

CFA/VISHNO 2016

Ondes guidées dans l'inspection des coudes des tubes

M. Predoi et C.C. Petre

University Politehnica of Bucharest, Splaiul Independentei, 313, sect. 6, Bucarest,
060042 Bucarest, Roumanie
predoi@gmail.com



LE MANS

L'utilisation des ondes guidées pour le contrôle non destructif des tubes a montré que la propagation des ondes ultrasonores guidées dans les coudes reste une question difficile. Une conversion modale se produit au passage de la partie droite vers le coude du tube et de nouveau vers la partie droite. La fréquence, mais aussi la géométrie du tube, surtout le rayon de courbure, influencent la conversion modale. L'énergie modale réfléchie, réduit la distance de l'inspection du tube et rend presque impossible de détecter des défauts dans le coude-même. Cependant, les défauts dans les coudes sont plus fréquents que dans les tubes/tuyaux droits. Pour cette raison, une analyse de la propagation des ondes guidées plus élaborée dans les coudes est nécessaire, comme le montre le nombre croissant de travaux publiés sur ce sujet. Les défauts typiques qui se produisent dans coudes, tels que la réduction d'épaisseur ou des entailles sont étudiés, et leur détectabilité est évaluée par simulation numérique dans le domaine fréquentiel. La détectabilité des défauts dépend non seulement de la géométrie des défauts comme pour la conduite droite, mais aussi de leur position sur le coude de la conduite. Ces résultats peuvent être mis en œuvre dans la technique d'inspection basée sur des ondes guidées.

1 Introduction

L'utilisation relativement récente d'ondes guidées dans le contrôle non-destructif de tuyauteries industrielles, est de plus en plus répandue. L'avantage d'une inspection de longues portions des tubes à partir d'un point de montage d'un transducteur est considérable en termes de durée et de coûts. L'inconvénient majeur vient de la complexité de cette technique, tenant compte du caractère dispersif des ondes guidées, d'où la complexité des signaux reçus et leur difficile analyse amenant à l'identification et la possible caractérisation des défauts.

Les équations gouvernant la propagation des ondes dans les tubes sont connues depuis le travail de Gaziz [1] qui a étendu au cylindre, l'étude de Pochhammer [2] pour les cylindres pleins. Résoudre ces équations a été l'objectif de nombreux auteurs. Une des méthodes propose la solution numérique des équations analytiques, utilisant une recherche de zéros dans le plan réel ou complexe, e.g. Pavlakovic [3]. Une autre méthode plus générale, appelée Semi-Analytical Finite Elements Method (SAFE) a été utilisée sous deux formes de discrétisation par éléments finis : mailler toute la section perpendiculaire sur l'axe (Gavrić [4], Hayashi [5], Treyssède [6]) ou mailler seulement le rayon du guide cylindrique (Elmaimouni [7], Predoi [8]). Des recherches sur la détection des défauts ont été effectuées par Ditri [9], Cawley et al. [10], Lowe et al. [11], El Bakkali et al. [12], Li et Rose [13], etc.

Dans le présent travail on modélise le tube et coude par de éléments finis tridimensionnels, dans le domaine fréquentiel. L'excitation est simple à réaliser, étant typique pour les transducteurs d'ondes longitudinales. La haute fréquence utilisée, engendre plusieurs modes propagatifs, compliquant la simulation et l'analyse des résultats. La détectabilité est très variable avec la localisation du défaut modélisé par un trou.

2 Ondes guidées dans les tubes

La détection des petits défauts localisés peut être effectuée en utilisant des ondes guidées de courtes longueurs d'ondes, ce qui implique une fréquence élevée. D'autre part, un flux d'énergie élevée est nécessaire pour recevoir un écho détectable. Pour ces raisons, dans ce qui suit, nous nous concentrons sur les ondes guidées incidentes à symétrie axiale longitudinale, produit par un transducteur d'ondes longitudinales, à une fréquence centrale de 1 MHz.

