

## Analyse vibratoire numérique et expérimentale d'un système couplé « voie ferrée–sol »

BENOÎT PICOUX<sup>1,a</sup>, JEAN-PIERRE REGOIN<sup>2</sup> ET DONATIEN LE HOUÉDEC<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire 3MSGC, IUT Département Génie Civil, Bd. J. Derche, 19300 Égletons, France

<sup>2</sup> GeM UMR CNRS 6183, École Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes Cedex 3, France

Reçu le 16 novembre 2004 ; accepté le 21 mars 2006

**Résumé** – Les conséquences de la circulation ferroviaire, en termes de nuisances environnementales (vibrations, bruits, pollutions diverses, ...) sont d'autant plus importantes que les vitesses des trains sont élevées. En ce qui concerne les vibrations, l'effet de cette vitesse est directement lié à son positionnement relatif vis-à-vis de celle des ondes se propageant dans le sol (en particulier, celle des ondes superficielles de Rayleigh). Pour des sols assez mous (argile, tourbe, ...), une vitesse d'onde de Rayleigh bien inférieure à  $100 \text{ m.s}^{-1}$  est tout-à-fait possible, et dans ce cas, l'atteinte d'un régime super-Rayleigh est bien envisageable pour des trains circulant à grande vitesse. Cette situation se traduit par des déplacements importants au niveau du rail (supérieurs éventuellement à 12 mm), ne jouant pas sur le confort des passagers mais préoccupant pour la durée de vie de la structure. Cet article présente la mise en œuvre numérique d'un modèle semi-analytique de propagation d'ondes soumis à un ensemble de charges mobiles. Des séries d'essais ont pu également être opérées sur deux sites spécifiques (sol tourbeux) avec des paramètres variables (type et composition des trains, vitesse du train, poids du convoi). La comparaison qui a pu être réalisée entre les déplacements et les vitesses obtenus, d'une part, grâce aux simulations numériques et, d'autre part, par les mesures expérimentales, doit être considérée comme relativement satisfaisante compte tenu des différentes incertitudes présentes dans les deux démarches. Cet accord est suffisamment significatif pour estimer que le modèle qui est proposé permet d'obtenir des informations crédibles sur le comportement de la voie et du sol environnant.

**Mots clés** : Trafic ferroviaire / modèle voie ferrée-sol / vibrations / propagation d'ondes / mesures expérimentales

**Abstract** – Numerical and experimental vibratory analysis of a coupled device “railway-soil”. Results of railway traffic, concerning with the environmental disturbances (vibrations, noises, various pollutions, ...) are all the more important as the train velocities are higher. For vibrations, the effect of this velocity is directly linked to its relative value against that of waves propagating in the soil (particularly for Rayleigh surface waves). For soft soils (clay, peat, ...), a Rayleigh wave velocity very lower than  $100 \text{ m.s}^{-1}$  is quite possible, and in this case, the reach of a super-Rayleigh regime can be envisaged for trains moving at high velocity. This situation includes important displacements in the rail (sometimes higher than 12 mm), not acting on the passengers comfort but troubling for the life duration of structure. This paper describes the numerical approach with a semi-analytical model for the waves propagation in the case of moving loadings. Also, sets of tests were able to be performed on two specific sites (peaty soil) with variable parameters (type and composition of trains, train velocity, traffic weight). The comparison achieved between displacements and velocities, obtained on the one hand through the numerical simulations and on the other hand by means of test measurements, must pass for a relatively satisfactory result, taking into account the numerous uncertainties in the two approaches. This agreement is enough correct to consider that the proposed model allows to obtain accurate informations for the railway behaviour and that of the surrounding soil.

