

Modèle prédictif de propagation des vibrations à partir de véhicules ferroviaires se déplaçant à vitesse constante

B. Picoux,
R. Rotinat,
J.-P. Regoin,
D. Le Houedec,
École Centrale de Nantes,
Laboratoire Mécanique et Matériaux,
benoit.picoux@ec-nantes.fr,

F. Quetin,
SNCF,
Direction de la Recherche et de la Technologie,

J.-P. Hamelin,
Soletanche Bachy

Les phénomènes de propagation d'ondes dans les sols ont par le passé fait l'objet de multiples recherches associant les modélisations et simulations numériques ainsi que les essais expérimentaux in situ. Dans cette analyse, les caractéristiques mécaniques et les lois de comportement des différents sols en place jouent effectivement un rôle important pour la pertinence et la validité des modélisations envisagées, et à ce titre les hypothèses nécessaires doivent être adoptées avec prudence. Depuis quelques décennies, un autre facteur essentiel est constitué par la vitesse des charges « mobiles » se déplaçant souvent à la surface du sol ou éventuellement en sous-sol (tunnels par exemple).

Comme on l'expliquera par la suite, la valeur de cette vitesse par rapport à celle de l'onde superficielle de Rayleigh joue un rôle prépondérant dans l'amplitude des vibrations observables par exemple lors du passage d'un train. Ainsi, sur des sites ferroviaires on a pu mesurer des amplitudes de l'ordre d'une dizaine de millimètres comme par exemple dans la région d'Amiens (vallée de la Somme, sol tourbeux) ou en Suède (Ledsgard près de Göteborg, sol argileux). Si ces désordres n'occasionnent pas de gêne pour les passagers, il n'en est pas de même pour les effets possibles à long terme pour l'assise de la voie (problème de tassement différentiel), la structure du rail (risque de fatigue) ou pour l'environnement (propagation des vibrations aux structures voisines si elles existent). Par ailleurs, il faut considérer qu'on souhaite toujours augmenter la vitesse de ces véhicules, et par conséquent les effets nuisibles risquent de s'amplifier.

Conscient de ces problèmes, dans le cadre du programme PREDIT pour la thématique « Bruits et nuisances sonores » le Ministère de l'aménagement du Territoire et de l'Environnement a financé une action de recherche destinée à mieux appréhender ces phénomènes de propagations de vibrations à partir de

véhicules ferroviaires se déplaçant à vitesse élevée (aide DGAD/SRAE/99107). L'objectif de cet article est donc de dresser un bilan des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette action, que ce soit sur le plan de la modélisation ou celui de l'analyse et de la validation expérimentale.

Modélisation et simulation numérique

Lors de précédents travaux réalisés au Laboratoire de mécanique et matériaux de l'école centrale de Nantes, il a été possible de développer des outils de simulation numérique permettant de caractériser certains phénomènes de propagation dans le sol des vibrations dues à des sources harmoniques implantées en surface ou à l'intérieur du massif. Ainsi, le logiciel de calcul POS [1] basé sur une modélisation par éléments finis associée à des efforts nodaux appliqués sur les frontières verticales du massif, permet d'établir en bidimensionnel la réponse d'un sol multicouches soumis à des sollicitations harmoniques fixes. Les applications de ce programme ont porté en particulier sur la caractérisation de l'efficacité des procédés de réduction des vibrations : tranchées, écrans, fondation élastique... L'extension en tridimensionnel a pu être réalisée en couplant le domaine « central » discrétisé en éléments finis à une modélisation par éléments infinis pour les domaines « extérieurs » [2]. Au cours des dernières années, le problème des sollicitations harmoniques mobiles a été abordé pour tenir compte de l'influence de la vitesse des véhicules. À ce titre, le problème est a priori beaucoup plus gênant pour le trafic ferroviaire pour lequel la vitesse peut être bien supérieure à celle des ondes superficielles de Rayleigh. Les méthodes développées [3] font appel à un processus semi-analytique associant une

transformée de Fourier (simple en bidimensionnel, double en tridimensionnel) et une intégration numérique en utilisant un algorithme FFT. Pour différentes vitesses de la sollicitation, la réponse du massif peut être obtenue pour les modélisations possibles du sol en bidimensionnel ou en tridimensionnel : milieu semi-infini, multicouches sur un substratum rigide ou sur un massif semi-infini [4], [5].

