

Soutenance de thèse

Méthodes numériques pour le calcul des vibrations auto-entretenues liées au frottement – Application au bruit de crissement ferroviaire

par **Lucien CHARROYER**, doctorant ECL/IFSTTAR, LabEx CeLyA

le mardi 19 décembre 2017 à 14h30
à l'École Centrale de Lyon, Amphi 201 (bât. W1, 2^{ème} étage)

Jury

- M. Philippe Dufrénoy, Professeur à l'Université de Lille 1, Polytech'Lille (LML), Rapporteur
- M. Guilhem Michon, Ingénieur Chercheur HDR à l'ISAE-SUPAERO (ICA), Rapporteur
- Mme Emmanuelle Sarrouy, Maître de Conférences à l'École Centrale Marseille (LMA), Examineur
- M. Louis Jézéquel, Professeur à l'École Centrale de Lyon (LTDS), Examineur
- M. Olivier Chiello, Chercheur à l'IFSTTAR (LAE), Encadrant de thèse
- M. Jean-Jacques Sinou, Professeur à l'École Centrale de Lyon (LTDS), Directeur de thèse

Résumé

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre des recherches destinées à réduire ou à éliminer le bruit de crissement émis par les véhicules ferroviaires en courbe ou au freinage. Ces bruits peuvent en effet atteindre des niveaux sonores très élevés, jusqu'à 105 dB(A) à proximité des rames en cas de freinage par exemple, et constituent une gêne importante pour les usagers et les riverains.

Afin d'apporter des solutions de réduction de ce bruit de crissement, on se concentre sur la modélisation des vibrations auto-entretenues de structures avec contact frottant ainsi que sur la compréhension des mécanismes à l'origine du crissement résultant, en particulier dans le cas d'un frein à disque ferroviaire. On fait l'hypothèse que les vibrations ont pour origine un couplage de modes de la structure dans les directions tangentielle et normale à l'interface en contact frottant. Ce couplage entraîne une instabilité de l'équilibre quasi-statique glissant du système et l'apparition de vibrations auto-entretenues. On cherche à déterminer ces vibrations par le calcul ce qui s'effectue en deux étapes.

Dans un premier temps, l'analyse de stabilité de l'équilibre quasi-statique du système permet de déterminer l'occurrence des vibrations. Dans cette thèse, deux hypothèses de modélisation du frottement – plan ou rectiligne – sont comparées dans le cas d'un modèle académique minimal. Dans le cas non-amorti, on montre que l'hypothèse simplificatrice du frottement rectiligne tend à stabiliser le système. Dans le cas amorti, on constate que les résultats établis dans la littérature pour un frottement rectiligne, en particulier le paradoxe de déstabilisation, ne sont pas facilement généralisables au cas du frottement plan bien que des similitudes existent.

Dans un deuxième temps, une analyse non-linéaire est nécessaire pour déterminer les amplitudes et le contenu fréquentiel précis des vibrations auto-entretenues. Cette étape est généralement effectuée à l'aide d'une intégration temporelle numérique à partir de conditions initiales données, proches de l'équilibre glissant. En examinant l'évolution temporelle des vibrations obtenues à l'aide de cette technique, on peut distinguer d'une part le régime transitoire au cours duquel les non-linéarités apparaissent et stabilisent progressivement la solution instable, et d'autre part le régime stationnaire (ou régime de fonctionnement) où les amplitudes vibratoires sont stabilisées. Dans le cas du modèle académique, une analyse rigoureuse des échanges énergétiques au cours de l'évolution temporelle permet de mettre en évidence l'origine de la stabilisation des vibrations, en particulier la baisse du taux de puissance injectée au contact résultant de l'accumulation des événements fortement non-linéaires : décollements, adhérences ou chocs.

L'intégration temporelle directe n'est toutefois pas adaptée à des modèles numériques comportant de nombreux degrés de liberté et pour lesquels la détermination du régime stationnaire est généralement suffisante pour proposer des solutions de réduction. Le surcout de calcul engendré par le régime transitoire est en effet très limitant. C'est pourquoi, une méthode est proposée pour approximer directement le régime stationnaire dans le cas d'un système mono-instable. Cette méthode combine une technique de tir à une initialisation basée sur les observations énergétiques ci-dessus. Elle est d'abord validée sur le modèle minimal puis adaptée au modèle éléments finis de frein ferroviaire moyennant une approximation originale de la technique de tir : la réduction de l'espace des phases des conditions initiales. Les approximations des régimes stationnaires sont comparées avec ceux obtenus par l'intégration temporelle directe. Les avantages et les limitations de la méthode sont discutés.

Abstract

This work is part of research intended to mitigate or eliminate the squeal noise produced by railway vehicles in curves or during braking. For instance, brake noise can reach very high sound levels up to 105 dB(A) close to the trains and constitutes an important nuisance for passengers and residents in the station.

In order to provide some mitigation measures, the study focuses on the modelling of self-sustained structural vibrations in presence of frictional contact and the understanding of the squeal generation mechanism, especially for of a railway disc brake. It is assumed that vibration is due to structural mode coupling in the normal and tangential directions at the frictional interface. This coupling leads to instability of the sliding quasi-static equilibrium of the system and the occurrence of self-sustained vibrations. Two steps are necessary to calculate these vibrations.

Firstly, the occurrence of the vibrations is determined through the stability analysis of the quasi-static equilibrium. In this thesis, two modelling assumptions for the friction law – planar or rectilinear – are compared in the case of an academic model. Without damping, the simplified rectilinear friction law tends to stabilize the system. With damping, the results established in the literature in case of rectilinear friction, especially the destabilization paradox, cannot be applied generally in case of planar friction even if similarities may be observed.

Secondly, a nonlinear analysis is necessary and performed to calculate the amplitudes and the detailed spectral content of the self-sustained vibrations. This step is generally performed by using numerical time integration from given initial conditions, close to the equilibrium. Taking a look at the vibrations time histories obtained by this technique, two different states may be distinguished. In the transient state, nonlinear forces appear and gradually stabilize the unstable solution whereas in the steady (stationary) state, vibrations are stabilized. In the case of the academic model, the cause of the stabilization is highlighted thanks to a rigorous analysis of energy exchanges, especially the decrease of the power rate injected via the contact interface resulting from the accumulation of strongly nonlinear events like loss of contact, stick or impacts.

However, direct time integration is not very appropriate in the case of large numerical models with many degrees of freedom. Indeed, the additional computational cost due to the transient state is very high although the determination of the steady state is generally sufficient from a practical point of view. Consequently, a method is proposed in order to directly approximate the steady state in case of mono-instability. This method combines a shooting technique with an initialization based on the above energy considerations. It is first validated on the minimal model and then transposed to the finite element model of a railway disc brake through an original approximation of the shooting technique: the reduction of the initial conditions phase space. The estimations of the steady states are compared with those obtained by direct time integration. The advantages and the limitations of the method are discussed.