**Key words**: Railway traffic / railway-soil model / vibrations / waves propagation / experimental measurements

<sup>a</sup> Auteur correspondant :  
benoit.picoux@tulle.unilim.fr

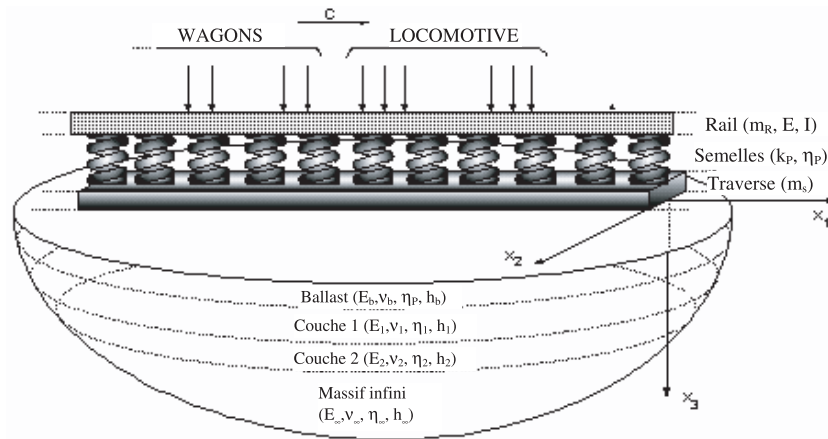


Fig. 1. Description du modèle.

## 1 Introduction

Depuis quelques années, l'effet du bruit et des vibrations sur l'environnement fait l'objet d'une attention particulière en regard des dommages occasionnés aux habitations voisines de routes et voies ferrées et au coût social de ces nuisances. L'augmentation des trafics, de leur vitesse et de leur poids a pour conséquence d'amplifier ce problème. Certains sites ferroviaires [1] font même l'objet de vibrations très importantes pouvant mettre en péril la fiabilité des éléments de la voie.

Ces travaux de recherche ont pour objectif une meilleure compréhension du problème en vue de prédire puis réduire le niveau vibratoire engendré dans le système couplé « voie ferrée–sol ». La première partie de cet article est consacrée à la mise en équation du système utilisant une méthode semi-analytique avec résolution dans le domaine des nombres d'onde. Une campagne de mesures sur un site particulièrement adapté à cette étude est présentée en deuxième partie. Enfin, des résultats de comparaison entre les deux approches sont établis.

## 2 Modélisation numérique du problème

Le sol étudié par la suite (Fig. 1), supposé homogène et isotrope par couches, est composé d'une couche de ballast et d'une épaisse couche de tourbe (molle) reposant sur une couche de transition sous laquelle s'étend un massif crayeux (rigide). Les paramètres intrinsèques [2] sont le module d'Young  $E$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , la masse volumique  $\rho$ , le facteur d'amortissement hystérétique  $\eta$  et l'épaisseur des couches du sol  $h$ .

La voie ferrée [3] est composée d'un rail reposant sur des traverses en bois jointes par l'intermédiaire de semelles. La sollicitation du train est modélisée à l'identique d'un convoi réel avec l'hypothèse simplifiée d'une excitation harmonique mono-fréquentielle dans un premier temps puis multi-fréquentielle. La force verticale exercée sur le rail par le train en déplacement est une fonction complexe dépendante du temps. Son spectre est très large mais une partie significative de l'énergie est concentrée

entre 0 et 40 Hz suivant deux composantes principales [4] : une composante « quasi-statique » ( $\sim 5$  Hz) provenant du poids au niveau des axes du train et une composante dynamique ( $\sim 30$  Hz) due aux irrégularités de forme de la roue et du rail. Dans la réalité, de nombreuses autres causes sont à l'origine de la génération des vibrations (imperfections de géométrie, hétérogénéité des matériaux composant la voie, ...). Pour une irrégularité de longueur d'ondes donnée  $\lambda_0$ , le train transmet à la voie des vibrations à la fréquence  $2\pi c/\lambda_0$  où  $c$  est la vitesse du train. Chaque roue exerce une force verticale  $P_0 e^{i\Omega_0 t}$ . Le rail est ainsi contraint à sa surface par une série de forces harmoniques et mobiles dépendant du poids sur chaque axe, de la fréquence d'excitation et des paramètres de longueur entre axes et bogies.

La mise en équations est effectuée dans le domaine des nombres d'ondes par transformée de Fourier [5]. Une transformée inverse numérique est appliquée à l'issue de la résolution de l'équation matricielle du système complet charge–voie–sol.