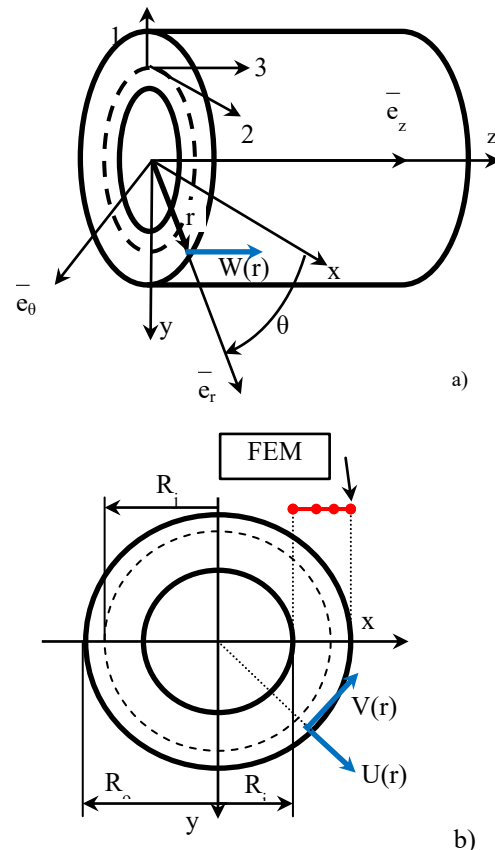


Figure 1 Champ de déplacements (a) et modèle FEM sur la section droite (b)

Le calcul des courbes de dispersion des trois familles de modes guidés dans un tube, se fait en utilisant la méthode SAFE. Le champ des déplacements ainsi que le modèle FEM qui maillera un segment radial entre le rayon intérieur R_i et extérieur R_e sont indiqués sur la Figure 1. Pour les ondes planes harmoniques de nombre d'onde k , fréquence angulaire ω , se propageant dans la direction Oz , on considère :

$$\begin{aligned} u_r(r, \theta, z, t) &= U(r) \cos(m\theta) \exp[i(kz - \omega t)] \\ u_\theta(r, \theta, z, t) &= V(r) \cos(m\theta) \exp[i(kz - \omega t)] \\ u_z(r, \theta, z, t) &= W(r) \cos(m\theta) \exp[i(kz - \omega t)] \end{aligned} \quad (1)$$

2.1 Modes longitudinaux

Les modes L(0,n) ont l'ordre circonférentiel m=0 et $V(r) \equiv 0$. En posant les déplacements sous la forme $u = [U(r) \ W(r)]^T$, les nombres d'onde sont obtenus comme valeurs propres de l'opérateur suivant [8]:

$$\nabla \left(\begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \nabla \begin{Bmatrix} u \\ ku \end{Bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ ku \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ ku \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ ku \end{Bmatrix} + k \begin{bmatrix} d_1 & 0 \\ d_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ ku \end{Bmatrix} - k^2 \begin{bmatrix} e_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ ku \end{Bmatrix} = 0 \tag{2}$$

dont les sous-matrices non-nulles, utilisant les constantes élastiques C_{11}, C_{12}, C_{66} d'un matériau isotrope et la densité ρ , sont :

$$\begin{aligned} c_1 &= r \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{66} \end{bmatrix}; \alpha_1 = \begin{bmatrix} C_{12} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \alpha_2 = ir \begin{bmatrix} 0 & C_{12} \\ C_{66} & 0 \end{bmatrix}; \\ \beta_1 &= \begin{bmatrix} C_{12} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \beta_2 = -ir \begin{bmatrix} 0 & C_{66} \\ C_{12} & 0 \end{bmatrix}; \\ a_1 &= \begin{bmatrix} C_{11}/r - r\rho\omega^2 & 0 \\ 0 & -r\rho\omega^2 \end{bmatrix}; a_4 = r\rho\omega^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ d_1 &= iC_{23} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; d_3 = a_4; e_1 = r \begin{bmatrix} C_{66} & 0 \\ 0 & C_{11} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

On analyse le cas d'un tube en cuivre de paramètres : $R_o=9\text{mm}, R_i=7.8 \text{ mm}, \rho=8400 \text{ kg/m}^3$; vitesse des ondes longitudinales $c_L=4400 \text{ m/s}$ et transversales $c_T=2200 \text{ m/s}$. Les nombres d'onde de premiers cinq modes sont traces sur la Figure .

