

Résumé

Le bruit de roulement est la principale source de bruit des transports ferroviaires, pour un large intervalle de vitesses. Pour prédire le bruit de roulement, la SNCF utilise un outil de simulation, basé une approche fréquentielle. Bien que très efficace dans les cas de voies ballastées standard, en ligne droite et à vitesse constante, cette approche est limitée aux roues et aux rails sans défaut important. Une approche temporelle a donc été envisagée pour étendre la modélisation du bruit de roulement à celle du bruit d'impact dû aux irrégularités discrètes sur l'une et/ou l'autre des deux structures, telles que des joints sur le rail ou des méplats sur la roue.

L'objectif principal de la thèse est donc de construire un outil de simulation, dans le domaine temporel, de l'interaction verticale entre la roue et le rail, pour la prédiction du bruit de roulement. Les données d'entrée du modèle d'interaction, le modèle de contact roue/rail et le modèle vibratoire de la roue ont d'abord été formulés. Les données d'entrée du modèle consistent à définir un déplacement vertical relatif entre la roue et le rail, appelé rugosité relative, à partir de données spatiales de rugosité. Le modèle de contact, non linéaire et autorisant des pertes de contact, est basé sur la théorie de Hertz. Un modèle masse-ressort-amortisseur est suffisant pour représenter le déplacement vertical de la roue, dans le contexte de la simulation des vibrations engendrées dans le rail dans la même direction.

La seconde étape de l'outil de simulation est d'élaborer un modèle de voie ferrée, permettant de simuler une structure infinie à partir d'une représentation numérique finie, indispensable pour l'approche temporelle. Le rail est modélisé par une poutre de longueur finie, supportée périodiquement par des systèmes masse-ressort-amortisseur (décrivant le système des supports semelle-traverse-ballast). Les conditions aux limites de la poutre permettent d'absorber les réflexions des ondes aux bords de celle-ci. Des conditions aux limites absorbantes numériques ont donc été formulées.

Le second objectif de cette thèse est de caractériser expérimentalement le bruit de roulement et le bruit d'impact, dans les cas de défauts importants sur la roue et/ou le rail. Un essai en situation réelle a donc été réalisé. Deux sites de mesures ont été installés ; le premier sur une zone équipée de Longs Rails Soudés (LRS) et le second sur une zone avec un joint de rail (JR). De plus, certains essieux du train d'essai ont été spécialement sélectionnés pour les défauts de surface sur les roues. Des mesures de caractérisation telles que la rugosité de surface des roues et du rail mais aussi les accélérances de la voie ont été réalisées. Les niveaux vibratoires du rail et des traverses

ainsi que le bruit au passage du train d'essai ont été mesurés.

L'utilité de ces mesures est double. D'une part, elles permettent de réaliser une caractérisation expérimentale du comportement acoustique et vibratoire du système roue/rail, dans différentes situations. Ces conclusions aboutissent à un cahier des charges pour l'élaboration d'un outil expérimental de détection de défauts de roue, à partir de mesures acoustique et vibratoire en bord de voie. La seconde utilité de ces mesures est de pouvoir à la fois alimenter le modèle temporel d'interaction roue/rail, développé pendant la thèse, et de quantifier ses performances.

Le problème d'interaction roue / rail complet est résolu par la méthode des différences finies. L'évaluation des performances de ce modèle a été menée grâce à différentes comparaisons. L'efficacité des conditions aux limites absorbantes a d'abord été estimée. Une comparaison entre les résultats de simulation et ceux des mesures a ensuite été effectuée. Dans un premier temps, la capacité du modèle temporel à reproduire les caractéristiques dynamiques de la voie a été évaluée. Dans un second temps, la simulation des différentes situations mesurées pendant la campagne de mesure est réalisée. La comparaison entre les niveaux vibratoires simulés et mesurés au passage des roues avec différents états de surface est discutée.

Mots clés : bruit de roulement ferroviaire, caractérisation expérimentale, approche temporelle, contact roue/rail, modèle de poutre, conditions aux limites absorbantes, méthode des différences finies.

Abstract

Rolling noise is the main source of railway transportation noise, for a wide speed range. To predict rolling noise, the SNCF, the French railway company, uses a simulation tool, based on a frequency approach. Although it is very efficient in case of standard straight ballasted track and constant train speed, this approach is limited to wheel and rail without large amplitude defaults. Therefore, a time domain approach has been considered to extend the rolling noise modelling to the impact noise, which is due to discrete irregularities on either of the two structures, such as rail joints or wheel flats.

The main purpose of this PhD thesis is to build a time domain simulation tool of the wheel/rail vertical interaction, in the scope of the rolling noise modelling. First, the model input data, the wheel/rail contact model and the vibration model of the wheel are introduced. The input data consists in the definition of a relative vertical displacement between the rail and the wheel, called relative roughness, based on spatial roughness data. The wheel/rail contact is represented by a nonlinear Hertzian model which allows contact loss. A simple mass-spring-damper model represents the vertical motion of the wheel, in the context of the track vertical vibration simulation. The second step of the simulation tool is to build a railway track model, which allows to represent an infinite structure with a numerical finite one, essential for a time domain approach. The rail is represented by a beam of finite length, periodically supported by some mass-spring-damper systems (describing the pad-sleeper-ballast support systems). The boundary conditions of the rail are defined to absorb the wave reflection at boundaries. Some numerical absorbing boundary conditions have thus been specified.

The second aim of this PhD thesis is to characterize rolling noise and impact noise through experimentation, in case of large amplitude defaults on the rail and/or the wheel. Measurement tests have been realised in real situation. Two test sites have been set up on the specially selected railway track. The first one is on the long welded rail area (LRS: Long Rail Soudé) and the second site on the rail joints area (JR: Joint de Rail). The train used for the measurement tests has been equipped with some wheels specially selected for their surface defaults. During this measurement tests, different kinds of measures have been performed. Characterization measures such as the surface roughness on wheels and rail and the track acceleration have been performed. The rail and sleepers vibration behaviour and the noise levels during the train pass-by have been measured.

The purpose of such measurements is double. First, it allows to introduce an experimental characterization of the acoustical and vibrational behaviour of the wheel/rail system, in different situations. These conclusions lead to general specifications for an experimental tool, dedicated to the wheel default detection, thanks to measurements at the track border. The second interest of these measurements is to provide input data for the wheel/rail interaction time domain model, and also to provide data which can be used to explore the performances of this model.

The complete wheel/rail interaction problem is solved by using the finite difference method. The assessment of the time domain model performances is carried out through different comparisons. The absorbing boundary conditions efficiency has first been explored. A comparison between simulated and measured results has been then achieved. First, the time domain ability to reproduce the measured dynamics of the track is explored. In addition, the simulation of the corresponding situations measured during the measurement tests has been performed. The simulated and measured vibration levels, during the pass-by of the wheels with different surface default, are compared and discussed.

Keywords: Railway rolling noise, experimental characterization, time domain approach, wheel/rail contact, beam model, absorbing boundary conditions, finite difference method.