

Infrastructure ferroviaire : bruit émis par les matériels roulants ferrés et pneumatiques

Corinne Fillol

RATP
Pôle de recherche et d'ingénierie en Acoustique & Vibrations
54, quai de la Rapée
75599 Paris CEDEX 12,
E-mail : corinne.fillol@ratp.fr

Franck Poisson

SNCF
Direction Innovation & Recherche
40, avenue des terroirs de France
75611 Paris CEDEX 12,
E-mail : franck.poisson@sncf.fr

Résumé

Le bruit des transports terrestres peut être une source de gêne pour les riverains des infrastructures. L'impact sur la santé est aussi à considérer. Les différents acteurs du monde des transports (constructeurs de matériel roulant, responsables d'infrastructures, transporteurs, autorités organisatrices) se mobilisent pour lutter contre le bruit. L'article rappelle la réglementation en vigueur et présente le traitement des plaintes. Les différentes sources de bruit sont détaillées et les principales solutions de réduction sont présentées.

Summary

Transportation noise may cause annoyance for residents who are leaving close to the infrastructures. Health impact must be also considered. Stakeholders of the transport like rolling stock manufacturers, infrastructure managers, operators, public authorities are dealing with the transportation noise. Legislation and standards are presented in the article. Complaints treatment is also investigated. Noise sources are detailed and the main noise reduction solutions are depicted.

Selon l'OMS, environ un million d'années de vie « en bonne santé » sont perdues chaque année [1]. Mis en cause : le bruit des transports et principalement celui de la circulation routière. De plus, il émerge, des dernières enquêtes d'opinion (ORS 2009, TNS SOFRES 2010, OMS 2011, INSV/MGEN 2013) un changement de paradigme : celui de la prise en compte des conséquences sanitaires du bruit ; constat corroboré par de nombreuses études scientifiques, avis ou rapports techniques publiés dès 2010¹.

Le bruit dans l'environnement n'est donc plus considéré ou à considérer comme une nuisance mais comme un problème de santé publique.

À ce jour, le bruit tant aérien que solidien est un des aspects les plus significatifs de l'impact environnemental du transport ferroviaire. Des projets comme celui de la Société du Grand Paris (www.societedugrandparis.fr) en Île de France ou Crossrail pour le grand Londres (www.crossrail.co.uk) suscitent une attention particulière des futurs riverains sur le bruit et les vibrations générés en urbain dense. Ainsi, de nombreuses initiatives, intégrant les aspects réglementaires, techniques, économiques et sociétaux, ont été prises par et pour le mode ferré afin de développer durablement ses activités.

La réglementation

En matière de réduction des impacts acoustiques des infrastructures de transports ferroviaires, la réglementation implique à la fois l'exploitant du matériel roulant, le gestionnaire de l'infrastructure et tout bâtisseur qui construit aux abords des voies ferrées. Ainsi, les nombreux textes réglementaires ont été élaborés sur la base des dispositions de la loi « bruit » de 1992, pour protéger les riverains.

Les opérateurs ferroviaires faisant circuler des trains sur le réseau ferré européen doivent respecter les dispositions prévues par les spécifications techniques d'interopérabilité (STI). Le bruit est ainsi limité à la source par cette réglementation qui s'applique à tous les matériels roulants neufs ou ayant fait l'objet de modifications importantes (rénovation par exemple). Pour des vitesses de circulation inférieures à 250 km/h, les STI « Trans European Conventional rail system, Subsystem Rolling stock – Noise » de 2009 limitent le bruit au passage, à l'accélération et à l'arrêt.

¹-Quelques exemples : « *Bruit des transports, influence de la structure temporelle sur la gêne, les performances cognitives et le sommeil – projet RAPS (DEUFRAKO, 2010)* », « *Good practice guide on noise exposure and potential health effects* » (European Environment Agency, 2010), « *Rapport d'information, n°3592, sur les nuisances sonores* » (Assemblée Nationale, 2011), « *Evaluation des impacts sanitaires extra - auditifs du bruit environnemental* » (ANSES, 2013), etc.

Pour des vitesses de circulation supérieures à 250 km/h, la Directive européenne « 96/48/EC - Interoperability of the trans-European high speed rail system - Technical Specification for Interoperability - Rolling stock - Sub-System, 1996 » est appliquée. Les niveaux de bruit sont mesurés conformément à la norme EN ISO 3095 « Applications ferroviaires – Acoustique - Mesure du bruit émis par les véhicules ferroviaires » de 1995.