En l'absence de force volumique, la combinaison de l'équation de mouvement et de la loi de comportement donne l'équation de Navier suivante :

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot U) + \mu\nabla^2 U = \rho\ddot{U} \quad (1)$$

où  $\lambda$  et  $\mu$  sont les coefficients de Lamé,  $U$  est le vecteur déplacements lié aux potentiels de Helmholtz  $\psi$  et  $\phi$  qui s'écrivent :

$$\begin{cases} \phi = Ae^{\alpha_P(x_3-h)} + Ce^{-\alpha_P x_3} \\ \psi = Be^{\alpha_S(x_3-h)} + De^{-\alpha_S x_3} \end{cases} \quad (2)$$

où  $\alpha_P$  et  $\alpha_S$  sont fonction des vitesses des ondes de compression  $P$  et de cisaillement  $S$  ainsi que des nombres d'onde  $\beta$  et  $\gamma$ , de la vitesse de la charge et de sa fréquence d'excitation.

L'écriture de la matrice rigidité pour un sol stratifié est ainsi réalisée en tenant compte d'un recalage d'argument «  $(x_3 - h)$  » dans les fonctions de Helmholtz  $\psi$  et  $\phi$  permettant ainsi une approche numérique identique plus rapide.

On procède d'abord à un changement de fonction, pour une solution en régime permanent, et de variables, pour un repère lié à la source en mouvement ( $x = x_1 - ct$ ,  $y = x_2$ ,  $z = x_3$ ).

L'utilisation d'une double transformée de Fourier spatiale :

$$\bar{x}(\beta, \gamma) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{x}(x, y) e^{-i(\beta x + \gamma y)} dx dy \quad (3)$$

sur l'équation matricielle écrite à l'interface de chaque couche du sol permet d'obtenir le système liant le vecteur des déplacements  $\{U\}$  au vecteur des forces par unité de longueur  $\{\Sigma\}$  tel que :

$$[S] \times [Q]^{-1} \{\bar{U}^*\} = [R] \{\bar{U}^*\} = \{\bar{\Sigma}^*\} \quad (4)$$

L'inversion de la matrice déplacements  $[Q]$  et sa multiplication par la matrice contrainte  $[S]$  donne la matrice raideur  $[R]$ . Dans cette matrice sont incluses les contributions du ballast et des  $n$  couches du massif. Les contributions du rail, des semelles et des traverses sont incluses dans le vecteur des contraintes en écrivant le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} (EI\beta^4 - m_R\Omega_0^2 + k_P) \bar{w}_R^*(\beta) - k_P \bar{w}_S^*(\beta) = \\ \bar{\sigma}_{LOC}^*(\beta) + \bar{\sigma}_{WAG}^*(\beta) - k_P \bar{w}_R^*(\beta) \\ + (k_P - m_S\Omega_0^2) \bar{w}_S^*(\beta) = -\bar{F}_S^*(\beta) \end{cases} \quad (5)$$

où  $EI$  représente la raideur du rail,  $m_R$  est sa masse par unité de longueur,  $k_P$  est la raideur par unité de longueur des semelles et  $m_S$  la masse par unité de longueur des traverses. La barre supérieure indique les variables dans le domaine de Fourier et l'astérisque le changement de fonction.

$\bar{\sigma}_{LOC}^*(\beta)$  et  $\bar{\sigma}_{WAG}^*(\beta)$  sont les contraintes induites respectivement par la locomotive et les wagons composant le train.  $\bar{F}_S^*(\beta)$  est la force d'interaction entre les traverses et le ballast. Les déplacements transformés sont calculés analytiquement et les déplacements réels sont déduits par une double transformée de Fourier inverse numérique.

Malgré des données géomécaniques incertaines, le modèle a permis d'expliquer sur un des sites l'influence effective du raidissement de la voie et de l'espacement entre traverses, sur la réduction des déplacements au niveau de la voie. Cette validation autorise toutes les études paramétriques possibles (avec ou sans prise en compte de la voie, caractérisation de tous les déplacements verticaux et horizontaux dans le domaine des nombres d'ondes et dans le domaine réel, chargement éventuel à partir de la modélisation d'un seul train ou d'un convoi). La présence de cônes de Mach aux abords de la voie pour des vitesses super-Rayleigh a pu être retrouvée et l'effet d'une légère courbe sur les déplacements en surface du sol a été également étudié [6].

Au final, ce modèle permet d'évaluer les déplacements verticaux et latéraux des éléments de la voie et du sol en fonction de la vitesse, du poids et de la composition des trains et de réaliser une analyse paramétrique de ces composants.

