

Mise en place d'une démarche holistique pour lutter contre les vibrations dues au trafic ferroviaire

**Estelle Bongini,
B. Faure**

SNCF Innovation et Recherche
40 avenue des Terroirs de France
75012 Paris
E-mail : estelle.bongini@sncf.fr

Anne Guerrero

SNCF Réseau
Direction du Développement Durable
92, avenue de France
75013 Paris
E-mail : anne.guerrero@rff.fr

Les vibrations causées par le trafic ferroviaire et impactant les bâtiments voisins des voies ferrées sont un sujet de préoccupation grandissante en termes d'impact environnemental : des plaintes de plus en plus nombreuses associent cette nuisance au bruit direct généré par le passage des trains.

L'enjeu face à cette problématique est de dimension européenne, à l'image du projet collaboratif européen RIVAS¹ qui a réuni vingt-cinq partenaires (exploitants ferroviaires, industriels, académiques) autour de la recherche de solutions de réduction des vibrations dans le sol. Au cours de ce projet, de nombreuses solutions ont été optimisées et testées. Cela a permis d'établir un catalogue non exhaustif de solutions et de développer des « bonnes pratiques » pour leur dimensionnement en fonction du site d'implantation.

Le problème des vibrations dans le sol générées par le trafic ferroviaire est complexe car les caractéristiques des vibrations perçues dans les bâtiments par les riverains dépendent :

- De la source, ou effort dynamique au point de contact roue/rail, celle-ci étant elle-même pilotée par :

- Le comportement du train (masses non suspendues des essieux),
- La réponse dynamique de la voie (type de pose de voie, traverses bois ou béton, épaisseur de la couche de ballast, nature des sous-couches),

- La nature des défauts au contact (irrégularités de surface des roues ou de la voie, irrégularités géométriques de la voie)
- Du milieu de propagation : nature du sol et éléments constitutifs en présence sur le chemin de propagation des ondes (présence de bâtis, parkings, tunnels, égouts, câbles...)
- Du/des bâtiments concernés par l'émission vibratoire (type de construction, profondeurs des fondations, matériaux, épaisseurs des parois...)

L'ensemble de ces paramètres permet de déterminer quels sont la/les gammes fréquentielles critiques (celles présentant les pics d'énergie vibratoire) et les niveaux vibratoires associés. La ou les solutions anti-vibratiles proposées devront donc être efficaces dans la bonne gamme de fréquences, avec un niveau de performance suffisant. A noter que pour des voies de surface, il faut être vigilant quant à l'impact acoustique de la solution anti-vibratile retenue, de sorte qu'elle n'amplifie pas le bruit émis par la voie.

La « bonne » solution doit être proposée en prenant en compte tous ces éléments : à cette fin, SNCF met en place une démarche intégrée pour le développement de solutions anti-vibratiles.

¹-Le projet RIVAS est décrit page X du présent numéro

Prescriptions des performances d'une solution anti-vibratile

La majorité des études actuellement réalisées dans le cadre d'expositions vibratoires fixent le niveau de performance des solutions anti-vibratiles comme la réduction requise pour que les niveaux vibratoires après correction soient en-dessous du seuil de perception vibratoire dans les bâtiments. Ce seuil de perception (moyenne des niveaux vibratoires sur le passage d'un train dans la gamme de fréquence [8Hz ; 80Hz]) pour des bâtiments résidentiels est fixé dans la norme ISO 10137 [1] à 72 dB(v) le jour et 69 dB(v) la nuit. Par ailleurs, le bruit re-rayonné par les parois doit lui aussi être maîtrisé et le seuil de 30 dB(A) de bruit dans les bâtiments est considéré [2], soit pour le Leq moyenné sur les périodes [6h – 22h] et [22h – 6h] soit pour le niveau acoustique moyenné au cours d'un passage de train, Leq_{TP}.