Le niveau de bruit d'un train dépend des caractéristiques intrinsèques du matériel roulant (rugosité des roues, auxiliaires, pantographe, etc.) mais aussi des performances acoustiques de la voie circulée (armement, rugosité du rail, etc.). Ces dernières font l'objet, dans la norme EN ISO 3095, d'un gabarit à respecter pour s'assurer que lors des mesures au passage, la contribution acoustique de la voie est bien inférieure à celle du matériel roulant à caractériser.

Pour tous les autres matériels roulants ferrés ou pneumatiques (systèmes guidés et métros sur pneus) ne circulant pas sur le réseau ferré national (faisceau industriel, métropolitain, tramway, etc.), les niveaux de bruit sont limités :

- directement par le cahier des charges de l'exploitant du réseau concerné (opérateurs ferroviaires et/ou autorités organisatrices) ;
- indirectement par les parties prenantes (clientèle, riverains, élus, associations, etc.) ;
- indirectement par la directive européenne 2002/49/CE et son ordonnance n° 2004-1199 du 12 novembre 2004 qui a été ratifiée par la loi n°2005-1319 du 26 octobre 2005.

La réglementation applicable au gestionnaire de l'infrastructure pour limiter les nuisances sonores s'articule autour de deux axes, l'un préventif² et l'autre curatif³ :

- la prise en compte des nuisances sonores lors de la construction d'une infrastructure nouvelle, ou de la modification/transformation significative d'une infrastructure existante. Les protections doivent être calculées en fonction du trafic prévisible à 20 ans et être réalisées avant la mise en service. Leurs performances tiennent compte de l'ambiance sonore préexistante (qualifiée de modérée ou de non modérée). Si une protection à la source n'est pas possible, un traitement en façade est admis ;
- le classement des infrastructures de transports qui fait l'objet d'arrêtés qui stipulent :
 - les secteurs situés au voisinage des infrastructures « classées » qui sont affectés par le bruit ;
 - les nuisances sonores que les entrepreneurs sont tenus de prendre en compte pour la construction de nouveaux bâtiments ;
 - les isolements acoustiques de façade requis.
- le rattrapage de Zones de Bruit Critiques (ZBC) ou de Points Noirs du Bruit (PNB) le long des infrastructures existantes. Le principe est d'engager des travaux de protection lorsque le niveau de bruit dépasse les seuils réglementaires du tableau 1 à deux mètres en avant des façades. Ces travaux doivent permettre de ramener les nuisances au niveau jugé acceptable : 68 dB (A) de jour et 63 dB (A) de nuit pour les lignes dites classiques et 65 dB (A) de jour et 60 dB (A) de nuit pour les lignes à grande vitesse.

	L _{Aeq6h-22h}	L _{Aeq22h-6h}	L _{den}	L _n
Ligne à grande vitesse	70	65	68	62
Ligne classique (Régional, RER, tramway, métropolitain, etc.)	73	68	73	65

Tabl. 1 : Valeurs limites, en dB (A), définissant une zone de bruit critique ou un point noir bruit

Les riverains des infrastructures de transport ferroviaire sont par conséquent protégés, d'une part, par une réglementation européenne qui limite le bruit à la source (STI) et fixe une obligation de moyens (cartes de bruit, PPBE, informations...) et, d'autre part, par une réglementation nationale qui fixe une obligation de résultat chez le riverain. Toutefois, ces réglementations évoluent ; une harmonisation des valeurs seuils des STI rail conventionnel et grande vitesse est en cours. Une méthode européenne harmonisée de calcul des émissions et de la propagation sonore (CNOSSOS-EU) va être très prochainement proposée.

Un outil de diagnostic stratégique : le recensement et le suivi des plaintes des riverains

Marginales dans les années 60/70, un accroissement significatif des plaintes de riverains est apparu dans les années 80/90 (un exemple pour la RATP est donné Figure 1). Cette augmentation n'a pas pour origine une dégradation importante de la qualité des infrastructures mais elle traduit plutôt l'évolution de la sensibilité des riverains (multi-exposition, cumul des niveaux au cours d'une journée, effet socio-culturel, dégradation du cadre de vie, cadre législatif et réglementaire, etc.).