### 3 Mise en œuvre expérimentale

#### 3.1 Présentation des mesures

La chaîne de mesures (Fig. 2) est composée des éléments suivants :

- Voie Numérique : Caméra vidéo-numérique CCD (MotionVision CA-D6) de résolution spatiale  $528 \times 512$  pixels et munie d'une carte d'acquisition associée à une unité software (SYSMAT Industries VNR250). Avec ce procédé, nous pouvons évaluer les déplacements verticaux et longitudinaux du rail ainsi que les déformations. La fréquence d'acquisition est égale à 250 images par seconde.

- Voie ① : Accéléromètre B&K type 4371 aimanté sur le patin du rail pour des mesures verticales et sur le flanc du rail pour des mesures latérales. Il est soumis à de très fortes accélérations ainsi qu'à un bruit haute fréquence important propagé et rayonné par le rail.

- Voie ② : Vélocimètre Laser RMP-Polytec type OFV 2200 (principe de mesures utilisant l'effet Doppler) visant une cellule de réflexion collée sur le flanc du rail pour des mesures de vitesses latérales. L'avantage de cette mesure réside principalement dans l'absence de contact entre le transducteur et le rail.

- Voie ③ : Accéléromètre ICP type 393A03 collé sur la surface d'une traverse pour des mesures verticales ou sur son flanc pour des mesures latérales. Cet accéléromètre subit aussi de fortes accélérations.

- Voie ④ : Accéléromètre ICP type 393A03 monté sur un pieu enfoncé dans le ballast pour des mesures d'accélérations verticales. Du fait du principe de montage, cet accéléromètre bénéficie d'un mauvais couplage entre les grains du ballast et le support.

- Voies ⑤ à ⑧ : Accéléromètre ICP type 393A03 fixé sur un support parallélépipédique en acier et posé à la surface du sol en différents points perpendiculaires et parallèles à la voie. La voie ⑤ est aussi utilisée pour évaluer les déplacements au pied de la caméra vidéo-numérique en vue d'une éventuelle correction.

- Voie Trigger : cellule de détection de signaux infrarouges. Cette technique permet de déclencher automatiquement l'enregistrement de toutes les voies dès la coupure du faisceau lumineux par le passage de la première roue du convoi. Elle permet aussi de calculer la vitesse des trains avec une bonne précision (moins de  $3 \text{ km.h}^{-1}$ ).

#### 3.2 Principe d'analyse des données

La figure 3 décrit l'image numérique enregistrée par la caméra. Quatre marques ont été préalablement peintes sur le rail. L'analyse de ces images est réalisée en temps différé grâce à un programme qui calcule automatiquement les déplacements pour chaque image entre le barycentre des marques et leurs positions. La localisation du centre est faite par le calcul du barycentre pondéré par les intensités lumineuses. La limite inférieure de l'intensité lumineuse doit être choisie de manière à extraire correctement la marque du fond noir (rail). La précision

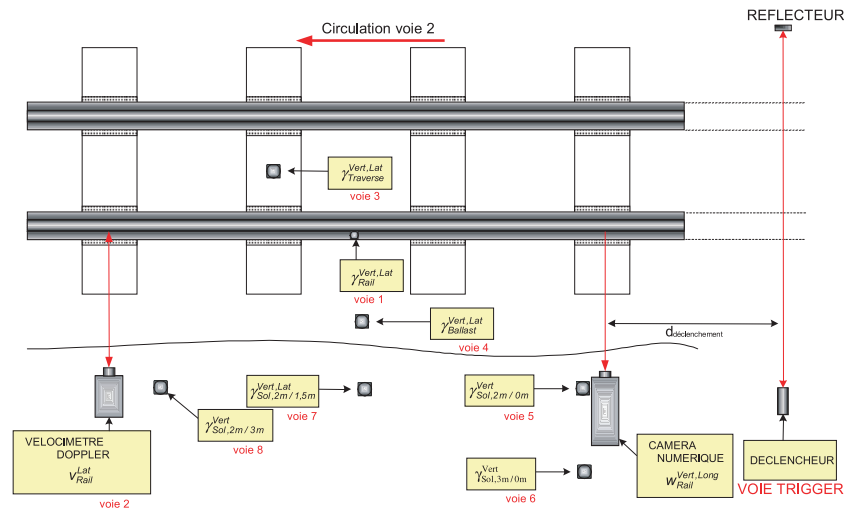


Fig. 2. Chaîne de mesures.

