

La détection automatique des défauts de roues : un outil d'optimisation de la maintenance des rames pour réduire le bruit solidien

**Guillaume Coquel,
Corinne Fillol**

RATP
Pôle de recherche et d'ingénierie en Acoustique et Vibrations,
54, quai de la Rapée,
75990 Paris CEDEX 12,
France
E-mail : guillaume.coquel@ratp.fr,
corinne.fillol@ratp.fr

Résumé

Trois millions et demi d'euros sont investis chaque année par la RATP en opération de meulage, en pose de tapis antivibratiles ou autres mesures de réduction du bruit solidien pour répondre aux diverses plaintes en Île-de-France. Des gains de 3 à 10 dB(A) d'atténuation peuvent être obtenus selon le site, la composition du sous-sol, le type de bâtiment, etc. 70% des plaintes sont entièrement liées à une anomalie de la voie mais 30% d'entre elles ne présentent aucun lien avec un défaut de la plateforme ferroviaire. Quelle est donc la part et l'impact chez les riverains d'un défaut de polygonisation ou d'excentricité d'une roue d'un matériel roulant circulant sur l'ensemble de la ligne par rapport à un défaut localisé de l'infrastructure ? Ainsi, cet article présente le cas particulier d'apparition de vibrations dues à des défauts de roues dans un bâtiment. Les vibrations générées par un matériel roulant ayant un méplat et un matériel sain sont alors comparées.

Abstract

Three and a half million euros are spent every year by RATP in grinding operations, under ballast mats and others ground-borne noise mitigations measures in order to respond to various complaints in Ile - de - France. Gains of 3 to 10dB(A) can be reached according to the site, the composition of the basement, the building type, etc. 70% of complaints are only linked to the platform but 30% of them are not linked to any platform defect. What is the ratio and the impact among residents of a polygonisation or an eccentricity of a wheel on a rolling stock operating on the entire line compared to a localized infrastructure failure? This paper presents the case of vibrations raised in a building due to out of roundness. The vibrations generated by a rolling stock having an out of roundness wheel and a clean rolling stock are compared.

Contexte

Depuis les années 1960, la RATP répond chaque année aux plaintes de riverains ayant trait à des phénomènes acoustiques et vibratoires. Le gabarit enveloppe des plaintes (niveaux minimum et maximum) relevé dans les logements des riverains habitant le long des infrastructures de la RATP ayant peu évolué depuis cette époque et les niveaux d'exigence de la maintenance des infrastructures ferroviaires ayant été régulièrement optimisées, le nombre de plaintes recensées reflète plus la variation de sensibilité de la population exposée (dégradation du cadre vie, multi-exposition, effet socio-culturel, cumul des niveaux au cours d'une journée, etc.) qu'une dégradation importante des infrastructures. Ce gabarit présente un écart important qui reflète le caractère très subjectif de

la plainte, ainsi que la nature très hétérogène des conditions environnementales en milieu urbain dense (nature des bâtiments et du sol comprenant à la fois une multitude de réseaux concessionnaires et des vestiges historiques en quantité importante et des cavités, ...). Les plaintes ne résultent donc pas d'un dépassement d'un seuil calculé scientifiquement mais de l'aggravation d'une situation jugée « jusqu'à supportable » par les riverains. Le dialogue constant avec les riverains permet également de construire avec certains d'entre eux une relation de confiance. Ces riverains mentionnent, dans un climat apaisé, les amorces de dégradation pour que la RATP puisse programmer une action de maintenance évitant ainsi que la situation ne devienne insupportable. Ainsi, neuf zones sensibles sont identifiées en Île-de-France et environ cent seize kilomètres de voies sont meulées chaque année sur le réseau RATP.