Au cours du projet RIVAS, des nouveaux indicateurs de performance ont été proposés qui prennent en compte quatre descripteurs d'exposition [3] : le niveau maximum vibratoire au passage (Lv Wm slow max); le niveau vibratoire moyenné sur 24h (Lv Wm eq 24h); le niveau maximum de bruit re-rayonné au passage (Lp A slow max); le niveau de bruit re-rayonné moyenné sur 24h (Lp A den24h). Pour chacun de ces descripteurs, des courbes dose-réponse issues de la littérature ont permis de déterminer trois gammes de niveaux telles qu'illustrées Figure 1 : la zone verte correspond à des niveaux inférieurs, pour les quatre indicateurs, aux niveaux correspondants à 5 % de la population très gênée ; la zone jaune à des niveaux égaux aux niveaux correspondants à 5 % de la population très gênées et jusqu'à des niveaux supérieurs de 10 dB à ces niveaux seuil ; et la zone rouge s'étend au-delà de ces niveaux seuils + 10 dB.

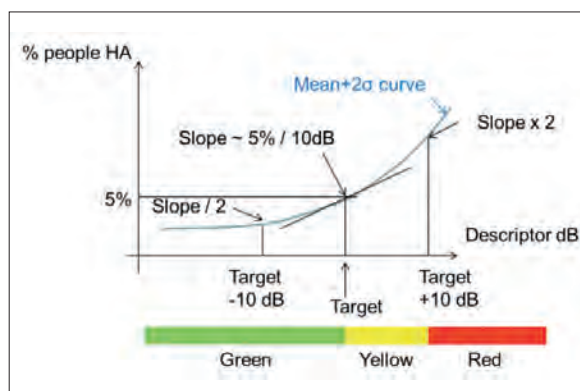


Fig. 1 : Classification des indicateurs de performance en fonction des courbes dose-réponse de référence présentant le désagrément (nombre de personnes très gênées), valable pour des niveaux vibratoires/acoustiques, long terme/court terme
 Performance ranges for the indicators base on idealized exposure-response curve used in RIVAS; main features

Les indicateurs de performance proposés dans RIVAS sont présentés en parallèle, en fonction des quatre descripteurs.

Ces quatre indicateurs présentent l'avantage de prendre en compte le désagrément vibratoire et acoustique sur des niveaux court et long termes, comme illustré en Figure 2.

Descriptor	Before		After		Difference	
	dB	% MHA	dB	% MHA	dB	% MHA
Lv Wm slow max	76	23	74	19	-2	-4
Lv Wm eq 24h	52	7	50	6	-2	-1
Lp A slow max	57	42	41	13	-16	-29
Lp A den 24h	33	11	20	3	-14	-8

Fig. 2 : Évolution des performances sur les quatre indicateurs avant et après l'emploi d'une tranchée souple entre la voie et un bâtiment donné, pour un sol dur [ref RIVAS 1.9]
 Performance before and after a soft barrier installation on a site with hard soil, for a given building

Cependant, les courbes dose-réponse exploitées ne sont pas établies pour des situations d'exposition conjointe au bruit et aux vibrations et ainsi aucune notion de désagrément global n'est prise en compte.

Ces seuils ou descripteurs de perception permettent donc d'établir des cibles de niveaux vibratoires et acoustiques. Afin de déterminer le niveau de performance des solutions anti-vibratiles requis pour atteindre ces cibles, il est nécessaire d'évaluer la criticité de la situation avant leur mise en place. Deux cas de figure se présentent alors : le site étudié n'est pas encore soumis à des problèmes vibratoires (voie ou bâtiment à construire) et les solutions seront de nature préventive ; le site est déjà soumis à des problèmes d'émissions vibratoires et les solutions seront de nature palliative. Chacun de ces cas de figures fait appel à une démarche propre pour définir les performances des solutions anti-vibratiles.

Prescrire une solution préventive

C'est le cas de figure typique d'une étude d'impact préalable à une construction de voie nouvelle ou une modification de ligne (doublement de voie par exemple). L'exposition vibratoire sur le site n'étant pas mesurable, son évaluation nécessite l'emploi d'outils de prédiction basés sur des approches empirique et/ou numérique ainsi que l'étude de sites qui présentent des caractéristiques voisines. Dans le cas d'une construction de nouveaux bâtiments aux abords des voies, la source des vibrations existe mais pas le récepteur (i.e. le bâtiment). Une approche numérique, ou empirique, permet alors de prédire le comportement vibratoire de ces futurs bâtiments, afin de les coupler à des mesures de niveaux vibratoires en champ libre au passage des trains.