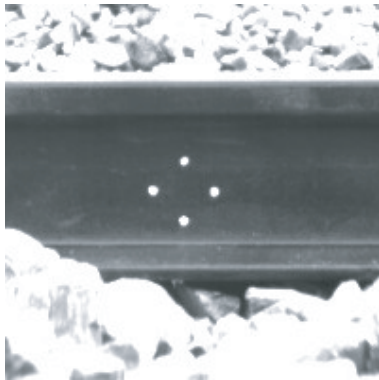


Fig. 3. Procédé d'analyse vidéo pour l'évaluation des déplacements verticaux du rail.

de la mesure est fonction du diamètre de la marque. Finalement, les déplacements locaux du rail dans le plan sont facilement déduits des coordonnées des marques dans ce même plan.

Les déplacements de chaque élément de la voie et de la surface du sol sont calculés avec une précision raisonnable à partir des signaux d'accélération mesurés par les accéléromètres (ICP et B&K). Une attention particulière doit être cependant portée lors de la procédure de traitements des données, sur les transducteurs utilisés pour enregistrer les accélérations (déphasages issus des conditionneurs, couplages, ...) et sur les paramètres d'enregistrement tels que la fréquence d'échantillonnage.

Grâce à l'enregistrement asynchrone entre les voies analogique et numérique, une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz est utilisée (contre 250 Hz pour la caméra). Des travaux [7] ont en effet montré qu'une fréquence d'échantillonnage supérieure à 400 Hz devait être utilisée lors de l'enregistrement de mesures des accélérations en régime dynamique pour avoir une exactitude raisonnable lors du calcul des déplacements. Ainsi, les signaux d'accélération mesurés sont intégrés pour obtenir

les vitesses et déplacements en utilisant deux intégrations numériques.

Un léger décalage continu est souvent remarqué dans les données. Ce décalage provient d'un problème de conditionnement du signal. Il cause une tendance linéaire dans les résultats de vitesses et de déplacements ne correspondant pas à la réalité physique du phénomène. Par conséquent, un filtre digital est appliqué pour extraire cette composante. Pour toutes les mesures d'accélération, cette tendance est extraite en utilisant avant chaque intégration un filtre passe-bas (fréquence de coupure 4 Hz) de type *Butterworth* d'ordre 5.

### 3.3 Quelques résultats

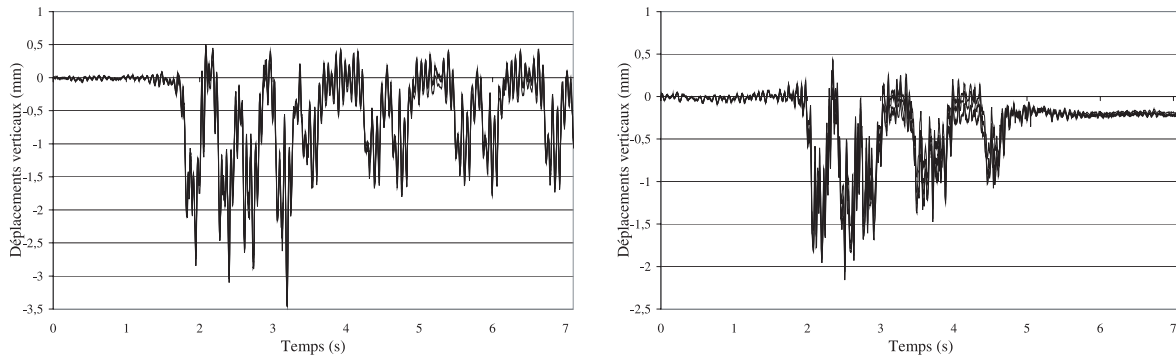
Dans la suite, nous présentons uniquement les résultats mesurés par accéléromètre à 2 m de la voie et par vidéo numérique sur le rail. La figure 4 donne avec exactitude les déformées absolues du rail lors du passage de trains Corail et Autorail respectivement.

Chaque élément constituant le convoi peut être discerné et le bruit est relativement faible. À ces faibles vitesses, la déformation du rail et en conséquence du sol est principalement quasi-statique. L'amplitude des déplacements maximum relevés est de l'ordre de 4 mm pour des charges avoisinant 20 tonnes par essieu.