Une analyse multicritère de ces plaintes prenant en compte tous les modes confondus (métro, tramway, RER) [1] montre que la première cause de déclenchement d'une plainte est le bruit au passage, et en particulier le bruit de roulement lorsque l'usure ondulatoire de la table de roulement est élevée. Les chocs roue/rail sur les joints, le passage des roues sur les appareils de voie arrivent ensuite, puis les défauts de circularité des roues (plats aux roues, polygonisation, rugosité). Il apparaît, de plus, clairement que l'arrêt prématuré du meulage sur un réseau renforce systématiquement le nombre de plaintes comme le montre la figure 1 pour les années 2003 et 2009.

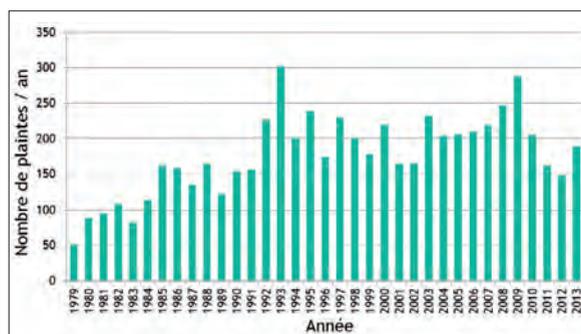


Fig. 1 : Evolution du nombre de plaintes reçues par la RATP concernant le réseau ferré

De la « sur-maintenance » de la voie à la maintenance préventive du matériel roulant

Ainsi, au vu de l'analyse multicritère, le meulage des voies ou l'arasage des joints est fortement plébiscité par les riverains. Le meulage effectué manuellement (cœur ou lames d'aiguilles) ou par train spécialisé permet d'allonger la durée de vie des rails ou des appareils de voie en réduisant les défauts de surface du champignon, en rectifiant le profil en long et en travers ou en prévenant l'apparition de certains défauts. Les principaux défauts traités sont :

- l'usure ondulatoire,
- le *head-checking*,
- les défauts géométriques des soudures,
- les écaillages, le fluage latéral du métal, etc.

Il existe, en fait, différentes techniques de reprofilage des voies dont le meulage, le fraisage, le meulage oscillant ou le rabotage. Le meulage reste encore de nos jours la technique la plus utilisée.

Les opérations de meulage sont principalement effectuées pour garantir la sécurité des milliers de voyageurs empruntant les transports ferroviaires. Or, depuis plusieurs années, ces opérations sont intégrées dans les processus de maintenance comme un levier de réduction préventif ou curatif de la réémission de bruit solidien chez les riverains.

En termes de prévention, une occurrence optimale doit cependant être trouvée entre gain acoustique effectif et sur-maintenance. En effet, selon les contextes environnementaux (nature de la plateforme, encombrement du sous-sol, ponts vibratoires non détectés, rampes, lignes aériennes ou souterraines, etc.), les opérations de meulage dont le pas d'occurrence est faible n'ont que peu d'effet sur la réduction des niveaux acoustiques et vibratoires.

La figure 2 présente ainsi, sur une période de 12 mois, les gains chez plusieurs riverains pour une occurrence de meulage réduite exceptionnellement à 6 mois. Malgré cette « sur-maintenance » des voies, 0 à 2 dB(A) ont été mesurés selon le riverain considéré ; le riverain n°3 bénéficiant de gains compris entre 0 à 6 dB(A). Ces atténuations sont en revanche peu répétables d'un meulage à l'autre.

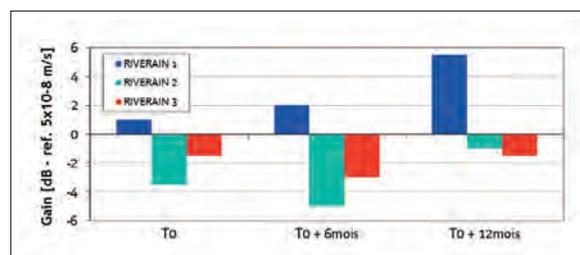
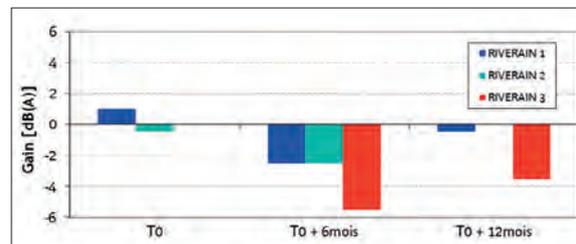