L'approche numérique dans le domaine des vibrations dans le sol requiert des outils spécifiques permettant de combiner des modèles :

- Du comportement vibratoire de la source : prise en compte des défauts de surfaces des sous-systèmes en contact (roue/rail), génération de l'effort d'interaction, calculs des niveaux vibratoires subis par les différents composants de la voie (rail, traverse, sous-couches) au passage d'un train ;
- De propagation des ondes dans le sol : prise en compte d'un milieu semi-infini stratifié, calcul des niveaux vibratoires générés en surface à n'importe quelle distance de la voie ;
- Du comportement vibratoire des bâtiments : calcul des modes propres du bâtiment et de sa réponse vibratoire à une excitation donnée.

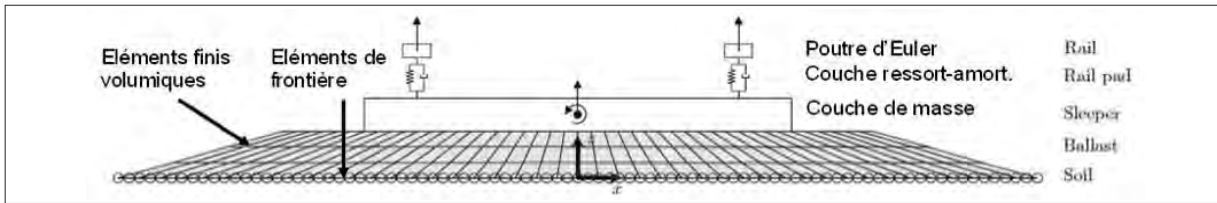


Fig. 3 : Section transversale du modèle FEM-BEM utilisé dans le logiciel TRAFFIC ©
 Transverse section of the FEM-BEM model used in TRAFFIC software ©

Les deux premières étapes présentées ci-dessus font en général appel à des codes de calcul Éléments Finis couplés à des Éléments Finis de Frontière, où la périodicité de la structure (voie et sol) le long de la voie ferrée permet de simplifier le modèle à un modèle 2D½ comme illustré en Figure 3 (le comportement vibratoire de la structure est calculé dans une tranche de structure 2D transverse à la voie ferrée ; une fois la réponse de cette tranche de voie calculée en 2D, elle est projetée sur la 3e dimension, le long de la voie, par une transformation de Fourier spatiale inverse ; c'est l'approche employée dans le logiciel TRAFFIC développé par K.U.Leuven [4]). La troisième étape peut requérir un modèle Éléments Finis 3D du bâtiment.

Il est à noter que les codes de calcul actuellement utilisés pour la problématique des vibrations dans le sol ne prennent pas en compte l'hétérogénéité des sols (hétérogénéité des matériaux qui le composent) et les modèles 2D ½ utilisés ne permettent pas de considérer une structure non périodique le long de la voie. Dès lors, une approche numérique pour une propagation des vibrations en milieu urbain, où beaucoup de bâtis annexes se trouvant sur le chemin de propagation ne seront pas pris en compte, présentera de grands niveaux d'incertitude dans les résultats de calcul.

Afin de rendre plus robuste l'évaluation des niveaux vibratoires, des mesures et données empiriques peuvent venir compléter l'analyse. Typiquement, les fonctions de transfert

vibratoires entre le site d'implantation de la future voie et les bâtiments ou inversement entre la voie existante et le site d'implantation des futurs bâtiments peuvent être mesurées, comme illustré en Figure 4, ce qui permet de quantifier les risques d'amplification des vibrations par certains sols et certains couplages sol/bâtiments. Par ailleurs, des abaques sur les réponses vibratoires des bâtiments peuvent aussi être utiles lors de l'estimation des émissions vibratoires (vibrations et bruit re-rayonné) transmis dans les habitations lorsqu'on connaît les niveaux vibratoires au pied des futurs bâtis. Ces approches combinées doivent permettre d'établir la criticité du site en termes d'émissions vibratoires.

