

Les vibrations causées par le trafic ferroviaire de surface

Estelle Bongini

SNCF
Direction de l'innovation et
de la recherche physique du système ferroviaire
45, rue de Londres
75379 PARIS CEDEX 8
Tel : 01 53 42 23 56 (int 31 23 56)
Fax : 01 53 42 97 84
E-mail : estelle.bongini@sncf.fr

Anne Guerrero

RFF
92, avenue de France
75648 PARIS CEDEX 13
Tél : 01 53 94 34 21
E-mail : anne.guerrero@rff.fr

Les vibrations et le bruit solidien dans les bâtiments causés par le trafic ferroviaire sont un sujet de préoccupation grandissant en termes d'impact environnemental. En effet, même si leur nombre reste encore limité, de plus en plus de riverains se disent à la fois exposés au bruit et aux vibrations. Bien que, contrairement au bruit, aucune législation n'existe limitant l'exposition aux vibrations, RFF et la SNCF se sont associés pour lutter contre cette nuisance. Cependant, la recherche de solutions de réduction est rendue très complexe par la nature même du phénomène : les vibrations ressenties par le riverain dépendent de l'interaction entre le véhicule et la voie pilotée par le comportement dynamique de ces deux systèmes, de la nature du sol/sous-sol et de sa propension à propager certains types d'onde et du bâtiment lui-même. Il n'y a donc pas de solution polyvalente.

Les vibrations dues au passage des trains sont générées par l'interaction dynamique voie/véhicule induite par les irrégularités des surfaces de la roue et du rail en contact. Le chargement dynamique de l'essieu est transféré par la voie au sol et génère des ondes élastiques dans le sol qui excitent les bâtiments voisins via leurs fondations. Dans la gamme fréquentielle allant de 1 Hz à 80 Hz, ces vibrations sont perçues tactilement (plancher qui vibre par exemple). En parallèle, à des fréquences allant de 16 Hz à 250 Hz, ces vibrations induisent du bruit à basses fréquences rayonné par la structure du bâtiment (murs et planchers).

Que mesure-t-on et comment l'analyser ?

Les normes de mesure utilisées

La caractérisation des vibrations causées par un passage de train nécessite en premier lieu de les mesurer, par des accéléromètres ou des géophones, puis de les analyser afin d'interpréter les signaux mesurés (niveaux, contenu temporel et fréquentiel) en fonction du ressenti humain.

Deux situations peuvent amener à mesurer les niveaux vibratoires causés par un trafic ferroviaire :

- Dans un contexte curatif : un ou plusieurs riverains se plaignent des vibrations, les mesures se feront dans le bâtiment voire dans le logement même des plaignants ; les accéléromètres seront collés sur les murs et sur les dalles de plancher (la position donnant généralement les plus forts niveaux étant en milieu de dalle de plancher). En parallèle, des microphones peuvent être installés pour quantifier le bruit re-rayonné par la structure du bâtiment [1].

- Dans un contexte préventif : une construction de ligne nouvelle ou une construction d'un bâtiment en bordure d'une voie existante sont envisagées. Dans ce cas, les mesures s'effectueront en champ libre ; les accéléromètres seront fixés au sol par l'intermédiaire de piquets cruciformes plantés dans le sol ou de socles de plâtre permettant d'assurer que l'accéléromètre est bien solidaire du sol.

Une fois la mesure effectuée, les enregistrements doivent être analysés. La norme ISO NF 14837 se concentre spécifiquement sur les «vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires». La première partie qui concerne les principes généraux a été homologuée en avril 2006. Les parties suivantes qui englobent les modèles prédictifs, le mesurage, les critères d'évaluation, les mesures d'atténuation et la gestion des actifs sont en cours d'écriture. Plusieurs autres normes permettent d'analyser les vibrations liées au trafic ferroviaire en fonction du ressenti d'une personne exposée dans un bâtiment. Nous en citerons deux : la norme ISO 2631 et la norme allemande DIN 4150.

