

Détection des dommages dans un rail par propagation d'ondes élastiques

S. TEIDJ^a, A. DRIOUACH^a, A. KHAMLICH^a, E. JACQUELIN^b

a. Laboratory Communication system, Abdelmalek Essaâdi University, Tetouan, Morocco

b. IFSTTAR, LBMC, UMR_T9406, Bron; Université Lyon 1, Villeurbanne, France

c. LGCI, Université Lyon 1, Villeurbanne, France

Résumé:

La détection d'un dommage localisé dans un rail de chemin de fer est considérée à travers une technique basée sur la propagation d'ondes élastiques à hautes fréquences. La modélisation du rail est faite par la méthode des éléments finis spectraux. La procédure de détection a consisté en trois étapes. Partant d'une configuration de défaut donnée, le calcul de la propagation d'une impulsion de type impact excitant la torsion du rail est effectué. La réponse en termes de la vitesse de rotation de la section droite en un point donné du rail se trouvant à une distance donnée du point d'impact est déterminée. Ensuite la transformée en ondelettes utilisant l'ondelette mère chapeau mexicain est appliquée à la différence des signaux associés à l'état de référence et à l'état endommagé au point de mesure choisi. La détectabilité des défauts est discutée dans le diagramme temps-fréquence en fonction des caractéristiques du défaut.

Abstract:

In this work, detection of damage in rails is investigated by using a high frequency elastic wave propagation based technique. Rail modelling was performed by means of the finite element spectral method. The methodology consisted in three steps. Giving some localise damage scenario, the first step was performing calculation of wave propagation caused by an impact pulse chosen to excite the rail torsion. The response in terms of transverse section rotation rate was then obtained for a given rail location. The second step consisted of operating the Mexican hat wavelet based transform to obtain the spectrum relative to the difference between the signals associated to the undamaged and damaged states. Detectability of defects was after that discussed in the time-frequency diagram as function of the defect characteristics.

Mots clefs: Détection, dommage, rail, ondes élastiques, ondelettes, éléments finis spectraux

1 Introduction

Avec l'augmentation du trafic et l'accroissement de la vitesse des trains, la maintenance des rails est devenue une préoccupation majeure dans le domaine du transport ferroviaire. L'objectif étant de prévenir des ruptures catastrophiques pouvant mettre en danger des vies humaines et d'engendrer de grosses pertes économiques [1]. Les techniques classiques d'inspection à base d'ultrasons sont très utilisées actuellement comme moyen de suivi non destructif de l'état de santé des rails. Ces dernières admettent cependant des inconvénients. Elles ne permettent pas par exemple de détecter des fissures profondes, car en présence des petites fissures superficielles les ondes sont empêchées de pénétrer dans le rail du fait de l'effet d'ombre qui s'y produit suite à des réflexions prématurées [2,3,4]. Or ce sont les fissures profondes qui créent le plus de danger et qui menacent sérieusement le déraillement des trains. L'autre problème attaché aux techniques ultrasonores est l'imprécision qui les caractérise systématiquement, car les fausses détections se produisent de manière fréquente. Les statistiques ont en effet révélé que 75% des prédictions étaient fausses.

Des nouvelles méthodes d'inspection ont vu le jour récemment. Elles utilisent le principe de propagation des ondes élastiques dans la structure du rail [5]. La détection des défauts s'appuie ainsi le phénomène de propagation, en analysant les modifications causées par le dommage sur la réponse transitoire du rail lorsqu'il est sollicité par des impulsions d'impact spécifiques.

Dans ce travail, une simulation dynamique du rail est effectuée. Elle sert à obtenir un enregistrement

correspondant à l'état vierge de la structure supposée non endommagée. Cet enregistrement servant de référence est ensuite comparé avec les réponses mesurées durant l'inspection.

Vu, la nécessité d'utiliser des hautes fréquences pour pouvoir détecter des défauts de petite taille, la modélisation du rail est effectuée par la méthode spectrale des éléments finis. Pour détecter le dommage, la transformée en ondelettes est opérée sur le signal différence entre les deux états intact et endommagé. L'ondelette mère dite chapeau mexicain est utilisée pour établir le diagramme temps-fréquence [6,7,8]. La détectabilité du défaut est discutée au moyen de ce diagramme en fonction du niveau du défaut présent dans le rail.