Prescrire une solution palliative

Le second cas de figure pour lequel des solutions vibratoires doivent être identifiées concerne des zones pour lesquelles les niveaux vibratoires constatés chez le riverain sont trop élevés. Dans ce cas, la voie et le bâtiment existent, ce qui permet de mesurer chez les riverains les niveaux vibratoires induits par les passages de trains et d'identifier ainsi les fréquences problématiques et les gains de performances à envisager.

On s'attachera aussi à effectuer une visite détaillée de la voie au droit des bâtiments afin de vérifier la présence d'éléments de conception pouvant être générateurs de vibrations (comme les joints de rail, les appareils de voie).

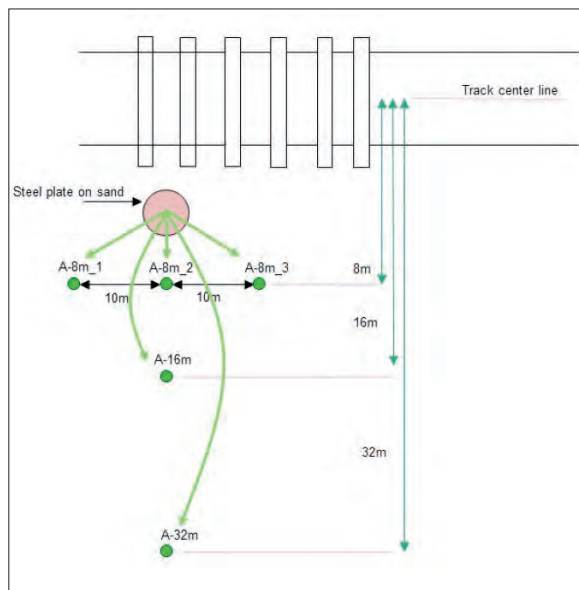


Fig. 4 : Mesure des fonctions de transfert entre la voie et le champ libre à proximité de la voie, impact au marteau sur la voie et sur un socle en acier en bord de voie
 Transfert functions measurement between the track and free-field, the track and the ground near to the track are loaded with hammer

On s'attachera aussi à effectuer une visite détaillée de la voie au droit des bâtiments afin de vérifier la présence d'éléments de conception pouvant être générateurs de vibrations (comme les joints de rail, les appareils de voie). La mesure de l'exposition et la description détaillée de la voie permettent d'établir la criticité du site en termes d'émissions vibratoires.

Une fois la criticité du site évaluée (en termes d'émissions vibratoires) et comparée aux indicateurs de performance mentionnés dans le paragraphe précédent, des niveaux de performance de solutions anti-vibratiles sont prescrits. Ces prescriptions feront partie du cahier des charges des solutions, au même titre que leurs performances « ferroviaires » : influence sur le comportement de la voie (tenue latérale, déflexion sous charge), tenue dans le temps, maintenabilité, prix. Dans le cas de solutions palliatives, la nature des mesures anti-vibratiles est contrainte par l'antériorité des structures : il peut être complexe de modifier la voie ou les bâtiments existants. La sélection de la « meilleure » solution anti-vibratile revient donc à mettre en regard ce cahier des charges et les performances annoncées de chaque solution. Il est donc nécessaire de caractériser ces performances.

Caractérisation des solutions anti-vibratiles

Les cas d'étude développés dans le projet RIVAS ont permis de mieux cerner l'ensemble des étapes à respecter pour caractériser d'un point de vue vibratoire une solution de

réduction, résumées dans [5]. Dans la suite, on présentera ces étapes pour les solutions anti-vibratiles mises en place dans la voie ferrée comme les semelles sous rail très souples, dont l'expérimentation est détaillée dans [6].

Evaluation numérique des performances d'une solution

Une première étape consiste à évaluer numériquement ces performances. Les outils numériques évoqués dans le paragraphe précédent (couplage Éléments Finis et Éléments Finis de Frontière dans un modèle 2D 1/2) permettent de calculer, par exemple, l'impact d'un assouplissement de la voie sur les niveaux de vibrations induits en champ libre, et ceci en considérant différents types de sol.