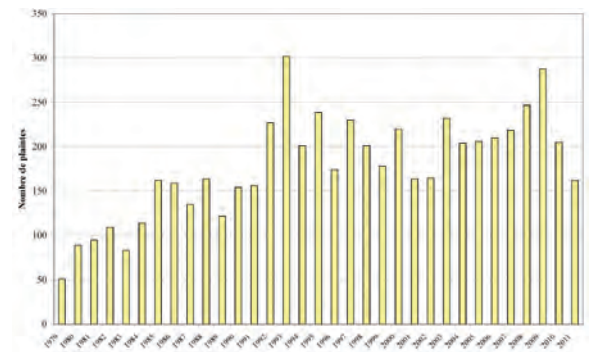


Fig. 1 : Évolution du nombre de plaintes reçues par la RATP concernant le réseau ferré

Ce constat qualitatif est, de plus, renforcé par le fait que les niveaux vibratoires et les bruits réémis relevés depuis une cinquantaine d'années dans les appartements de riverains habitant le long d'infrastructures de transports ferroviaires, varie de plus de 30 dB d'un lieu à l'autre, ce qui illustre bien le caractère personnel de la plainte et la nature diverse des conditions d'exposition en particulier en zone urbaine dense (nature du bâti, fondations, cavités, réseaux concessionnaires, etc.).

2-Code de l'environnement – article L122-1 et arrêté du 30 mai 1996 relatif aux modalités de classement des infrastructures de transports terrestres et à l'isolement acoustique des bâtiments d'habitation dans les secteurs affectés par le bruit 3-Circulaire du 25 mai 2004 relative au bruit des infrastructures de transports terrestres

Les plaintes ne résultent donc pas d'un dépassement d'un seuil limite admissible, scientifiquement établi, mais de l'aggravation d'une situation « jugée jusque-là supportable » par le riverain. Une attention particulière est donc apportée, par les divers gestionnaires et opérateurs ferroviaires, à chaque réclamation qui entraîne systématiquement une enquête technique et une réponse personnalisée.

L'analyse multi-critère des plaintes permet d'identifier que la première cause de déclenchement d'une plainte, tous modes confondus (rail conventionnel, tramway, métro, RER) est le bruit au passage et en particulier le bruit de roulement lorsque l'usure ondulatoire de la table de roulement du rail est particulièrement élevée (Figure 2).

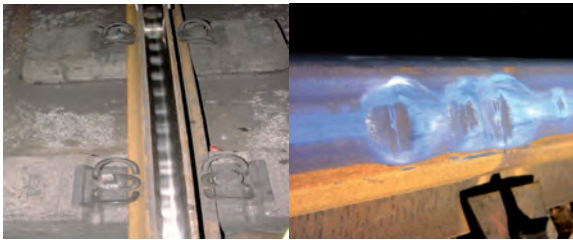


Fig. 2 : Usure ondulatoire sur une section de rail (à gauche) et défauts locaux de surface (à droite) (source RATP)

Viennent ensuite les chocs sur des joints et le passage d'appareils de voie puis toutes situations de roulement hors défauts (plat sur les roues...). Ces situations induisent des nuisances sonores tant aériennes que solidiennes. Il est à noter que, par leur nature, les lignes ferroviaires pneumatiques réduisent fortement l'excitation vibratoire (-15 à -20 dB) et engendrent peu de plaintes, dès lors qu'elles sont souterraines.

En urbain dense, l'exploitation des gares et des stations de métro est aussi incriminée à cause des sources de bruit des auxiliaires (train à l'arrêt), du crissement au freinage et des systèmes de sonorisation des gares aériennes. Outre l'analyse multi-critère, la géo-localisation des plaintes permet d'identifier des zones sensibles et d'organiser, par exemple, des occurrences optimisées de meulage préventif du rail (action avant relance des plaignants). Il apparaît clairement que l'arrêt prématuré du meulage sur un réseau renforce systématiquement le nombre de plaintes comme le montre la figure 1 en 2003. Le recensement et le suivi des plaintes des riverains permettent donc de prioriser les actions curatives mais aussi les actions d'ingénierie ou de recherche des différents acteurs de la communauté ferroviaire afin d'appréhender l'ensemble de phénomènes physiques de la génération du bruit, à sa propagation aérienne ou solidienne.