2 Modèle de propagation des ondes élastiques dans un rail

Un modèle à base d'éléments finis spectraux a été construit pour simuler la propagation des ondes élastiques dans un rail standard. La figure 1 montre la géométrie du rail modélisé en présence d'un défaut transversal.

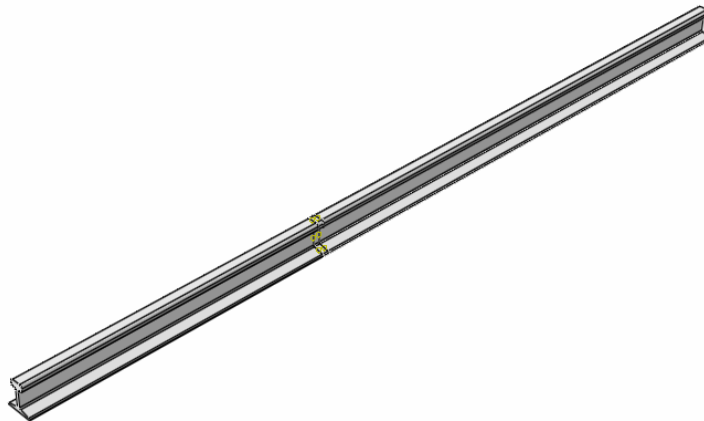


FIG. 1 – Schéma d'un rail standard

Le rail est supposé formé d'un matériau élastique linéaire homogène et isotrope. L'excitation d'impact subi par le rail est choisie de telle sorte qu'elle puisse générer un système d'ondes de torsion se propageant suivant sa direction longitudinale [9]. Un couple impulsion $C(t)$ apparaît ainsi au droit de la section impactée, où t est le temps. Un capteur utilisant le principe de vibrométrie laser peut alors mesurer la rotation $\theta(t)$ subie par une section droite du rail se trouvant à une distance donnée du point d'impact. Puisque le capteur n'est sensible qu'à la seule rotation de la section, seules les ondes de torsion seront enregistrées.

L'équation de propagation des ondes de torsion est

$$GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \eta J \frac{\partial \theta}{\partial t} = \rho J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (1)$$

où G est le module de Coulomb, J le moment d'inertie polaire, ρ la masse volumique, η l'amortissement et x la coordonnée axiale du rail.

Opérant une discrétisation de $\theta(x,t)$ défini par le pas temporel Δt , de sorte que N instants régulièrement espacés discrétisent l'intervalle de temps $[0, t_f]$, le développement sur une base d'ondelettes de Daubechies permet d'écrire [10]

$$\left\{ \frac{d^2 \theta_j}{dx^2} \right\} = \left[\frac{\eta}{G} \Gamma^1 + \frac{\rho}{G} \Gamma^2 \right] \{ \theta_j \} \quad (2)$$

où les matrices Γ^1 et Γ^2 ne dépendent que de l'ordre de l'ondelette de Daubechies.

Le découplage spectral de l'équation (2) permet d'écrire

$$\frac{d^2 \hat{\theta}_j}{dx^2} = - \left[\frac{\eta}{G} i \gamma_j + \frac{\rho}{G} \gamma_j^2 \right] \hat{\theta}_j \quad (3)$$

où $-\gamma_j^2$ est la jème valeur propre de Γ^2 , de sorte que $\Gamma^2 = \Phi \Pi \Phi^{-1}$ avec Φ la matrice des vecteurs propres de Γ^2 et Π la matrice des valeurs propres.

En écrivant

$$\hat{\theta}(x) = C_1 e^{-ikx} + C_2 e^{-ik(L-x)} \quad (4)$$

avec $k = \sqrt{\rho \gamma^2 / G + i \eta \gamma / G}$ qui représente le nombre d'onde, les conditions aux limites permettent d'écrire pour un élément de longueur L

$$\{\hat{\theta}^e\} = \begin{bmatrix} 1 & e^{-ikL} \\ e^{-ikL} & 1 \end{bmatrix} \{a\} \quad (5)$$

Le couple étant relié à la rotation par

$$\frac{d\hat{\theta}_j}{dx} = \hat{C}_j = \frac{1}{GJ} (\Phi^{-1} C)_j \quad (6)$$

on obtient au niveau de l'élément une relation duale à (5) qui s'écrit

$$\{\hat{F}^e\} = ik \begin{bmatrix} -1 & e^{-ikL} \\ -e^{-ikL} & 1 \end{bmatrix} \{a\} \quad (7)$$