## 4 Comparaison des deux approches

### 4.1 Caractérisation des paramètres intrinsèques

En vue de procéder aux simulations numériques avec les données réelles du sol à la date des mesures, les essais sismiques et les carottages ont été réalisés simultanément aux mesures vibratoires. Le tableau 1 donne les paramètres classiques pour les éléments de la voie (mesurés par la SNCF ou fournis par les constructeurs de



**Fig. 4.** Mesures de déplacement par Vidéo Numérique Rapide (à gauche : train « Corail » à  $135 \text{ km.h}^{-1}$  ; à droite : train « Autorail » à  $80 \text{ km.h}^{-1}$ ).

**Tableau 1.** Données numériques pour le système voie.

Élément	Caractéristiques mécaniques
Rails (2)	$E_R = 2,11 \times 10^{11} \text{ N.m}^{-2}$ ; $I = 3055 \text{ cm}^4$ ; $m_R = 60,34 \text{ kg.m}^{-1}$
Semelles	$\eta_P = 0,2$ ; $k_P = 60 \times 10^6 \text{ N.m}^{-2}$
Traverses	Bois (monobloc) – $m_S = 191 (+23) \text{ kg.m}^{-1}$ Béton (bi-blocs) – $m_S = 333 (+8) \text{ kg.m}^{-1}$

**Tableau 2.** Données numériques pour le système sol.

Couche	Caractéristiques mécaniques	$c_p$	$c_s$
Ballast	$E = 300 \text{ MPa}$ ; $\nu = 0,3$ ; $\rho = 1800 \text{ kg.m}^{-3}$ ; $\eta = 0,1$ ; $h = 0,8 \text{ m}$	431	264
Couche « tourbe »	$E = 68 \text{ MPa}$ ; $\nu = 0,43$ ; $\rho = 1600 \text{ kg.m}^{-3}$ ; $\eta = 0,05$ ; $h = 3 \text{ m}$	335	122
Couche transition	$E = 959 \text{ MPa}$ ; $\nu = 0,37$ ; $\rho = 1850 \text{ kg.m}^{-3}$ ; $\eta = 0,08$ ; $h = 4 \text{ m}$	959	475
Substrat crayeux	$E = 3989 \text{ MPa}$ ; $\nu = 0,35$ ; $\rho = 2000 \text{ kg.m}^{-3}$ ; $\eta = 0,1$ ; $h = \infty$	1850	920

matériels ferroviaires). Le tableau 2 présente la composition simplifiée du sol sur le site étudié. Les vitesses des ondes de compression et de cisaillement mesurées à l'aide d'une base sismique composée de 24 capteurs espacés de 2 m permettent d'évaluer l'épaisseur des couches, l'amortissement  $\eta$  (grâce à la loi de Barkan [1]) et les paramètres mécaniques  $E$  et  $\nu$ . On remarque le faible module d'Young de la couche de tourbe ainsi qu'un coefficient de Poisson proche de 0,5.

## 4.2 Comparaison temporelle

Un modèle complet pour l'excitation rassemblant une composante constante basse fréquence (approche déterministe) et des composantes harmoniques représentant le contact roue-rail (gaussienne centrée sur 80 Hz) est implémenté dans le programme.

Sur la figure 5, les amplitudes sont correctement reconstruites avec notre modèle compte tenu des différentes approximations, de la difficulté de caractériser quantitativement les effets des éléments de la voie (principalement le ballast et les semelles où résident a priori des phénomènes non-linéaires) et d'évaluer très précisément la fréquence

d'excitation (unique ou multiple) des charges considérées dans le modèle numérique.

Hormis les erreurs de mesurage dues à l'utilisation dans des conditions difficiles des appareils, les résultats ont pu servir à valider le modèle numérique pour la gamme de fréquences et pour les paramètres mécaniques donnés précédemment.