Ces résultats renseignent sur la fréquence de coupure des solutions i.e. la fréquence au-delà de laquelle les vibrations sont réduites. Ils permettent aussi d'évaluer, dans le cas de solution de type assouplissement de la voie, l'effet d'amplification des vibrations à la fréquence de résonance du système.

La figure 5 illustre ainsi les résultats de simulation numériques réalisées dans le projet RIVAS pour évaluer les performances du système d'attache DFC pour lequel différentes raideurs équivalentes du systèmes sont testées, de 25MN/m à 300MN/m. L'attache DFC ou DFC VIPA, pour Double Fast Clip développé par Pandrol, est un système d'attache du rail sur la traverse permettant d'avoir deux couches d'élastomère, entre le rail et la selle en fonte du système, et entre la selle en fonte et la traverse, comme illustré en figure 6 : selon le couple de semelles utilisées, la raideur apparente du système global couvre une très large gamme.

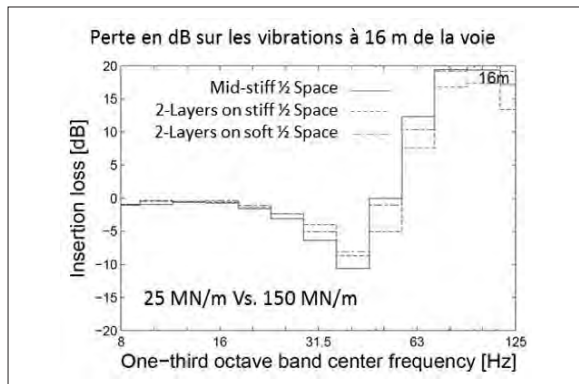
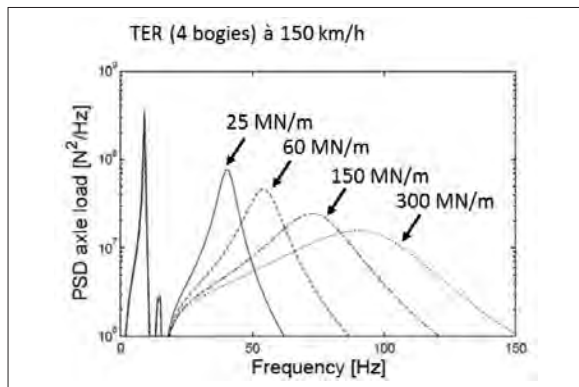


Fig. 5 : Évaluation de l'effort dynamique au contact roue/rail et de la perte par insertion pour différentes raideurs de semelles sous rail, calculs menés avec le code TRAFFIC © Dynamic load at wheel/rail contact assessment and insertion loss for various under-rail pad stiffness, calculated with TRAFFIC© software

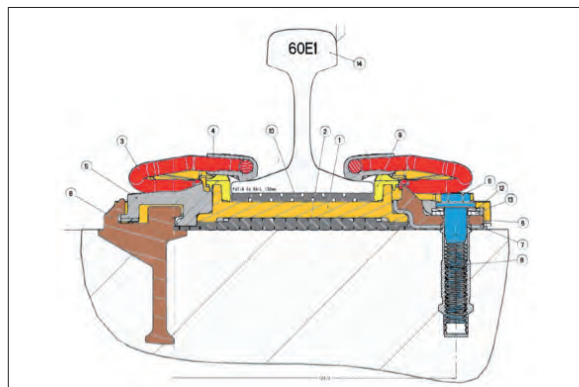


Fig. 6 : Système d'attache DFC (Double Fast Clip) ou DFC VIPA © Pandrol Rail fastening system DFC (double Fast Clip) or DFC VIPA © Pandrol

On constate sur la figure 5, diagramme du haut, que la souplesse apportée dans le système d'attache permet de décaler la fréquence de résonance du système voie/essieu vers les basses fréquences.

La fréquence de coupure des vibrations est aussi décalée vers les basses fréquences (fréquence à partir de laquelle les vibrations sont réduites) et les niveaux de performances de la solution sont très peu dépendants du type de sol support, Figure 5 diagramme du bas.