Les solutions de réduction

Hiérarchisation des sources de bruit

Selon la nature du matériel roulant (ferré, pneumatique, électrique, diesel, etc.) et des caractéristiques de la plateforme, différentes sources de bruit prédomineront selon la vitesse de circulation. Des mesures d'antennerie par exemple, permettent, de hiérarchiser les différentes sources constituant un matériel roulant (Figure 3).

Généralement, le bruit de motorisation et des divers équipements installés sur le véhicule tels que les systèmes de climatisation, de refroidissement, de transformation électrique, etc. sont les principales sources de bruit à l'arrêt et à basse vitesse. Le bruit de roulement devient alors rapidement prédominant en circulation excepté pour les métros sur pneus. Puis, au-delà de 320 km/h, c'est le bruit aérodynamique qui domine.

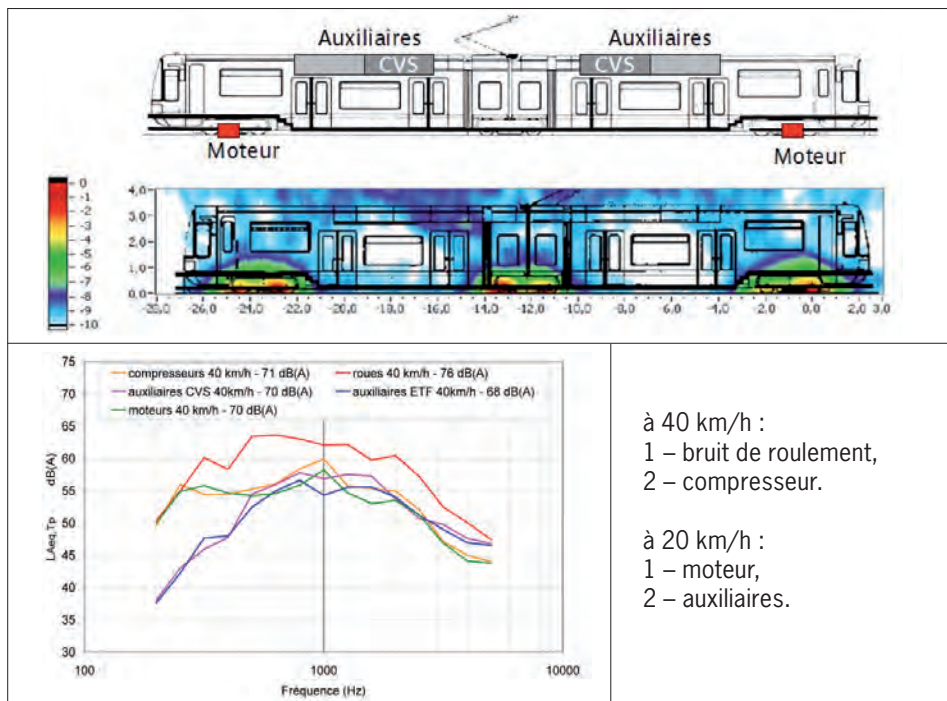


Fig.3 : Hiérarchisation des sources de bruit d'un Tramway Français Standard (TFS) par mesures d'antennerie (source RATP). Notations : CVS : Convertisseur auxiliaire statique, ETF : équipement traction / freinage.

La figure 4 présente l'évolution du niveau de bruit des matériels roulants ferrés en fonction de leur vitesse de circulation.

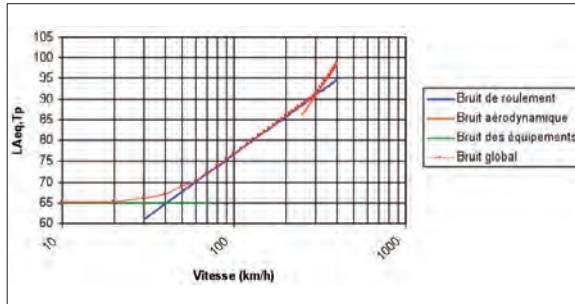


Fig. 4 : Évolution type du niveau de bruit, en dB (A), des matériels roulants ferrés en fonction de leur vitesse de circulation

Réduction à la source

Réduction du bruit de roulement

La réduction du bruit de roulement, généré selon la nature du matériel roulant, par le contact pneu-chaussée ou le contact roue-rail, nécessite :

- pour les matériels ferrés, de diminuer la rugosité du rail et/ou des roues, et/ou d'augmenter le taux de décroissance de l'énergie dans le rail ;
- pour les matériels pneumatiques, de diminuer les irrégularités de surface des pneumatiques et de la bande de roulement.