Fig. 2 : Gains acoustiques et vibratoires par rapport à une situation initiale chez trois riverains puis un meulage effectué à T0, à T0 + 6 mois et à T0 + 12 mois

Outre les opérations de meulage des voies, il est aussi nécessaire de limiter la rugosité des roues et les défauts de polygonisation de celles-ci. Les matériels roulants font ainsi l'objet, par exemple, d'un contrôle visuel tous les 10000km ou, sous signalisation, d'un passage en tour en fosse. Divers systèmes installés en atelier permettent aussi de relever les profils des roues sans pour autant identifier les défauts plus fins de surface contribuant à la génération de vibrations. Les défauts des roues sont particulièrement impactant en termes d'émission vibratoire car ils sont potentiellement perçus sur toute la ligne alors qu'une anomalie de la voie reste généralement très localisée [2].

Suivant la sévérité du défaut de la roue, le jugement des riverains peut basculer vers la plainte. La figure 3 présente ainsi les signatures spectrales de passages de rame chez un riverain sur une période de 1h. Des événements supérieurs à la moyenne (rouge) sont clairement visibles. En effet, cinq à sept passages plus énergétiques sont clairement identifiés par le riverain comme gênants. Ces résultats étant évalués pendant une période d'une heure à l'heure de pointe, pour réduire sensiblement la nuisance tout au long de la journée, le traitement des défauts de roues doit être ciblé sur les cas les plus sévères qui sont également potentiellement les plus gênants. La détection en continu des rames incriminées permet alors une amélioration de toute la flotte, ce qui réduit après coup les valeurs moyennes enregistrées durant une journée. Plusieurs types de défauts existent (plat aux roues, excentricité ou polygonisation) et les contenus fréquentiels des vibrations générées dans le sol dépendent de la vitesse des rames.