La norme ISO 2631 se base sur des mesures accélérométriques dans le bâtiment (sur les murs et les planchers). L'indicateur $(a_w)_{\text{rms}}$ proposé par cette norme est issu des signaux d'accélération pondérés (selon le filtre proposé dans [2]) et intégré sur le temps de passage du train pour le cas d'une source ferroviaire. Cette norme indique, suivant cet indicateur, un seuil de perception des vibrations fixé à 66 dB (ref=5^{e-8}m/s²).

La norme allemande DIN 4150-2:1999, dédiée aux vibrations causées par le trafic ferroviaire, utilise comme indicateur de base le $KB_F(t)$ qui est une grandeur issue de la vitesse vibratoire. Les vitesses vibratoires sont mesurées dans les trois directions de l'espace, pondérées et filtrées par un filtre passe-haut (de fréquence de coupure 5,6 Hz). Les vitesses ainsi obtenues sont notées $KB(t)$. La valeur efficace de ce signal, notée $KB_F(t)$ est obtenue en intégrant $KB(t)$ avec une constante d'intégration courte, égale à 125 ms.

Ensuite, sur la base de $KB_F(t)$, deux indicateurs sont calculés : une valeur limite sur la période d'exposition (jour ou nuit), notée KB_{Fmax} , et une moyenne KB_{FTr} prenant en compte le trafic propre à la ligne ferroviaire proche du bâtiment. Le détail de calcul de ces deux grandeurs est donné dans [3]. Deux critères de validation peuvent ensuite être appliqués à ces deux indicateurs permettant de classer le bâtiment selon des zones d'occupation types (zone industrielle, zone commerciale, zone résidentielle ou encore zone protégée).

Ne disposant pas de normes propres pour les mesures en champ libre, ces mêmes normes sont utilisées en notant que les valeurs des indicateurs obtenues sont indicatives mais pas représentatives (par exemple de la situation dans un potentiel futur bâtiment).

Quelques exemples chiffrés

Dans le cadre du projet Vibsol, trois campagnes de mesure ont été réalisées sur une Ligne Grande Vitesse (LGV), et une Ligne classique (LC) et sur une voie Classique supportant à la fois du trafic Fret et du trafic TER.

En dehors de la campagne de mesure dédiée aux spécificités du trafic Fret et présentée dans la section suivante, les enregistrements au passage ont été réalisés en configuration de champ libre (des accéléromètres, solidaires du sol via des piquets cruciformes plantés dans le sol, étaient distribués perpendiculairement à la voie de 4 m à 70 m de distance). Ces mesures ont montré qu'au-delà de 12 m de distance à la voie, y compris pour des passages

à 300 km/h, les niveaux vibratoires en champ libre sont en deçà du seuil de perception de 66 dB tel que défini par la norme ISO 2631. L'indicateur a_{wrms} de la norme ISO 2631 atteint en moyenne 67 dB à 8 m de la voie pour un passage de TGV à 300 km/h et ce même indicateur présente une moyenne de 62 dB à 12 m de la voie.

Le même type de conclusions a été dressé sur la ligne classique pour des trafics Fret (qui présentent un a_{wrms} maximum de 67 dB à 12 m à 120 km/h), TER (qui présentent un a_{wrms} maximum de 52 dB à 12 m à 150 km/h) et TGV (qui présentent un a_{wrms} maximum de 65 dB à 12 m à 220 km/h).

Ces valeurs sont indicatives car la norme ISO 2631 a été développée pour des mesures réalisées dans un bâtiment. Un bâtiment va jouer le rôle d'un filtre sur les niveaux vibratoires en amplifiant grandement la contribution vibratoire sur ses fréquences propres de résonance.

Spécificités du trafic Fret

Dans le cadre de la collaboration entre RFF et la SNCF, un projet PREDIT subventionné par l'ADEME et en collaboration avec le CSTB et SATEBA a permis de caractériser les spécificités du trafic Fret sur les vibrations induites dans le sol.