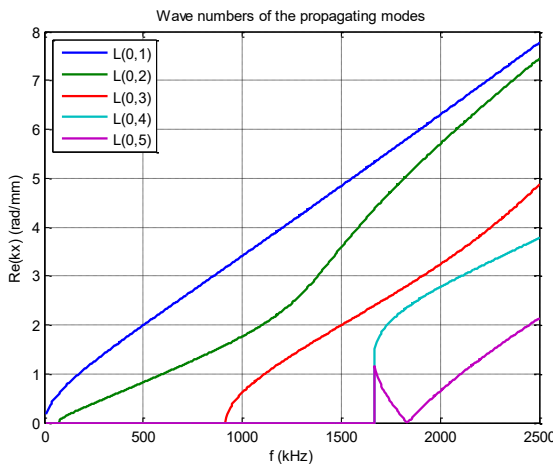


Figure 2 Nombres d'onde des modes L(0,n), n=1..5

2.2 Modes de flexion

Les modes de flexion F(m,n) ont les composantes des déplacements : $u = [U(r) \ V(r) \ W(r)]^T$. On s'intéresse aux modes d'ordre m=1.

Les nombres d'onde réels, ainsi que la partie réelle des nombres d'onde des modes dont la fréquence de coupure est inférieure à 2.5 MHz, sont traces sur la Figure 2. On reconnait les branches complexes par leurs valeurs non-

nulles a fréquence nulle. On identifie des modes de torsion prédominante (notés F(1,2), F(1,3), F(1,5)) qui sont moins explicités dans la littérature.

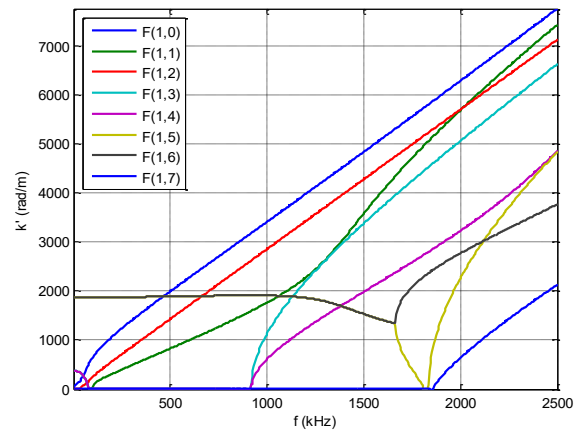


Figure 3 Partie réelle des nombres d'onde ayant la fréquence de coupure dans le domaine de fréquence choisi

3 Modèle FEM tridimensionnel

La détection des très petits défauts par la diffraction des ondes incidentes longitudinales, impose un modèle FEM tridimensionnel. On se limite aux cas de symétrie par rapport à un plan de section, en imposant comme défaut un trou de rayon 1.2mm au milieu du coude de rayon moyen 50 mm (Figure 4).