L'élimination de $\{a\}$ entre les deux équations (5) et (7) permet de faire apparaître la matrice de raideur dynamique sous la forme

$$\{\hat{C}^e\} = S^e \{\hat{\theta}^e\} = \begin{bmatrix} \frac{k \cos(kL)}{\sin(kL)} & \frac{k}{\sin(kL)} \\ -\frac{k}{\sin(kL)} & \frac{k \cos(kL)}{\sin(kL)} \end{bmatrix} \{\hat{\theta}^e\} \quad (8)$$

Le schéma classique de la méthode des éléments finis spectraux suit la procédure suivante: les déplacements peuvent être calculés en exprimant les conditions aux limites et les couples imposés, ensuite le vecteur $\{a\}$ est calculé à partir de (5), puis les rotations $\hat{\theta}$ à partir de (4).

Dans le cas d'un défaut localisé, il est possible d'introduire trois éléments, figure 2, de sorte que

$$\begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1^1 \\ \hat{\theta}_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{C}_1^1 \\ \hat{C}_2^1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} S_{11}^d & S_{12}^d \\ S_{21}^d & S_{22}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1^d \\ \hat{\theta}_2^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{C}_1^d \\ \hat{C}_2^d \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} S_{11}^2 & S_{12}^2 \\ S_{21}^2 & S_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1^2 \\ \hat{\theta}_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{C}_1^2 \\ \hat{C}_2^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

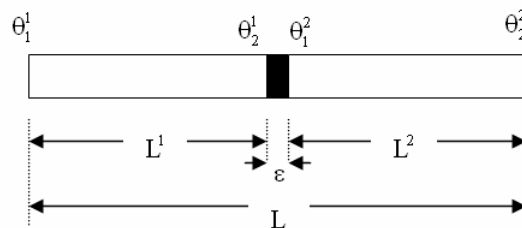


FIG. 2 – Élément spectral condensé

Par assemblage et condensation des degrés de libertés internes, il vient

$$\begin{bmatrix} S_{11}^1 + \frac{(S_{12}^1)^2(S_{11}^2 + S_{22}^d)}{\Delta} & \frac{S_{12}^1 S_{12}^d S_{12}^2}{\Delta} \\ -\frac{S_{12}^1 S_{12}^d S_{12}^2}{\Delta} & S_{22}^2 + \frac{(S_{12}^2)^2(S_{22}^1 + S_{11}^d)}{\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{C}_1 \\ \hat{C}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

avec

$$\begin{aligned} \Delta &= (S_{12}^d)^2 + (S_{22}^1 + S_{11}^d)(S_{11}^2 + S_{22}^d) \\ \hat{C}_1 &= \hat{C}_1^1 - \frac{S_{12}^1(S_{11}^2 + S_{22}^d)}{\Delta} \hat{C}_2^1 - \frac{S_{12}^1 S_{12}^d}{\Delta} \hat{C}_1^2 \\ \hat{C}_2 &= \hat{C}_2^2 + \frac{S_{12}^2(S_{22}^1 + S_{11}^d)}{\Delta} \hat{C}_1^1 + \frac{S_{12}^2 S_{12}^d}{\Delta} \hat{C}_2^1 \end{aligned} \quad (11)$$

La rotation de la section de mesure $\hat{\theta}_2$ s'exprime finalement en fonction du couple d'impact \hat{C}_1 sous la forme

$$\hat{\theta}_2 = \frac{S_{12}^1 S_{12}^d S_{12}^2 \Delta}{(S_{12}^1 S_{12}^d S_{12}^2)^2 + [(S_{12}^1)^2(S_{11}^2 + S_{22}^d) + S_{11}^1 \Delta][(S_{12}^2)^2(S_{22}^1 + S_{11}^d) + S_{22}^2 \Delta]} \hat{C}_1 \quad (12)$$

3 Résultats et discussion

Nous considérons un rail standard admettant le profil montré sur la figure 3. Le rail a une masse linéique théorique $m_l = 18.3kg.m^{-1}$, une section transversale $A = 23.14 \times 10^{-4} m^4$. La longueur modélisée est $L = 3.3m$. Le couple d'excitation appliqué sur le rail admet le profil et le spectre montrés sur la figure 4.