La figure 1, issue de [4], illustre les niveaux accélérométriques selon la norme ISO 2631 enregistrés en milieu de plancher pour des passages de trains Fret sur la gauche et des passages de trains voyageurs sur la droite. Les vitesses typiques de ces 2 types de matériels étaient différentes car les mesures se sont effectuées en entrée de gare où seuls les trains Passagers s'arrêtaient. Ces mesures ont permis de conclure qu'à vitesse de circulation équivalente, les niveaux a_{wrms} sont équivalents pour des circulations Fret à ceux enregistrés pour des circulations TER. En termes de contenu spectral des accélérations mesurées, les deux types de circulation sont aussi équivalents.

Pour expliquer un plus fort désagrément des riverains face aux vibrations engendrées par le trafic Fret, il faut dès lors peut-être s'intéresser à la signature temporelle

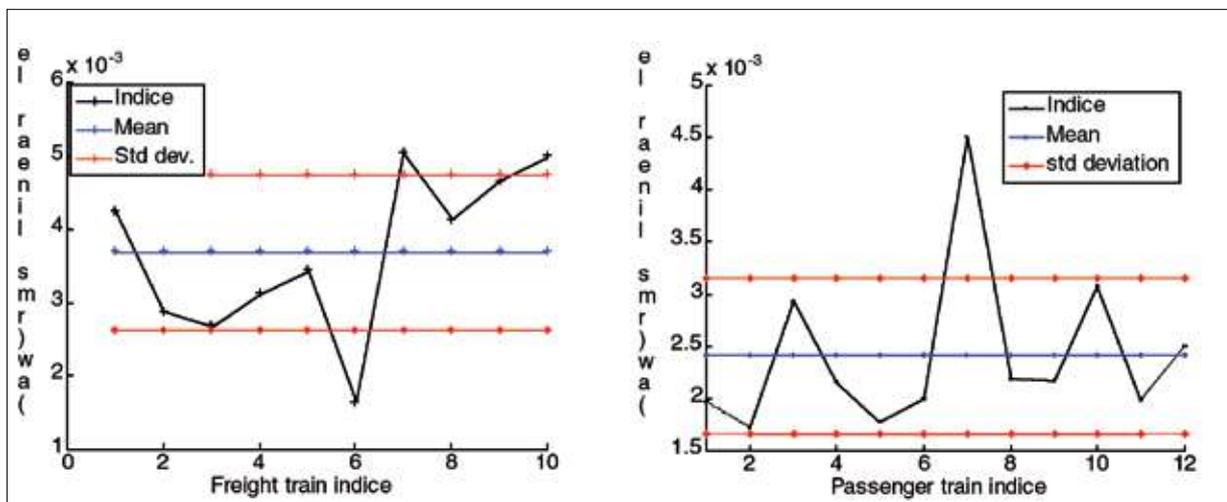


Fig. 1 : $(a_w)_{rms}$ norme ISO 2631, accélérations mesurées au centre de la dalle de plancher. Sur la gauche, moyennes de passages de trains Fret, sur la droite, passages de trains régionaux. Niveaux $(a_w)_{rms}$ pour chaque passage en trait plein noir, valeur moyenne en bleu et écart-type en rouge

des accélérations : pour le passage de trains Voyageurs, la signature présente un niveau qui oscille très peu au cours du temps alors que pour les trains Fret, cette même signature présente des pics très élevés. Ces pics synonymes de chocs pourraient être une des causes de désagrément accru au passage de trains Fret.

Par ailleurs, bien que le Fret, au vu de ces premiers résultats, ne provoque pas des niveaux moyens de vibrations plus élevés que les autres types de matériels roulants, la lourde masse à l'essieu caractéristique des wagons Fret devra être prise en compte lors de la recherche de solution de réduction apportées sur la voie.

Comment expliquer ces niveaux vibratoires pour mieux les maîtriser ?