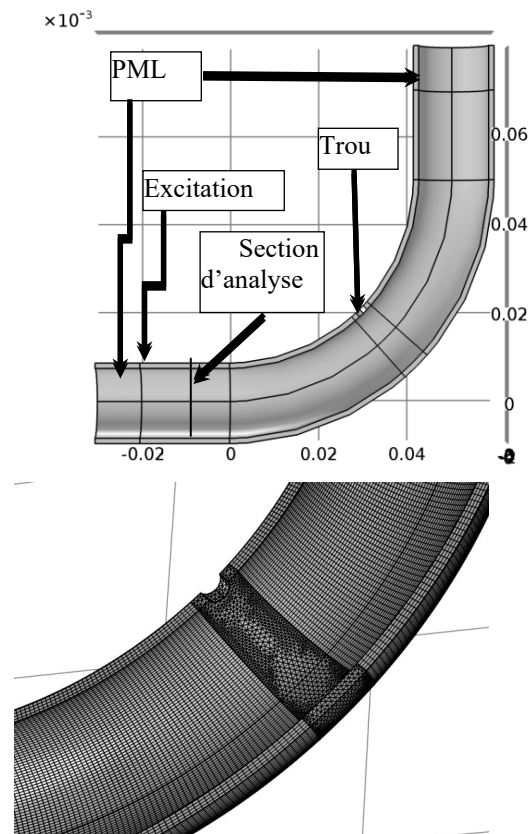


Figure 4 Géométrie du coude (a) et maillage (b)

L'étude est dans le domaine fréquentiel. On a besoin des extrémités (Perfectly Matched Layers – PML) atténuant les ondes donnant des fausses réflexions. L'excitation se fait en imposant des déplacements plans (type piston) dans la section montrée sur la Figure 4a. Quatre éléments divisent l'épaisseur du tube et plus de 10 éléments sont disposés par longueur d'onde du mode incident, ce qui conduit à plus de 100000 éléments, utilisant le logiciel [14]. Un calcul à une seule fréquence peut durer 2 heures sur un PC avec 32GB RAM, car la mémoire nécessaire serait de 95 GB.

Les déplacements et contraintes (partie réelle et imaginaire) sont relevés sur une section plane normale sur l'axe du tube à 10mm de la jonction tube-coude (Figure 4a). On a utilisé pour le calcul des amplitudes modales la relation d'orthogonalité complexe [15] adaptée au cas cylindrique. Comme les résultats n'ont pas été satisfaisants, on a considéré utile de montrer la détectabilité des défauts par comparaison des déplacements radiaux aux cas de référence (sans trou).

4 Analyse des résultats

Les plus explicites résultats sont tracés sur la Figure , sous la forme des modules des déplacements en direction radiale. Le deux cas de trous, intérieur (v. Figure 4b) et extérieur au coude, sont comparés par différence entre ces signaux et la référence (sans trou). Dans tous les figures, le coté intérieur du coude est à gauche.

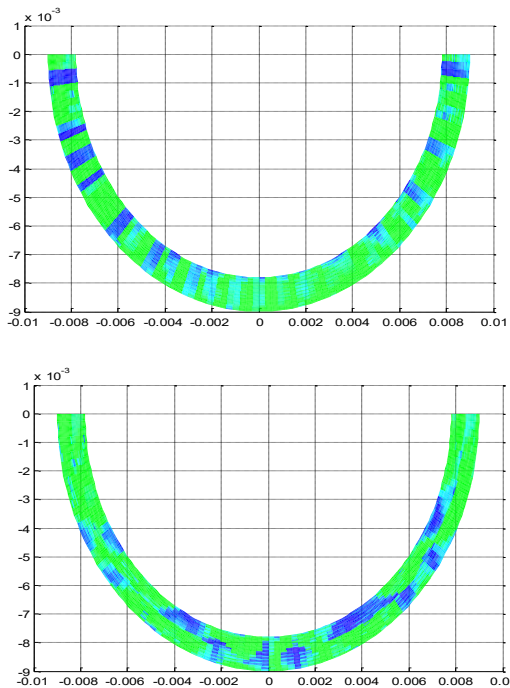


Figure 5 Déplacements en direction radiale (haut) et axiale (bas), cas du trou intérieur

On constate que le trou placée à l'intérieur du coude est difficilement détectable (Figure 5). Le trou à l'extérieur du coude produit des signaux en direction radiale plus importantes (30% plus fortes) et localises comme des échos directs du trou (Figure 6). En plus sur la direction axiale, même si localement il y a des variations importantes, le signal moyen est plus fort (30%), facilitant la détection de la présence du défaut par le même transducteur émetteur.