## 4.3 Comparaison spectrale

La méthode semi-analytique utilisée permet d'accéder aisément à l'analyse spectrale des déplacements verticaux. Le spectre  $S_w$  en un point quelconque  $(x, y)$  en surface du massif est donné en fonction de la fréquence par la transformée de Fourier temporelle calculée en surface pour le signal réponse. On écrit :

$$\begin{aligned}
 S_w(x, y, f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} w(x, y, t) e^{-2i\pi ft} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} w(x, y) e^{-2i\pi ft} e^{i\Omega_0 t} dt \quad (6)
 \end{aligned}$$

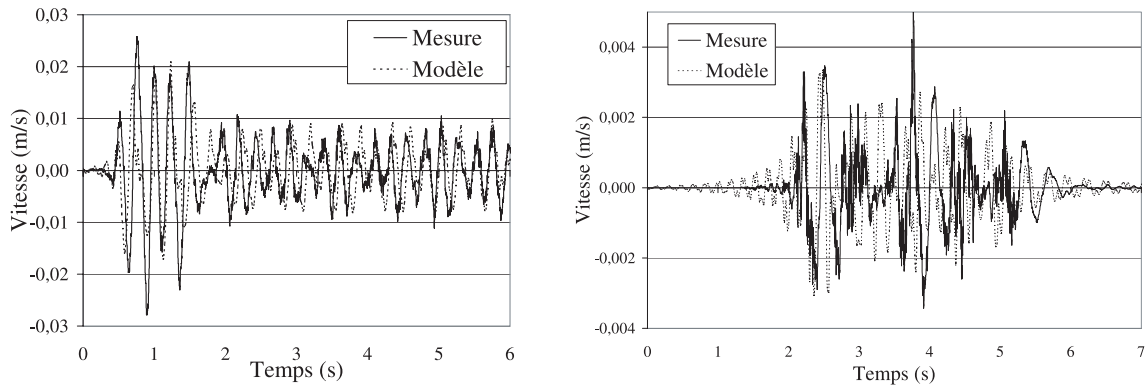


Fig. 5. Comparaison des vitesses particulières en surface à 2 m de la voie (à gauche : train « Corail » ; à droite : train « Autorail »).

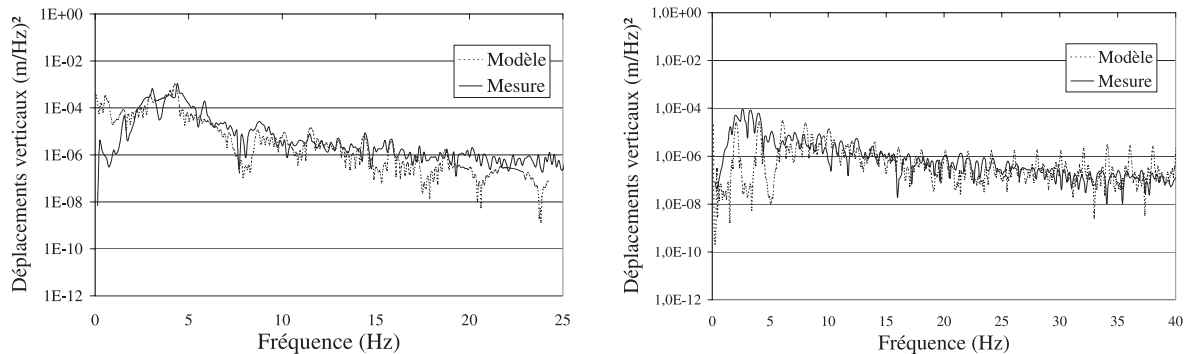


Fig. 6. Comparaison des spectres des déplacements verticaux en surface à 2 m de la voie (à gauche : train « Corail » ; à droite : train « Autorail »).

En utilisant le changement de variable  $x = x_1 - ct$ , l'expression du spectre des déplacements en surface devient :

$$S_w(x, y, f) = \frac{e^{i\beta x}}{c(f)} \int_{-\infty}^{+\infty} w^*(x_1, y) e^{-i\beta x_1} dx_1$$

$$= \frac{e^{i\beta x}}{c(f)} \left\{ \frac{1}{4\pi^2} \iint \bar{w}^*(\beta, \gamma) e^{i\gamma y} d\beta d\gamma \right\} \quad (7)$$

Le spectre de déplacement est ainsi donné par la transformée de Fourier inverse du champ de déplacement en surface du massif multiplié par un coefficient  $e^{i\beta x}/c$ . Ainsi, puisque la charge se déplace, une charge excitant le sol avec une seule fréquence  $\Omega_0$  dans le repère mobile produit en un point fixe du sol une réponse transitoire avec un spectre contenant une large gamme de composantes fréquentielles. L'effet Doppler transcrit ici dépend de la vitesse des ondes dans le sol.