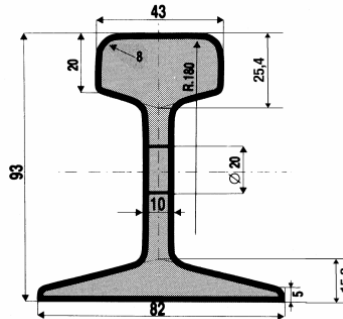


FIG. 3 – Schéma d'une coupe transversale droite du rail ([http:// www.patry.fr](http://www.patry.fr))

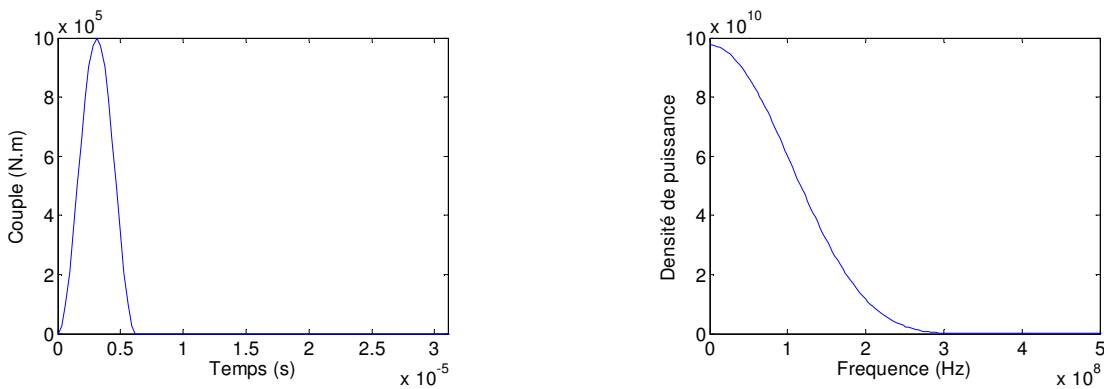


FIG. 4 – Signal couple d'excitation; (a) profil temporel, (b) densité spectrale de puissance

Le rail intact a été modélisé, puis le rail muni d'un défaut assimilé à une perte de rigidité affectant une tranche d'épaisseur $\Delta x = 4\text{mm}$. Deux niveaux de défaut ont été considérés: perte de rigidité de 5% et de 25%. Le défaut a été localisé à 0.4m de l'extrémité où le couple est appliqué. La simulation des deux défauts a permis de calculer la vitesse de rotation à la distance 0.6m de la section où le couple est imposé. Les résultats sous forme de profils temporels sont montrés sur la figure 5.

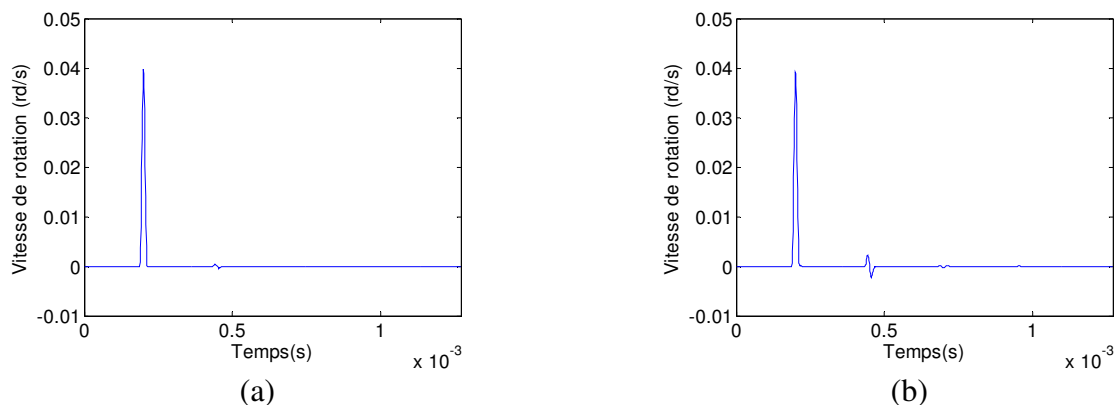


FIG. 5 – Profils temporels de la vitesse de rotation calculée pour les deux niveaux de défaut ; (a) 5% et (b) 25%