Cette étape de modélisation numérique permet d'effectuer une première sélection des solutions qui pourront correspondre à notre cahier des charges. Avant d'être mises en voie, celles-ci devront subir un certain nombre de tests via des essais en laboratoire et des essais en voie.

Tests en laboratoire : homologation et nouvelle méthode de caractérisation des éléments résilients

Avant toute mise en service, un nouvel organe de voie (comme des semelles sous traverses ou des systèmes d'attache de rail autorisant de faibles raideurs sous rail) doit être soumis à des tests d'homologation consistant à vérifier : la tenue latérale du système avec ce nouvel élément (comme illustré Figure 7), son enfoncement vertical, la tenue dans des conditions climatiques extrêmes (brouillard salin, tests en enceinte climatique avec des variations de température), et la tenue à 1 million de cycles de sollicitations (l'effet sur une semelle sous traverse est montré Figure 8). Pour les semelles sous traverses des tests d'arrachements entre la semelle et la traverse sont aussi réalisés.

D'autre part, les raideurs statiques et quasi-statiques (cycles de charge-décharge à 5 Hz et 20 Hz) des éléments résilients testés (semelles sous rail, semelles sous traverses ou tapis sous ballast) sont évaluées.

En complément de ces tests d'homologation et dans le cadre d'une collaboration entre le département d'Innovation et Recherche et le Centre d'Essai Voie de SNCF, de nouveaux tests sont en cours d'élaboration pour caractériser les raideurs dynamiques vibratoires des éléments résilients. Il s'agit d'obtenir les raideurs de ces éléments lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations représentatives des sollicitations dynamiques hautes fréquences telles que celles subies en voie ferrée. Ces raideurs pourront être utilisées dans les

simulations numériques présentées ci-avant et seront particulièrement significatives pour évaluer les performances anti-vibratiles de nos systèmes.

Test *in situ* pour homologation et vérification des performances

La dernière étape, à la fois pour l'homologation de nos systèmes et pour l'évaluation de leurs performances en termes de réduction des vibrations consiste à les tester en voie. Pour les besoins de l'homologation, les systèmes feront l'objet d'une surveillance dédiée pendant 2 ans après leur pose en voie, avec une attention particulière quant à leur vieillissement, la tenue de leurs performances dans le temps. Pour les besoins de leur qualification « anti-vibratiles », des essais dédiés sont réalisés en bord de voie afin de caractériser les pertes vibratoires par insertion.

Selon le protocole développé dans le projet RIVAS, cette perte par insertion doit, autant que faire se peut, être quantifiée par des mesures avant/après la pose des solutions anti-vibratiles, et par des mesures sur le site test et sur un site de référence adjoint ayant les mêmes caractéristiques de propagation (Figure 9, page suivante).

De nombreux points de mesures vont permettre de quantifier cette perte par insertion, tant au niveau des éléments de la voie (accéléromètre sur le rail, les traverses) qu'en champ libre à différentes distances de la voie (trois points de mesure d'accélération verticale à 8m, puis des points de mesure d'accélération verticale à 16m et 32m, en fonction de la typologie du site). Les mesures d'accélération en champ libre doivent être interprétées (voire corrigées) en considérant l'effet de site c'est-à-dire l'influence du sol en présence. Typiquement pour les essais réalisés par la SNCF dans le projet RIVAS, entre les 2 sites de test et de référence distants de 100m, des sols de comportements dynamiques très différents ont été identifiés, illustrés Figure 10, page suivante.

Les systèmes DFC VIPA ont ainsi été testés en voie dans l'Est de la France, à proximité de Florange, pour trois configurations différentes de l'attache, correspondant à trois raideurs apparentes : Valiant 1 à 75MN / m ; Valiant 2 à 45 MN/m et Valiant 3 à 25 MN /m.