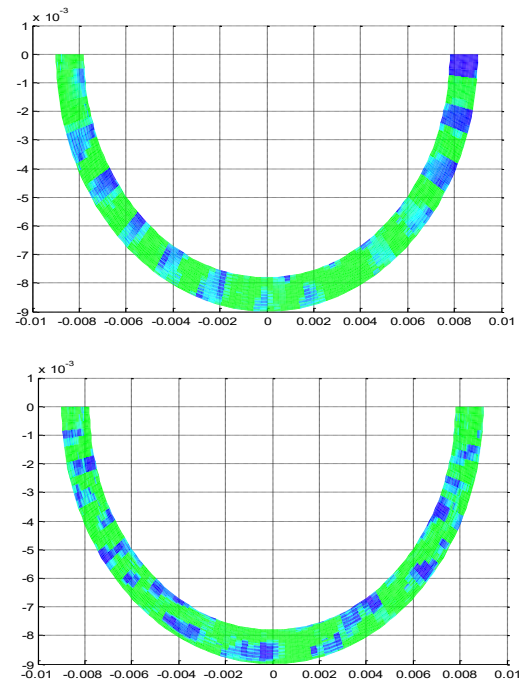


Figure 6 Déplacements en direction radiale (haut) et axiale (bas), cas du trou extérieur

5 Conclusions

La base modale pour la partie cylindrique du tube a été établie utilisant la méthode SAFE. Une étude en domaine fréquentiel, utilisant un modèle FEM tridimensionnel permet de calculer le champ diffracté, engendré par un signal multimodal de type piston à haute fréquence (1 MHz). Pourtant, la décomposition modale des ondes réfléchies n'a pas permis de calculer avec précision les amplitudes modales. La raison principale est la précision insuffisante du calcul des contraintes, dans le logiciel utilisé. On propose alors une comparaison directe des champs des déplacements proche de la jonction au coude. Le même défaut à l'intérieur du coude produit un signal réduit de 30% par rapport à celui du défaut situé à l'extérieur du coude. L'étude est en cours pour améliorer la technique de détection.

Remerciements

Le présent travail est déroulé et financé dans le cadre du projet roumain de recherche UEFISCDI Exploratory Research Project PN-II-ID-PCE-2011-3-0512.

Références

- [1] D. C. Gazis, Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 31, no. 5, pp. 568-573, 1959.
- [2] B. N. Pavlakovic, *Leaky Guided Ultrasonic Waves in NDT*, University of London, London, Ph.D. 1998.
- [3] L. Elmaimouni, J.E. Lefebvre, V. Zhang, and T. Gryba, A polynomial approach to the analysis of guided waves in anisotropic cylinders of infinite length, *Wave Motion*,

vol. 42, pp. 177-189, 2005.

- [4] L. Pochhammer,
Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner
Schwingungen in einem unbegrenzten isotropen
Kreiszyylinder, *J. reine angew. Math.*, vol. 81, pp. 324-
336, 1876.
- [5] C. Chree, The Equations of an Isotropic Elastic Solid in
Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and
Applications, *Trans. Cambridge Philos. Soc. Math.
Phys. Sci.*, vol. 14, p. 250, 1889.
- [6] M. V. Predoi, Guided waves dispersion equations for
orthotropic multilayered pipes solved using standard
finite elements code, *Ultrasonics*, vol. 54, no. 7, pp.
1825-1831, 2014.
- [7] L. Gavrić, Computation of propagative waves in free
rail using a finite element technique, *J. Sound Vib.*, vol.
185, no. 3, pp. 531-543, Aug. 1995.
- [8] T. Hayashi, W.-J. Song, J. L. Rose, Guided wave
dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-
section, a rod and rail example, *Ultrasonics*, vol. 41, no.
3, pp. 175-183, May 2003.