Approche phénoménologique et modèles analytiques

Le phénomène d'excitation (étape 1 figure 2) à l'origine des vibrations transmises à un bâtiment causées par le passage d'un train est dissociable en 2 catégories :

- l'effort quasi-statique, causé par le déplacement d'une charge sur le $1/2$ espace infini que représente le système voie/sol ; cet effort excite le système {voie + véhicule} (étape 2) principalement dans les très basses fréquences entre 1 et 10/15 Hz.
- l'effort dynamique lié aux irrégularités des surfaces de contact de la roue et du rail, aussi appelées rugosités. Ces irrégularités sont de l'ordre de quelques millimètres

d'amplitude. Les longueurs d'onde des rugosités pilotant les ondes dans le sol vont de quelques centimètres à quelques mètres, selon la vitesse de passage du train. Cet effort excite le système {voie + véhicule} (étape 2) aux moyennes fréquences, entre 15 Hz et 200 Hz.

A ces 2 phénomènes d'excitation viennent s'ajouter les efforts au passage de points singuliers comme des aiguillages ou des joints de rail qui impliquent une force transmise au sol de type choc impactant (équivalent à un effort excitant une très large gamme fréquentielle).

Ces efforts, générés au contact roue/rail, se transmettent via l'interface entre la voie et le sol (étape 3), créant des ondes dans le sol environnant.

Les paramètres influant sur les niveaux vibratoires en champ libre ou dans un bâtiment sont ainsi :

- au niveau du véhicule, l'état de surface des roues, la masse non suspendue et la masse suspendue (isolée par les suspensions primaires et secondaires au-delà de 10 Hz) ;
- au niveau de la voie, l'état de surface du rail ; la réponse dynamique de la voie pilotée par le comportement dynamique de ses différents éléments constitutifs (rail, semelle sous rail, traverse, ballast et plate-forme) ;
- au niveau du sol, la réponse dynamique du sol autrement dit la propagation des ondes (étape 5 de la figure 2). Les ondes les plus dommageables dans le contexte ferroviaire sont les ondes de Rayleigh : ces ondes de surface ne décroissant qu'en $1/r$, (r étant la distance entre la source et le récepteur) portent donc le maximum d'énergie à moyenne et longue distance ;