Fig. 7 : Test de systèmes d'attache DFC, à la résistance latérale du système par bielle inclinée
Homologation tests for rail fastening system, measurement of lateral resistance with tilted rod



Fig. 8 : Empreintes de ballast sur des semelles sous traverses après tests de tenue dans le temps
Ballast prints after on under sleeper pads after 1 million load cycles

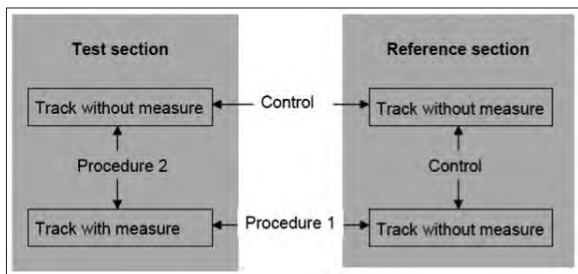


Fig. 9 : Protocole de mesure de la perte par insertion, procédure du projet RIVAS
Measurement protocol for the insertion loss assessment, according to RIVAS project

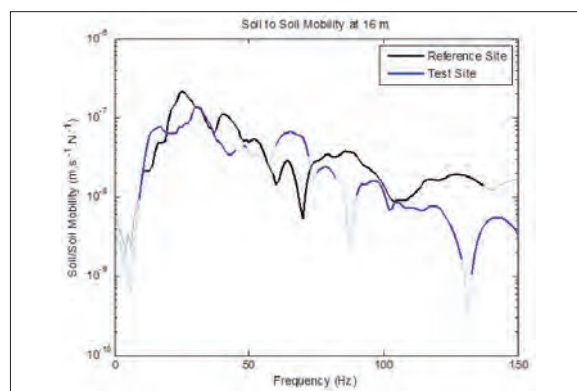
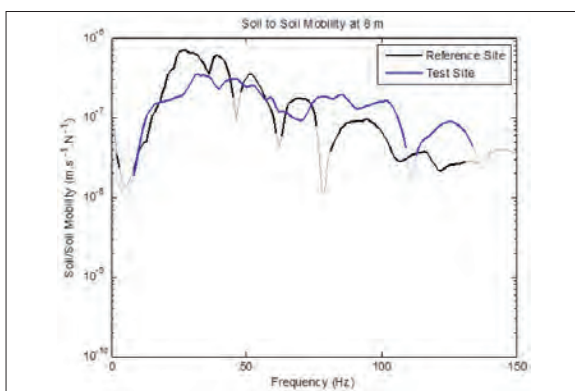
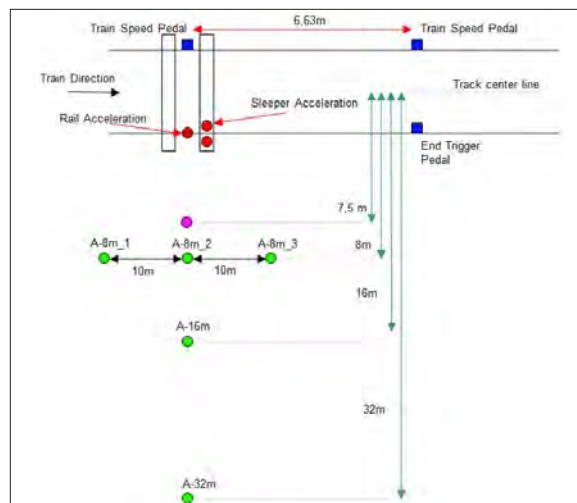


Fig. 10 : Mobilités sol-sol (fonction de transfert entre le bord de voie et les points de mesure accélérométriques) à 8 m (figure de gauche) et 16 m (figure de droite) de la voie, pour le site de référence en noir et le site de test en bleu
Moil-soil mobility (transfer function between a loading point located close to the track and free-field measuring accelerometers) at 8 m (left diagram) and 16 m (right diagram) from the track, for the reference site, black line, and the testing site, blue line