La **rugosité du rail** peut être améliorée par des opérations de meulage. Le meulage ou le fraisage des rails est principalement réalisé pour maintenir leurs caractéristiques géométriques mais permet aussi de réduire le niveau de bruit au passage. Selon les conditions de meulage (vitesse d'avance, caractéristiques de la meule, vitesse de rotation) et la dégradation plus ou moins rapide de l'état de surface du rail, une diminution de 3 à 10 dB (A) peut être obtenue. Mesure éphémère, elle nécessite un contrôle régulier de la rugosité du rail ou du bruit au passage pour déclencher les opérations de meulage.

La **rugosité de la roue** dépend du système de freinage équipant le matériel roulant. Pour les wagons fret et les automoteurs anciens, le freinage est assuré par des sabots en fonte freinant sur la surface de roulement de la roue. Le bruit de roulement est donc directement lié à l'état de surface laissé sur la roue par le sabot de freinage. Des sabots en composite ou en matériaux frittés, permettent aujourd'hui de freiner les wagons sans dégrader la rugosité de la roue [2]. La réduction du bruit au passage est conséquente, allant de 8 à 10 dB (A). Pour les matériels récents, le freinage est assuré par des disques disposés sur l'essieu ou de part et d'autre des roues. La surface de roulement de la roue n'est donc pas affectée par le freinage. Elle peut être améliorée par reprofilage sur une installation dédiée en atelier, appelée tour en fosse, qui permet d'usiner les roues sans les démonter du train. La réduction du bruit au passage obtenue est de l'ordre de 2 dB (A).

Le **taux de décroissance** de l'énergie dans le rail est optimisé via la réponse de la plateforme qui est approximée par

un système « masse – ressort – masse » correspondant au système physique « rail – semelle élastique – traverse – ballast ». Les caractéristiques physiques, masses et raideurs, de ces composants peuvent ainsi varier d'une voie à l'autre, conférant au système des réponses acoustiques différentes. Un exemple de contribution au bruit au passage de la traverse, du rail et de la roue est donné Figure 5.

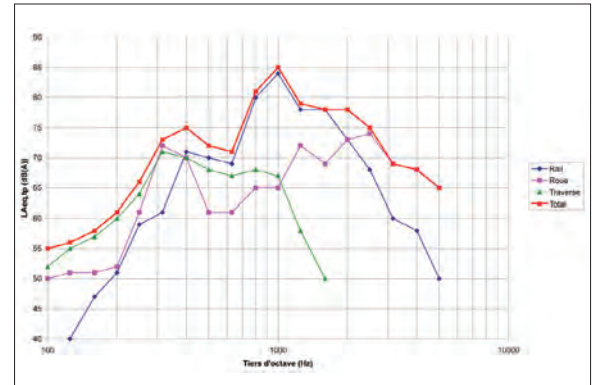


Fig. 5 : Contribution des différents éléments au bruit de roulement ferré en fonction de la fréquence

Ainsi, en optimisant les caractéristiques dynamiques des divers étages de matériaux viscoélastiques (semelle entre rail et traverse, semelle sous traverse, tapis sous ballast, etc.), le taux de décroissance de l'énergie dans le rail, exprimé en dB/m en fonction de la fréquence en tiers d'octave, est augmenté, en particulier dans sa direction verticale, et par conséquent le rayonnement acoustique de la voie est réduit. Des exemples de taux de décroissance sont présentés sur la figure 6.