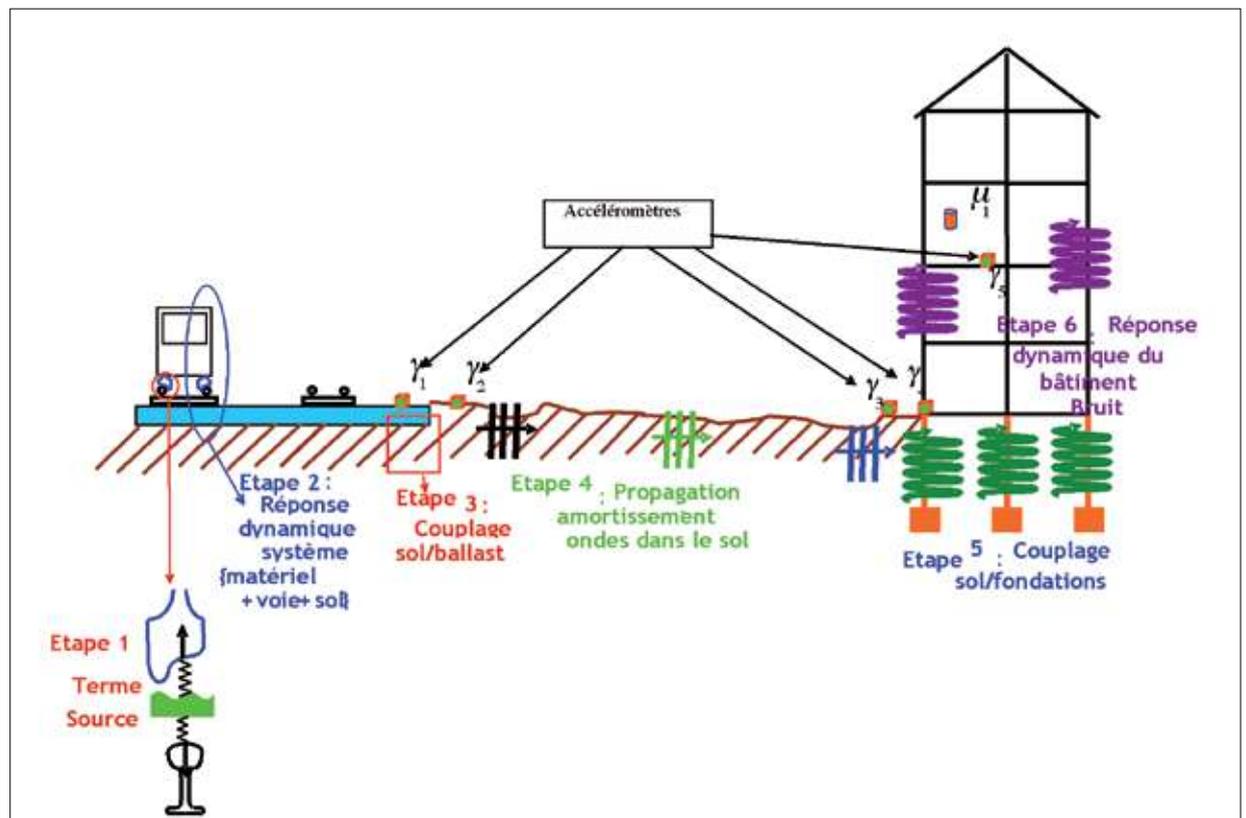


Fig. 2 : Phénomènes en jeu dans les vibrations dues au trafic ferroviaire

- au niveau du bâtiment (étape 6 de la figure 2), son comportement vibratoire piloté par l'épaisseur et la nature de ses parois/planchers/fondations.
Face à un tel degré de complexité, l'approche numérique paraît être parfaitement adaptée pour optimiser des solutions de réduction.

Modélisations numériques

Des approches numériques ont été développées pour prédire et mieux appréhender les vibrations transmises par le sol. Ces approches sont basées sur une modélisation par éléments de frontières du demi-espace représentant le sol.

Ces modèles ont été adaptés pour le cas ferroviaire :

- à partir de modèle BEM 3D (boundary element model/éléments de frontière) pour modéliser la propagation des ondes dans le sol, la périodicité longitudinale de la voie permet de passer à des modèles dits 2,5D. En effet, en supposant le système invariant dans la direction longitudinale de la voie y, la propagation des ondes dans le système est estimée par une approche BEM pour une tranche de la voie, pour chaque nombre d'onde k_y et la réponse totale est recomposée par transformée de Fourier inverse en espace, en sommant sur les k_y ;
- la rugosité est décomposée sur la base des k_y ;
- la voie est représentée par un ensemble de systèmes masses/ressorts/amortisseurs couplé au sol. Une modélisation par éléments finis de la plate-forme (couches d'assise de la voie) peut aussi être envisagée ;

- le comportement vibratoire du bâtiment peut être pris en compte par un modèle éléments finis du bâtiment, couplé au sol via ses fondations.
Ces modèles permettent d'estimer les vibrations dues au trafic ferroviaire. Pour obtenir une modélisation pertinente, il faut caractériser un grand nombre de paramètres pilotant les réponses dynamiques des différents systèmes : voie-sol-bâtiment.



Fig. 3 : Mesures sur site : à gauche, charge impulsionnelle par impact de marteau pour une caractérisation de sol par méthode MASW, au centre, distribution d'accéléromètres en champ libre pour une caractérisation de sol par méthode MASW, à droite, charge impulsionnelle sur le rail pour une mesure de réceptance de voie

Ainsi, pour déterminer le comportement du sol, les vitesses de propagation des ondes dans le sol sont mesurées par méthode MASW (figure 3, photographies de gauche et du centre). Le sol est excité via une charge impulsionnelle (chocs de marteau par exemple) et les niveaux accélérométriques sont mesurés à différentes distances du point d'impact.