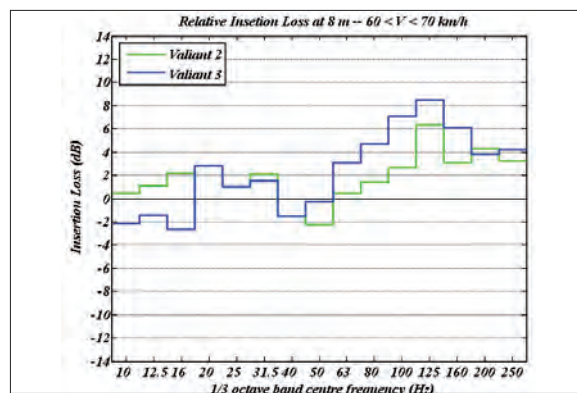
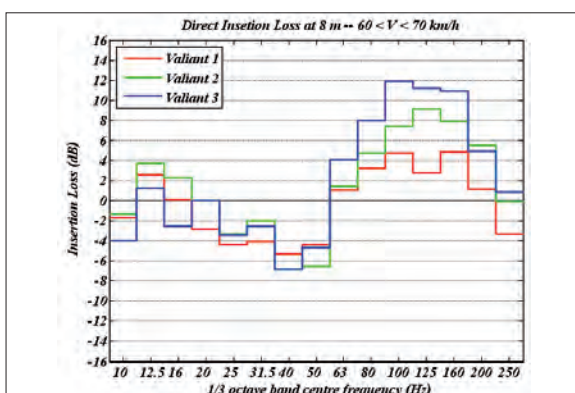


Fig. 11 : Perte par insertion avec les systèmes DFC, Valiant 1, 2 et 3. Pertes par insertion absolues par rapport à la situation nominale (diagramme de gauche), et relative entre les configurations Valiant 2 et Valiant 3 (diagramme de droite)
Insertion loss with DFC Valiant system 1, 2 and 3. Absolute insertion loss compared to the nominal case (left diagram) and relative insertion loss between Valiant 2 and Valiant 3 (right diagram)

Les essais réalisés ont donc permis de confirmer la perte par insertion au-delà de 50 Hz pour ce type de solutions anti-vibratiles, comme illustré sur le diagramme de gauche de la figure 11, en accord avec les résultats des simulations numériques. Le diagramme de droite permet de quantifier le gain obtenu entre deux configurations du système Valiant 2 et Valiant 3 : la fréquence de résonance est bien décalée vers les basses fréquences lorsque la raideur de

l'attache diminue et le niveau de performances anti-vibratiles au-delà de la fréquence de coupure est amélioré. Ces essais en voie sont une étape indispensable, tant pour homologuer des systèmes anti-vibratiles que pour compléter l'analyse de leur comportement et de leur influence sur les vibrations induites, au moment des essais et dans le temps (effet du vieillissement sur les performances).

Conclusions

Face à la problématique des vibrations induites dans le sol par le trafic ferroviaire, une approche intégrée est en cours de développement au sein de SNCF, entre le département d'Innovation et Recherche et SNCF Réseau, basée en grande partie sur l'expérience acquise au sein du projet collaboratif RIVAS ainsi que les projets antérieurs menés à la demande de RFF. La démarche ainsi mise en place va permettre de mieux cibler les solutions anti-vibratiles en fonction de la criticité d'un site d'un point de vue des émissions vibratoires. En parallèle, SNCF a dernièrement engagé un travail consistant à étoffer son catalogue de solutions afin de mieux répondre aux exigences des situations particulières.

Références bibliographiques

[1] Norme ISO 10137 : Bases du calcul des constructions -- Aptitude au service des bâtiments et des passerelles sous vibrations, ISO Standard

[2] Borden of disease from environmental noise, Quantification of healthy life years lost in Europe, rapport OMS 2011

[3] Villot M., Bailhache S., Evaluating the mitigation measures developed in WP2-5 in terms of decrease of exposure and annoyance, RIVAS deliverable 1.9, 2013

[4] François S., Schevenels M., Lombaert G., Galvin P., Degrande G., A 2.5D coupled FE-BE methodology for the dynamic interaction between longitudinally invariant structures and a layered halfspace. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(23-24) :1536-1548, 2010

[5] Bongini E., Müller R., Garburg R., Pieringer A., Design guide and technology assessment of the track mitigation measures, RIVAS Deliverable 3.13, 2014

[6] Faure B., Bongini E., Nelain B., Optimisation of the fastening system and the sleeper: results of the measurement campaign on commercial track, RIVAS deliverable 3.10, 2013