Tous ces modèles ne prenaient pas en considération la schématisation de la structure excitatrice ; en fait la modélisation de la sollicitation était limitée à une charge harmonique de vitesse, d'amplitude et de fréquence constantes. Aussi, dans le cadre du programme PREDIT, il a été proposé d'enrichir le modèle précédent en y intégrant autant que possible la structure réelle d'une voie ferrée (rails, semelles, traverses, ballast). Pour cela, le modèle de voie développé à l'ISVR de Southampton a été retenu [6] et intégré de façon à adopter un schéma de principe analogue à ce qui est présenté sur la figure ci-dessous.

ferrée à la réponse et surtout d'évaluer l'influence de la vitesse du train. Celle-ci est appréciée relativement à la vitesse des ondes superficielles de Rayleigh définissant le nombre de Mach MR. Les figures 2, 3 et 4 ci-après donnent un aperçu de quelques résultats obtenus, la figure 4 justifiant l'existence de cônes de Mach caractéristiques d'un régime super-Rayleigh et d'une majoration des réponses effectivement observées.

Désormais, on peut considérer que le logiciel de calcul permet de simuler correctement les phénomènes observés et de prévoir la réponse du massif et de la voie ferrée, étant bien entendu que la principale difficulté est relative au choix adéquat des données paramétriques à intégrer dans le modèle. Cette remarque justifie pour le moins le soutien de mesures expérimentales nécessaires pour validation de ce type.

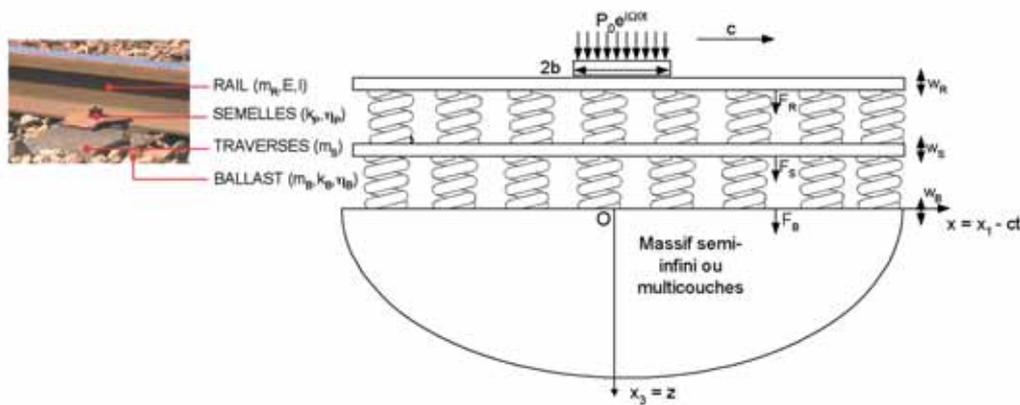


Fig. 1 : Modèle de couplage voie ferrée - sol

Concernant les hypothèses, on admet pour le massif semi-infini (ou pour chaque couche de sol) des caractéristiques d'homogénéité, d'isotropie et d'amortissement hystérétique. La mise en équations repose sur les trois données : l'équation élastodynamique de Navier, la loi de comportement (relation contraintes - déformations) et l'état des conditions initiales aux limites. Avant de procéder à la transformation de Fourier, un changement de variables permet de se placer dans un système se déplaçant avec la charge mobile.

Pour la modélisation de la structure ferroviaire, le rail est assimilé à une poutre d'Euler reposant sur une poutre de Timoshenko représentant les traverses (bois ou béton). Les semelles et le ballast sont caractérisés par une raideur et un amortissement de type viscoélastique. Les équations sont écrites successivement pour le rail, les traverses et le ballast, et le couplage avec le sol est réalisé par l'introduction de l'effort exercé sur le sol par le ballast. On pourra trouver dans [7] et [8] les détails de cette mise en équations avec en complément la méthode de résolution permettant d'obtenir en termes de déplacements vertical et horizontal les réponses du sol et de chaque élément de la structure ferroviaire.