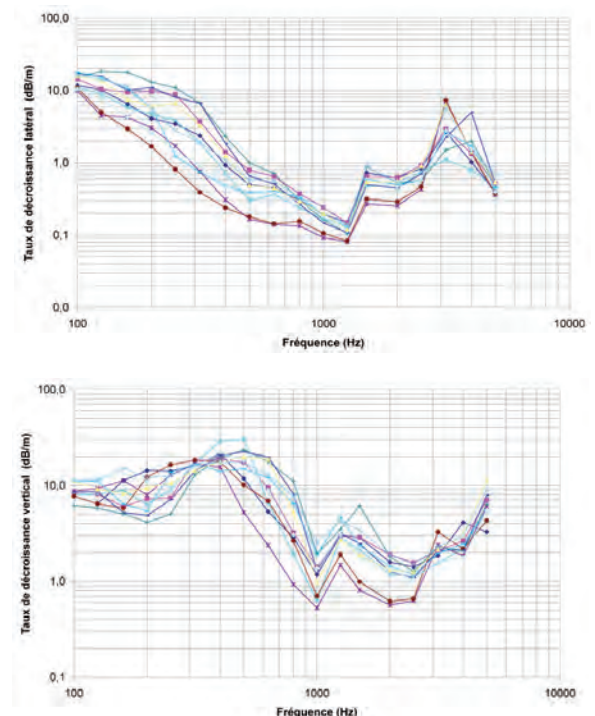


Fig. 6 : Taux de décroissance de l'énergie dans le rail dans les directions verticale (en haut) et latérale (en bas)



Fig. 7 : Divers types d'absorbeurs dynamiques proposés sur le marché

Ce potentiel de réduction de quelques dB (A) peut être augmenté en ajoutant des absorbeurs dynamiques qui permettent de dissiper l'énergie vibratoire du rail sous forme de chaleur en augmentant le taux de décroissance des vibrations le long de celui-ci et en réduisant ainsi la longueur de rayonnement de ce dernier [3,4]. Le principe des absorbeurs dynamiques est basé sur des systèmes masse/ressort fixés sur les rails qui ont pour objectif de minimiser sa réponse vibratoire. Plusieurs produits sont présentés à la figure 7. Les absorbeurs sont prévus pour agir a priori dans une direction (verticale ou latérale), mais ils ont aussi de fait une influence bénéfique dans l'autre direction. Une réduction du bruit au passage de l'ordre de 3 dB (A) est généralement mesurée. À l'instar des matériels roulants ferrés, les pneumatiques des matériels légers tels que le métro ont fait l'objet d'une optimisation des sculptures des pneus au vu de leur contribution au bruit de roulement (Figure 8). Ainsi, l'utilisation de pneumatiques sans lamelles (Figure 9), les rainures circonférentielles étant conservées, conduit à une réduction du bruit de roulement de 4 dB (A) [5].

Réduction bruit d'origine aérodynamique
Les solutions de réduction du bruit d'origine aérodynamique sont basées sur une optimisation de la forme du train, du carénage des pantographes et de leurs cavités, des bogies et des césures entre les voitures. Les sources aéro-acoustiques peuvent être caractérisées par antennerie et en soufflerie sur maquette. Des approches numériques basées sur la LES (Large Eddy Simulation) ou plus récemment sur la LBM (Lattice Boltzmann Method) permettent aussi de hiérarchiser les contributions des différentes sources comme présenté sur la figure 10 [6].

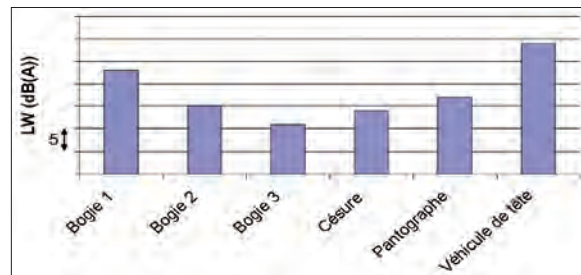


Fig. 10 : Puissance acoustique, en dB (A), des sources d'origine aérodynamique d'un TGV circulant à 320 km/h, estimée par calcul

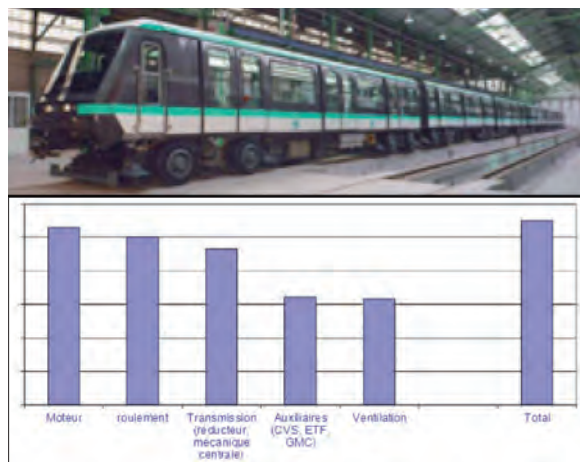


Fig. 8 : Hiérarchisation des différentes sources de bruit constituant le matériel MP89 (source RATP)