La densité spectrale des déplacements verticaux calculée avec un modèle d'excitation multi-fréquentielle complet entre 0 et 60 Hz (dont une composante constante représentant le poids des axes et des composantes formées par une gaussienne centrée à 80 Hz représentant l'interaction roue-rail) peut être comparée à la mesure sur site et conduit à une vérification satisfaisante. Malgré des vitesses maximales de train (mesurées à  $135 \text{ km.h}^{-1}$ ) faibles par rapport à la vitesse des ondes de Rayleigh (page 320–400  $\text{km.h}^{-1}$  dans ce type de sol), l'effet de la vitesse du train est tout-à-fait perceptible [6]. L'influence du type de chargement a également pu être clairement observée. En

moyenne pour les déplacements verticaux et en résumé, on peut admettre qu'en prenant une référence de 1 pour un Autorail, on obtient de l'ordre de 1,7 pour un Corail et 2,7 pour un train de fret. Enfin, même si certains résultats sont difficilement exploitables (superposition du bruit et du signal), les conclusions qui peuvent être tirées conduisent à évaluer correctement l'influence de plusieurs paramètres comme ceux caractérisant le trafic ferroviaire.

## 5 Conclusion

Le modèle semi-analytique développé pour l'analyse d'un système « voie ferrée–sol » a montré la possibilité de simuler et de prédire la réponse vibratoire du sol au voisinage d'une voie ferrée. Ce modèle tridimensionnel est capable de générer des vibrations de même amplitude et de même allure que celles effectivement mesurées sur site. Le bon accord entre mesures et modèle a pu être retrouvé grâce à la caractérisation in situ des ondes P et S ainsi qu'à un recalage des données numériques.

Le problème rencontré lors des études de simulation concerne le choix de la fréquence d'excitation. Plusieurs modèles d'excitation ont été proposés (mono-fréquentiel et multi-fréquentiel avec des fréquences influentes se situant dans la plage 5–80 Hz). Ceci constitue certainement un motif pour expliquer certains écarts observés entre les relevés expérimentaux et les résultats numériques. Malgré tout, la comparaison qui a pu être réalisée entre

les déplacements et les vitesses obtenus, d'une part, grâce aux simulations numériques et, d'autre part, par les mesures expérimentales, doit être considérée comme relativement satisfaisante compte tenu des différentes incertitudes présentes dans les deux démarches.

Ces études [6] constituent alors une base significative de données utiles pour caractériser la réponse de l'environnement des voies et apprécier l'importance de la vitesse sur le comportement des ouvrages.

## Références

- [1] C. Madshus, A.M. Kaynia, High speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed, *J. Sound and Vibration* 231 (2000) 689–701
- [2] D.V. Jones, D. Le Houédec, A.T. Peplow, M. Petyt, Ground vibration in the vicinity of a moving harmonic rectangular load on a half space, *European J. Mechanics A/Solids* 17 (1998) 153–166
- [3] X. Sheng, C.J.C. Jones, M. Petyt, Ground vibration generated by a load moving along a railway track, *J. Sound and Vibration* 228 (1999) 129–156
- [4] K. Popp, H. Kruse, I. Kaiser, Vehicle – track dynamics in the mid – frequency range *Vehicle System Dynamics* 31 (1999) 423–464
- [5] G. Lefeuvre-Mesgouez, Propagation d'ondes dans un massif soumis à une charge se déplaçant à vitesse constante, thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 147 p.
- [6] B. Picoux, Étude théorique et expérimentale de la propagation dans le sol des vibrations émises par un trafic ferroviaire, thèse de Doctorat, École Centrale of Nantes, 2002, 155 p.
- [7] B.C. Faulkner, F.W. Barton, T.T. Baber, W.T. Mckeel, Determination of bridge response using acceleration data, Report FHWA/VA-97-R5, Virginia Transportation Research Council, USA, 1996, pp. 1–23
- [8] D.D. Barkan, Dynamics of bases and foundations, traduit du russe par L. Drashevskaja, G.P. Tschebotarioff (éd.), Mac Graw-Hill, 1962