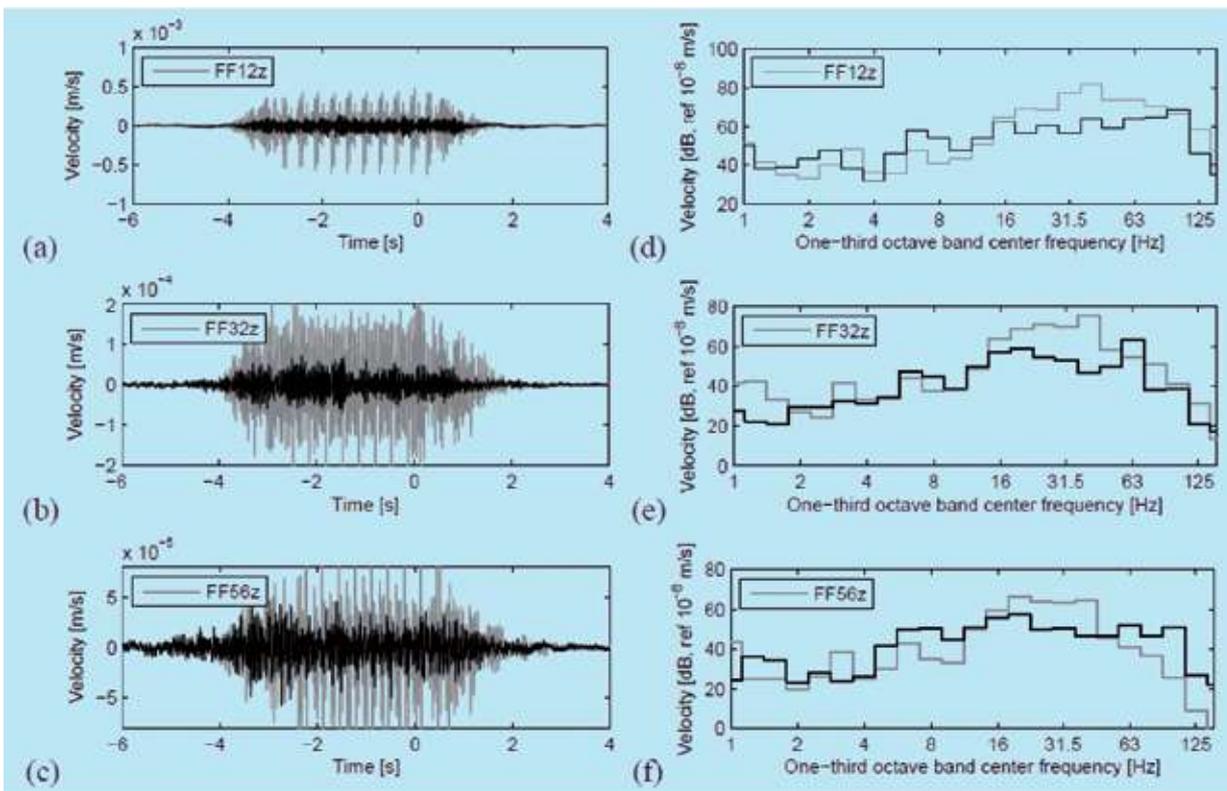


Fig. 4 : Comparaison de signaux temporels (a), (b) et (c), et de spectres 1/3 d'octave (d), (e) et (f), mesurés (en noir) ou simulés (en gris) en champ libre, à différentes distances de la voie (12 m, 32 m et 56 m respectivement), passage d'un TGVA à 200 km/h

Cela permet de déterminer la stratification du sol et la vitesse de propagation de l'onde de cisaillement dans chaque strate. Il faut noter que les valeurs de ces paramètres dépendent complètement du modèle numérique utilisé pour les optimiser.

Selon le même principe, les paramètres dynamiques de la voie sont estimés par des mesures de réceptances de voie (figure 3, à droite) : le choc est cette fois imposé sur le champignon du rail et les accélérations sont mesurées dans la direction transverse à la voie. Les paramètres de la voie sont alors optimisés, en utilisant un modèle numérique pour représenter la voie, de sorte que les accélérances simulées correspondent aux accélérances mesurées.

Si l'ensemble de ces paramètres est caractérisé, les simulations numériques fournissent des niveaux vibratoires cohérents avec les mesures sur site. Dans le cas illustré par la figure 4 (page précédente) [5], bien que les niveaux estimés par simulation soient trop faibles par rapport aux niveaux mesurés, le contenu spectral est respecté : le modèle correspondant peut donc être utilisé pour obtenir des niveaux relatifs et donc estimer l'impact de solutions placées sur la voie pour réduire les niveaux vibratoires en champ libre ou en bâtiment.

