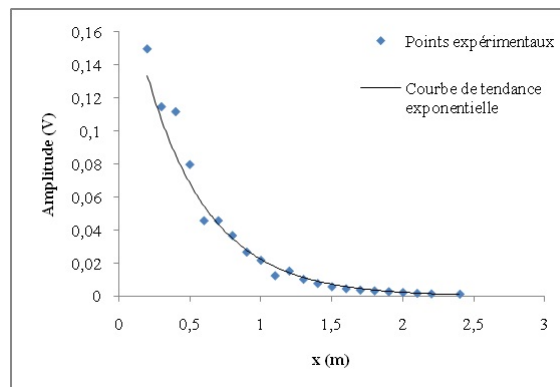


FIGURE 6 – Courbe d'atténuation de l'onde T(0,1) dans le tube en PVC $\phi 140\text{mm}$ épaisseur 4mm , $f = 15\text{kHz}$ 3.5cycles .

3.3 Essais sur tube acier avec défaut

A l'issue des essais faits sur le tube PVC, un tube en acier de longueur 3m , de diamètre extérieur 140mm et d'une épaisseur 4mm , est mis au test. Les deux parties, excitateur et récepteur, sont montées l'une à côté de l'autre à l'extrémité du tube. Une fissure artificielle est située à environ 1.7m du WiBe. Elle a une extension circonférentielle de 60mm (13.6% de la circonférence du tube), et une extension axiale de 3mm . Les essais sont réalisés avec le même type de signal d'excitation avec différentes fréquences. On présente sur la figure 7 la réponse temporelle moyennée sur toutes les voies réceptrices à l'issue de l'envoi d'une impulsion de 10kHz et 5.5cycles . Dans la figure (a) on peut voir clairement l'atténuation spatiale de l'onde incidente. Les grands pics correspondent aux réflexions simultanées de l'extrémité du tube : l'espacement temporel entre deux grands pics est le temps mis par l'onde dès son départ du WiBe et jusqu'à son retour avec la vitesse de propagation de l'onde de torsion dans un tube en acier ($\approx 3200\text{m/s}$). Autrement, c'est le temps nécessaire pour parcourir un aller-retour dans le tube (6m de distance). Un zoom de la réponse temporelle est montré dans la figure (b) où on peut voir

essentiellement l'impulsion d'émission de l'onde à $t = 0$, la réflexion du défaut à environ $t = 1,06 \cdot 10^{-3} s$, et la première réflexion de l'extrémité du tube à $t = 2,10 \cdot 10^{-3} s$.

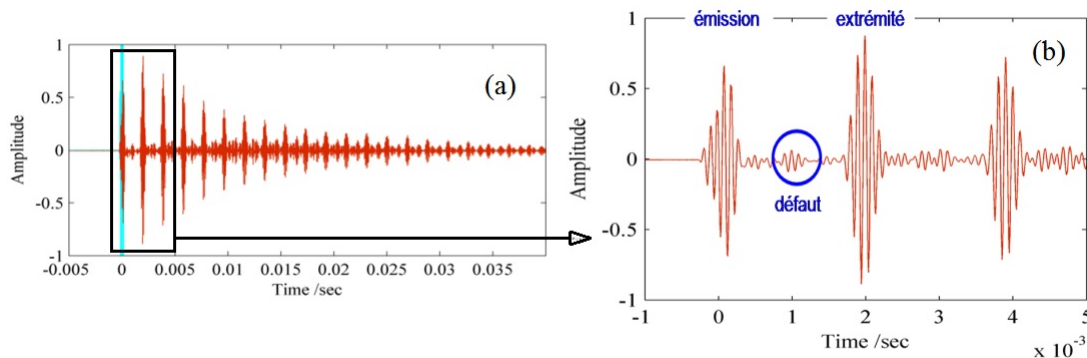


FIGURE 7 – Réponse moyenne sur un tube en acier $\phi 140mm$ épaisseur $4mm$, $f = 10kHz$, 5.5 cycles : (a) courbe temporelle; (b) zoom sur le défaut

4 Conclusions

Dans ce papier on a présenté le travail effectué pour le développement d'un prototype expérimental de générateur d'ondes guidées pour l'inspection et la détection des défauts dans les tubes. Les phases de conception et de test ont permis d'identifier certains paramètres influant sur la qualité des résultats et d'apporter plusieurs améliorations notamment à la signature des réponses temporelles. Les différents essais expérimentaux ont permis, en premier temps, de valider la capacité du système à générer les ondes de torsion avec une énergie suffisante à leur propagation dans le tube à travers des dizaines de mètres. Ensuite, la capacité du système à la détection des défauts ou des singularités existantes dans le tube est prouvée. Les travaux présentés ci-dessus permettent par la suite, en variant la fréquence d'excitation, de construire expérimentalement les courbes de réflexion en fonction de la fréquence d'excitation et les comparer à celles obtenues par les méthodes numériques.

Références

- [1] J.L. Rose 2003. Back to basics - Dispersion curves in guided wave testing. *Materials Evaluation*, vol. 60, pp. 20.
- [2] James Barshinger, Joseph L. Rose, and Michael J. Avioli 2002. Guided wave resonance tuning for pipe inspection. *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 124, no. 3, pp. 303.
- [3] D. Alleyne, M. Lowe, P. Cawley 1998. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes. *J. Appl. Mech.*, Vol. 65 : 635-641.
- [4] A. Demma 2004. The reflection of guided waves from notches in pipes : a guide for interpreting corrosion measurements. *NDT & E International*, vol. 37, no. 3, pp. 167-180.
- [5] 2006. J. Ma, F. Simonetti, and M. J. S. Lowe. Scattering of the fundamental torsional mode by an axisymmetric layer inside a pipe. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 120, no. 4, pp. 1871-1880.
- [6] Wenhao Zhu 2002. An FEM simulation for guided elastic wave generation and reflection in hollow cylinders with corrosion defects. *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 124, no. 1, pp. 108, .
- [7] E. Crescenzo, D. Dulay, R. Taneja, D. Chauveau. Utilisation des ondes ultrasonores guidées pour le contrôle non destructif. *Cofrend 2008*.
- [8] C. Laenen, T. Vogt. Contribution de la technique des ondes guidées ultrasonores à la surveillance de la corrosion des tuyauteries d'usines. *Cofrend 2008*.