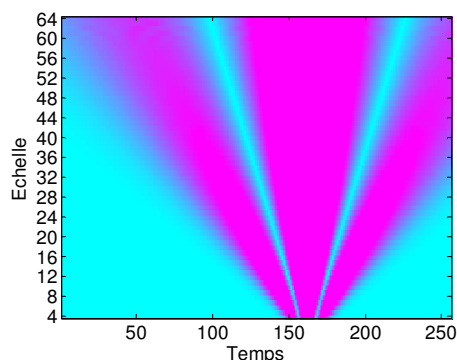


FIG. 6 – Coefficients de la transformée en ondelette associée au signal transitoire du rail intact

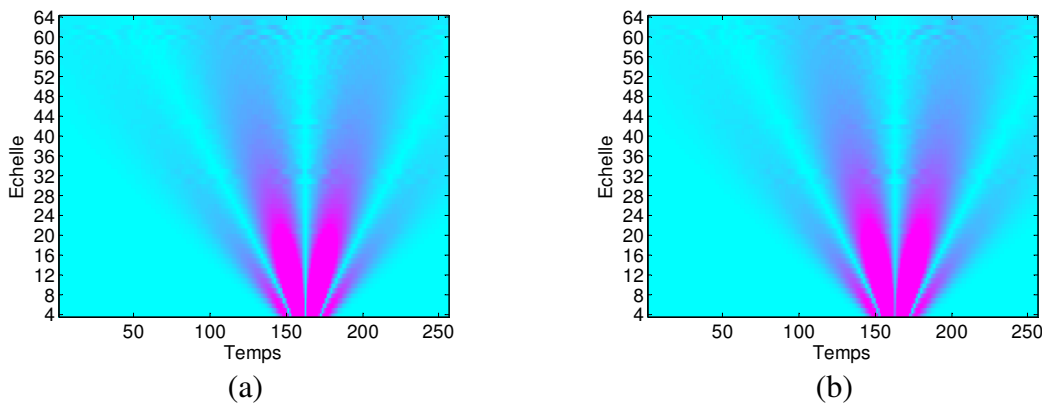


FIG. 7 – Coefficients de la transformée en ondelette associée à la différence entre les signaux transitoires du rail intact et le rail présentant un dommage; (a) dommage local représentant 5% du module d'Young, (b) dommage local à 25% du module d'Young

Le diagramme temps-fréquence du signal vitesse de rotation au point de mesure est représenté sur la figure 6. La différence des signaux associés respectivement au rail intact et au rail endommagé a été calculée pour les deux niveaux de défaut. La figure 7 présente dans le diagramme temps-fréquence les résultats obtenus. Elle montre que la détection du défaut et sa localisation sont tout à fait possibles pour les deux niveaux considérés: 5% et 25%.

References

- [1] Cannon D.F., Edel K.O., Grassie S.L., Sawley K., Rail defects: an overview, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 26: 865-887, 2003.
- [2] Zerbst U., Lundén R., Edel K.O., Smith R.A., Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review, *Engineering Fracture Mechanics* 76:2563-2601, 2009.
- [3] Clark R., Rail flaw detection: overview and need for future developments, *NDT&E International* 37: 111-118, 2004.
- [4] Marais J.J., Mistry K.C., Rail integrity management by means of ultrasonic testing, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 26: 931-938, 2003.
- [5] Rose J.L., Avioli M.J., Mudge P., Sanderson R., Guided wave inspection potential of defects in rail, *NDT&E International* 37: 153-161, 2004.
- [6] Kareem A., Kijewski T., Time-frequency analysis of wind effects on structures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90: 1435-1452, 2002.
- [7] Hong J.C., Kim Y.Y., Lee H.C., Lee Y.W., Damage detection using the Lipschitz exponent estimated by the wavelet transform: applications to vibration modes of a beam, *International Journal of Solids and Structures* 39: 1803–1816, 2002.
- [8] Liu Y., Li Z., Zhang W., Crack detection of fibre reinforced composite beams based on continuous wavelet transform, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 25:1, 25-44, 2010.
- [9] Yamawaki H., Saito T., Computer Simulation Of Laser-Generated Elastic Waves In Solid, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 7:1-6, 165-177, 1992.
- [10] Mitra M., Gopalakrishnan S., Bhat M.S., A new super convergent thin walled composite beam element for analysis of box beam structures, *International Journal of Solids and Structures* 41: 1491–1518, 2004.