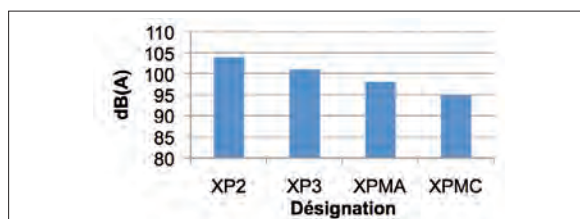


Fig. 9 : Niveaux, en dB (A), émis par plusieurs types de pneumatiques (XP2 et XP3 : 315/95-R16 avec et sans lamelles transversales, XPMA et XPMC : 305/75-R20 avec et sans lamelles transversales) [5]

Ainsi, l'optimisation du nez du train est primordiale. En effet, il s'agit de conditionner l'écoulement pour éviter les décollements de couche limite et les impacts sur les différents équipements. Ensuite, la continuité entre les voitures peut être assurée par un système de bavettes pour limiter la génération de turbulence dans les cavités. Le pantographe ainsi que les cavités qui l'abritent peuvent être optimisés. Le dernier train à grande vitesse japonais Shinkansen, présenté à la figure 11, page suivante, intègre une bonne partie de ces solutions. Cependant, les contraintes de gabarit, de maintenance, de sécurité, de refroidissement d'organes rendent l'intégration de ces solutions assez délicates.

Réduction du bruit des équipements
La réduction du bruit des équipements n'est pas spécifique au domaine ferroviaire. Diverses solutions sont développées par les industriels pour réduire le bruit des compresseurs d'air, des convertisseurs électriques, des moteurs diesel, des échappements, des ventilateurs, etc. Ainsi, pour respecter les contraintes réglementaires imposées par les STI, les constructeurs ferroviaires implantent certaines de ces solutions sur les matériels neufs. La rénovation de matériels anciens permet parfois la modernisation de quelques équipements et par conséquent de réduire le bruit en stationnement.

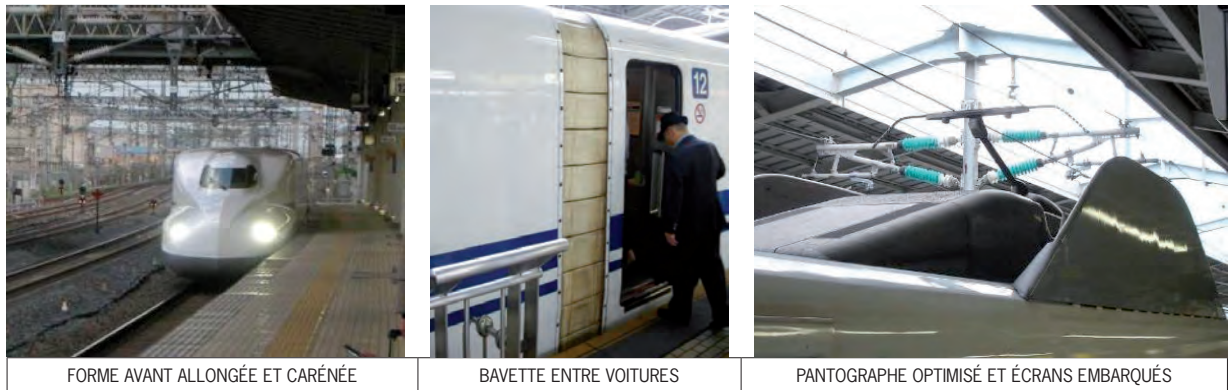


Fig. 11 : Solutions de réduction du bruit aérodynamique implantées sur le Shinkansen N700 (images SNCF)

La figure 12 présente par exemple un ventilateur radial implanté en toiture qui a permis de réduire de -5 à -8 dB (A) le niveau émis par le ventilateur axial équipant initialement le train [7].