Comment agir ? les solutions de réduction

Les solutions de réduction peuvent être envisagées en différents points sur le chemin de propagation :

- Au niveau même de l'excitation, le meulage du rail permet de réduire les irrégularités de surface et ainsi de réduire l'effort d'interaction. Cependant, les longueurs d'onde de rugosité en jeu s'étendent de quelques centimètres à quelques mètres (3 m pour une vitesse de circulation égale à 100 km/h) : des défauts de surface de l'ordre du mètre de longueur d'onde relèvent davantage d'opération de relèvement de la voie que de meulage.

- Au niveau du véhicule, le maintien d'un bon état de surface des roues permettrait de réduire la rugosité combinée. Par ailleurs, des travaux de recherche sont en cours afin d'optimiser les suspensions primaires (lien entre essieu et bogie) et secondaires (lien entre bogie et caisse) pour réduire l'effort d'interaction roue/rail en jouant sur la souplesse du véhicule.

- Au niveau de la réponse dynamique de la voie, l'insertion de couches résilientes comme des semelles sous rail adaptées au problème des vibrations, des semelles sous traverses ou un tapis résilient sous ballast permettent à la fois d'agir sur la mobilité en champ libre (rapport entre l'excitation du rail et les niveaux vibratoires en champ libre) mais aussi sur l'effort d'interaction roue/rail (pilote par la combinaison des souplesses de la voie et du véhicule avec la rugosité). Aujourd'hui, seul le tapis sous ballast, figure 5, est efficace face aux vibrations très basse fréquence (en dessous de 30 Hz).

- Au niveau du chemin de propagation, des solutions de types tranchées ou un mur enterré (afin d'assurer une rupture d'impédance entre le sol et cette tranchée), entre la voie et le bâtiment peuvent être envisagées.



Fig. 5 : Pose d'un tapis sous ballast lors d'un renouvellement complet d'une voie

- Au niveau du bâtiment, les techniques sont les mêmes que celles mises en œuvre pour des sollicitations de type sismiques : il faut isoler les fondations des bâtiments. Cependant, le domaine d'efficacité de ces isolations n'est pas le même que pour des sollicitations sismiques : dans le cas d'une sollicitation ferroviaire, les fréquences de vibration sont plus élevées et les niveaux bien moindres.

Conclusion

Les vibrations dans le sol jouent un rôle grandissant dans l'empreinte environnementale du transport ferroviaire de surface. RFF et la SNCF ont conjointement mené des travaux de recherche afin de cerner l'ensemble des phénomènes en jeu. Face à une problématique où chaque configuration est unique (fonction de la voie, des véhicules, du sol et du bâtiment), il a fallu, plus que de chercher une solution universelle, développer une méthodologie permettant de proposer des solutions adaptées à chaque cas. Pour ce faire, des méthodes de caractérisation du sol et de la voie ont été testées et la pertinence d'une approche numérique a été validée. Dans les 3 années à venir, le projet européen RIVAS (7e PCRD) va permettre de mettre en œuvre cette méthodologie et de tester en ligne des solutions ainsi obtenues.

Références bibliographiques

[1] Villot M., CSTB, Les réglementations, les normes et les référentiels concernant les vibrations et leur mesurage, Acoustique et Techniques 64, 2011

[2] Norme ISO 2631-1 :1997 : « Vibrations et chocs mécaniques, évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 1 : Spécifications générales »

[3] Norme allemande DIN 4150-2 (juin 1999) : « Structural vibration - Part 2: Human exposure to vibration in buildings »

[4] Bongini E., Guigou C., Petit, Poisson F., Ropars P., Villot M., Specificities of ground vibrations induced by freight traffic, from the track to a building, International Workshop on Railway Noise 2010, Nagahama, Japan

[5] Lombaert, Degrande G., Galvin, Bongini E., Poisson F., A comparison of predicted and measured ground vibrations due to high speed, passenger, and freight trains, International Workshop on Railway Noise 2010, Nagahama, Japan