Les outils de simulation numérique prenant en compte ces modélisations sont actuellement opérationnels ; ils permettent en particulier de montrer la contribution propre de la voie

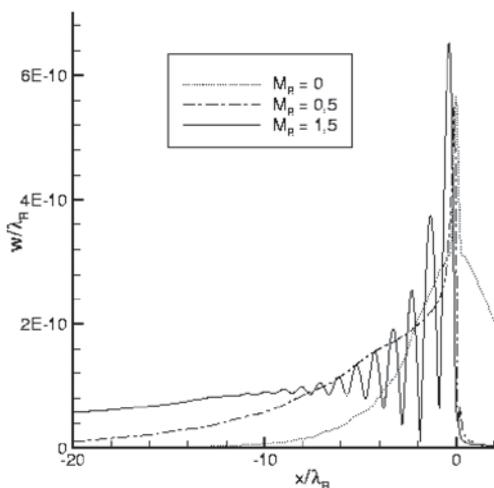


Fig. 2 : Déplacements verticaux à la surface du sol pour une charge unique harmonique se déplaçant sur une voie ferrée en fonction de son régime de vitesse.

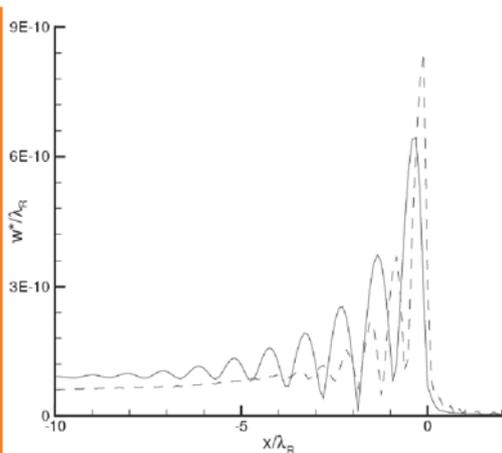


Fig. 3 : Comparaison entre le modèle avec (ligne pleine) ou sans voie ferrée (ligne pointillée) pour une charge unique harmonique (40 Hz) se déplaçant à grande vitesse

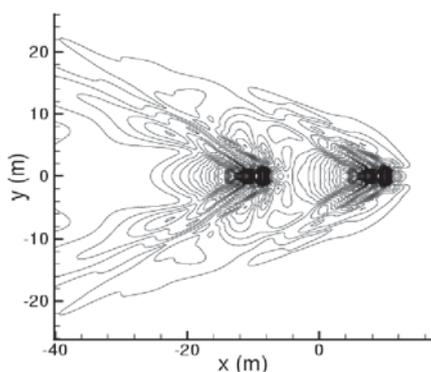


Fig. 4 : Champ de déplacements verticaux à la surface du sol et à proximité de la voie pour un wagon se déplaçant à une vitesse supérieure aux ondes superficielles de Rayleigh (modèle tridimensionnel comprenant la voie ferrée et un massif semi-infini)

Approche expérimentale

En complément des études de simulation, des essais in situ ont été réalisés en partenariat avec la SNCF et la société Solétanche Bachy. Les sites choisis sont implantés dans la vallée de la Somme le long de la ligne Amiens – Boulogne via Abbeville, avec un sol de nature essentiellement tourbeuse et une nappe phréatique à faible profondeur (état amplifié suite aux inondations du printemps 2001). Des essais sismiques et des carottages réalisés par E.D.G. filiale de Soletanche Bachy ont permis d'appréhender les caractéristiques physiques et mécaniques des couches rencontrées sur les trois sites voisins de quelques kilomètres.

Les sites retenus sont situés à Crouy Saint Pierre et à Breilly, le site « témoin » étant voisin de celui de Crouy Saint Pierre. Sur les deux sites problématiques, dans des zones d'environ cent

mètres, la plate-forme ferroviaire et le sol avoisinant subissent des déplacements de l'ordre de quelques millimètres (avec des maximums pouvant atteindre 8 mm pour le rail) lors du passage d'un convoi. La voie, en courbe dans les deux zones, a un rayon de courbure non négligeable de 1430 mètres pour Crouy. L'effet de cette courbe sur les déplacements verticaux a pu être mis en œuvre numériquement dans [7]. La structure ferroviaire est composée d'un rail UIC60, de traverses bi-blocs U41, de semelles NBLA et d'un ballast. Comme indiqué auparavant, le sol est constitué par une couche superficielle de remblai (moins d'un mètre), de tourbe (épaisseur 3 à 5 mètres), de limons argilo-sableux en transition avec un substratum crayeux.