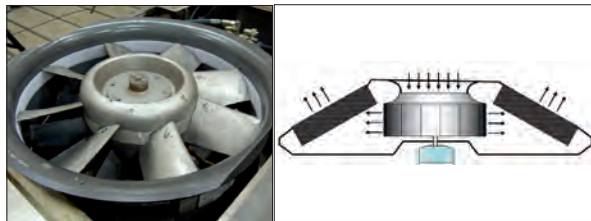


Fig. 12 : Optimisation acoustique d'une ventilation par un ventilateur radial [7]

La réduction de la propagation

La réduction de la propagation du bruit consiste à disposer des obstacles entre la source et le(s) récepteur(s). Les murs antibruit, situés à quelques mètres de l'axe de la voie ferrée, apportent une réduction de l'ordre de 8 dB (A) dans la zone d'ombre de l'écran. L'efficacité des murs droits réfléchissants peut être améliorée de quelques dB (A) en tapisant le mur de matériaux absorbants, en optimisant l'arête (couronnement) et en modifiant la forme du mur (murs multidiffracteurs en Y) (Figure 13). Des travaux récents ont prouvé l'efficacité d'écrans de faible hauteur (inférieur à 1 m) très proches de la source, quand la source principale de bruit est le bruit de roulement [8]. Les écrans peuvent être aussi embarqués sous forme de jupes recouvrant les bogies.

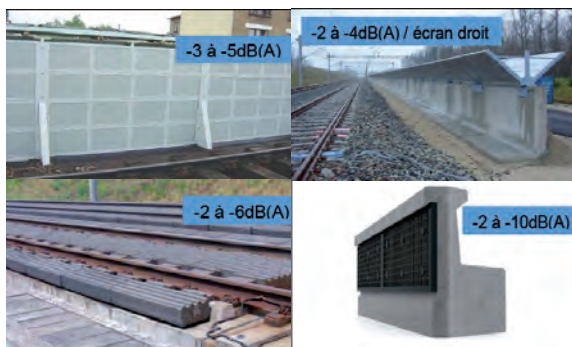


Fig. 13 : Illustration de plusieurs types de solution de réduction du bruit entre une source et un récepteur (source EPSF, Zbloc Norden AB)

Conclusion

La réduction du bruit des infrastructures de transport ferroviaire est un enjeu majeur pour leur développement. L'augmentation de la demande de transport collectif conduit à une augmentation du débit des infrastructures donc du nombre de passages de trains et globalement à un accroissement du bruit pour les riverains. Des solutions ont été développées, tant pour le matériel roulant que pour l'infrastructure, et sont implantées lors de la construction ou de la rénovation des matériels roulants et de l'infrastructure. Malgré la conformité réglementaire, des plaintes subsistent et sont traitées par la communauté ferroviaire pour apporter la meilleure réponse possible. Le développement de nouvelles solutions et leur intégration dans le système ferroviaire restent d'actualité, notamment pour en réduire le coût et faciliter leur déploiement.

Références bibliographiques

- [1] Rapport de l'organisation mondiale de la santé - Burden of disease from environmental noise, quantification of healthy life years lost in Europe, 2011
- [2] J. Raison, JJ. Viet, Bruit et matériel roulant : le couple roue-semelles composites. Réduction du bruit de roulement, Revue Générale des Chemins de Fer, octobre 2003
- [3] F. Poisson, F. Marghiocci, The use of dynamic dampers on the rail to reduce the noise of steel railway bridges, Journal of Sound and Vibration, Volume 293, Issues 3-5, pp 944-952, 13 June 2006,
- [4] C. Fillol, La réduction du bruit ferroviaire à la RATP : des axes de progrès ciblés, Revue Générale des Chemins de Fer, ISSN 0035-3183, pp. 7-28, sept 2009
- [5] S. Laurent, Qualité sonore du matériel roulant ferroviaire, rapport de stage, RATP, 2001
- [6] N. Paradot, F. Poisson, R. Grégoire, Méthodes numériques pour la prédiction du bruit aérodynamique de trains à grande vitesse, Revue Générale des Chemins de Fer, juin 2008
- [7] F. Poisson, P.E. Gautier, The railway noise reductions achieved in the Silence project, in Proceedings of ACOUSTICS08, Paris, 2008
- [8] M. Baulac, J. Defrance, P. Jean, Noise impact of innovative barriers dedicated to freight trains in urban areas, EURONOISE, 2009.