Les essais ont été réalisés mi-juillet 2001 sur les trois sites retenus, les mesures liées aux vibrations étant couplées avec les essais sismiques et les carottages. Pour ce qui concerne les mesures de vibrations, les moyens de mesures (accéléromètres, caméra ultra rapide, vélocimètre laser) ont permis pour chaque passage de train de relever les réponses du rail, des traverses du ballast et du sol. Sur l'ensemble des trois sites, une trentaine de convois a pu être expérimentée, offrant une diversité paramétrique avec comme paramètres : la vitesse du train, le type de trafic (marchandises, voyageurs autorail ou corail). Même si, compte tenu des délais, il n'a pas été possible d'assurer la comparaison globale entre les résultats issus de la simulation numérique avec ceux relevés expérimentalement, on peut déjà affirmer que les mesures in situ vont constituer une base de données indispensables non seulement pour cette comparaison mais également pour disposer d'outils de prévision en fonction de la configuration du trafic et des caractéristiques du sol environnant la voie ferrée.

Dans le cadre de cette comparaison, sur le site de Crouy Saint Pierre où une solution palliative a porté sur une duplication du nombre de rails et un rapprochement des traverses, l'atténuation des vibrations observées expérimentalement (réduction de l'ordre de 20 %) a pu être déjà justifiée à l'aide de la simulation numérique, même si pour cette simulation, les caractéristiques du sol n'étaient prises que de manière très approximative. Ces résultats sont précisés sur la figure 5 ci-dessous.

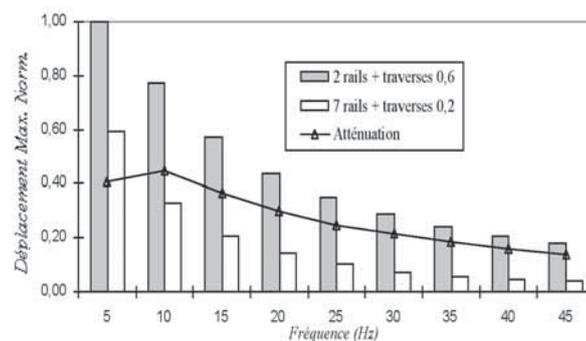


Fig. 5 : Effet sur les déplacements en surface d'une modification de la voie

Cet article a fait l'objet d'une présentation aux 3^e Assises de la qualité de l'environnement sonore (Angers 2001). Les actes de ce colloque sont disponibles au CIDB, 12/14, rue Jules Bourdais, 75017 Paris.

Références bibliographiques

[1] Laghrouche o., Simulation numérique de propagation d'ondes dans les sols. Application à l'isolation vibratoire, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes (1996).

[2] Jones D.V., Laghrouche O., Le Houedec D., A study of the active isolation of traffic vibrations using a coupled finite and infinite element method, Third International Conference on Computation Structures Technology, Budapest, Proceedings : Advances in Computational Techniques for Simulation, pp 165-170 (1996).

[3] Lefeuve-Mesgouez G., Propagation d'ondes dans un massif soumis à des charges se déplaçant à vitesse constante, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, (1999).

[4] Lefeuve-Mesgouez G., LE HOUEDEC D., PELOW A.T., Ground vibration due to high speed moving harmonical load, Structural Dynamics – Eurodyn 99, A.A. Balkema, Ed. L. Fryba & J. Naprstek, vol. 2, pp 963-968 (1999).

[5] Lefeuve-Mesgouez G., Peplow A.T., Le Houedec D., Ground vibration in the vicinity of a high speed moving harmonic strip load, Journal of Sound and Vibration, vol. 231 (5), pp 1 289-1 309 (2000).

[6] Sheng X., Jones C.J.C., Petyt M., Ground vibration generated by a load moving along a railway track, Journal of Sound and Vibration, vol. 228 (1), pp 129-156 (1999)

[7] Picoux B., Le houedec D., Propagation d'ondes en surface d'un massif soumis à un effort vertical et latéral dû à un trafic ferroviaire, XVe Congrès français de Mécanique, pp 1-6, Nancy, (2001).

[8] PICOUX B., Lefeuve-Mesgouez G, Le houedec D., Propagation of vibrations from a railway track lying on a semi-infinite soft ground, The Eight International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Vienna (2001), (Proceedings à paraître).