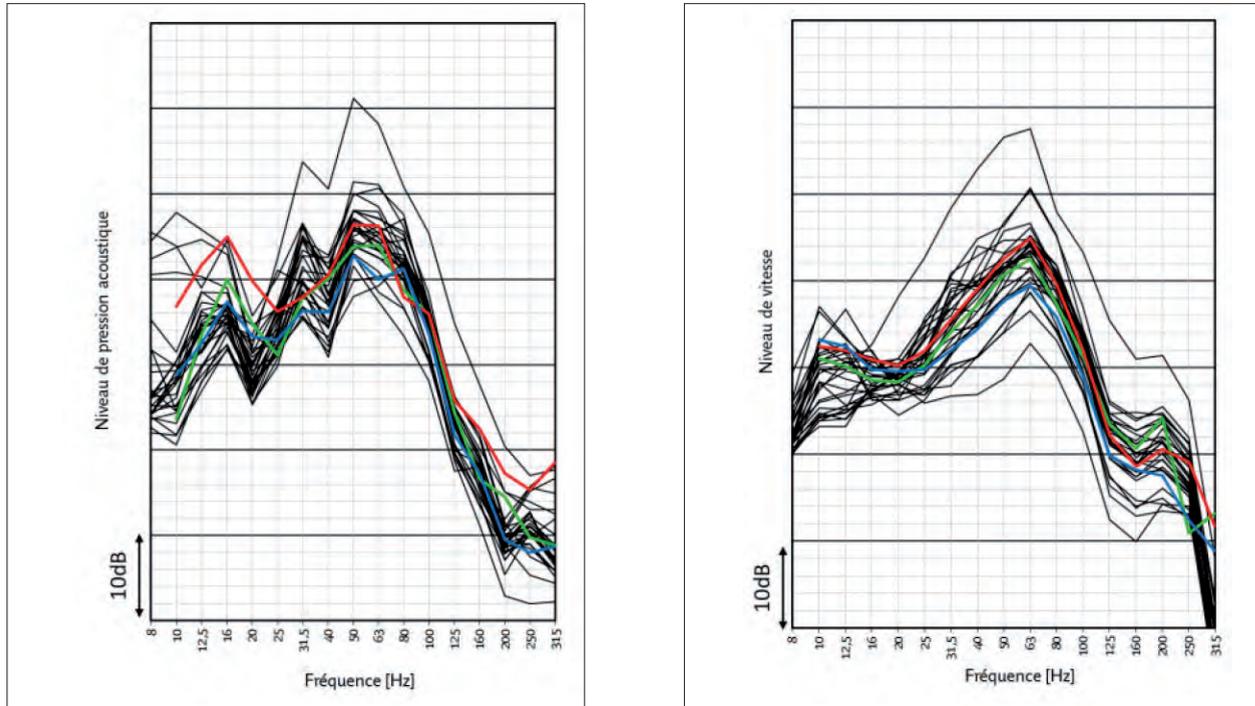


Fig. 3 : Niveaux de de pression acoustique en dB (gauche) et de vitesse vibratoire en dB (droite). Noir : passages individuels ; Vert : moyenne T0 ; Rouge : moyenne T0+6 mois ; Bleu : moyenne T0+12 mois

Par exemple, des défauts périodiques des roues comprenant plusieurs périodes sur la circonférence donnent lieu à des excitations harmoniques (Tableau 1) tandis que des plats aux roues donnent lieu à des excitations impulsionnelles [2].

Différents systèmes sont disponibles pour détecter en voie les défauts de roues. Ils peuvent faire appel [3] à une détection par continuité de courant, une détection optique, une détection par piézoélectriques, etc. Le système expérimenté à la RATP pour détecter les défauts déclenchant une plainte riverain est basé sur une détection par mesures accélérométriques dont l'ensemble de la chaîne a été développé par la société GANTHA¹. Ce système a donc l'avantage de fournir une mesure de l'accélération au passage des rames et même une évaluation de la force dynamique injectée par le matériel roulant si les mesures sont couplées à une mesure de mobilité de la voie.

Ainsi pour tenir compte de l'ensemble du chemin de propagation : défaut de roue / rail / plateforme / tunnel / sous-sol / fondation bâti / structure du bâti / rayonnement chez le riverain, le dispositif de détection des défauts de roues a été placé en tunnel au droit d'une zone sensible

(plaintes récurrentes), d'un puits de ventilation et dans un immeuble avec caractérisation continue du bruit solidien sur une période d'un mois.

Présentation du site expérimental

Le site expérimental est situé dans Paris intra-muros, à proximité d'une voie de RER et le bâtiment dans lequel ont été installés les capteurs est un immeuble de type haussmannien (façade en pierre, structure porteuse de poutres de métal, planchers légers en bois) en R+7. Le riverain concerné est situé au premier étage. La figure 4, page suivante, présente un schéma du dispositif expérimental. Les mesures réalisées sur la voie ont été enregistrées directement par le système de détection des défauts de roues. Dix accéléromètres sont répartis sous les deux files de rail d'une seule voie. Pour des raisons de clarté de l'article, seuls les résultats mesurés sur les accéléromètres situés au centre du dispositif seront présentés et comparés aux niveaux relevés dans le puits de ventilation et dans le bâtiment riverain.

Véhicule	Train	Train conventionnel	Trains grandes vitesse
Gamme de fréquence [Hz]	7 - 80	18 - 80	30 - 80
Vitesse [km/h]	70	180	300
Longueurs d'ondes [m]	0,25 - 4	0,6 - 10	1 - 17
Rayon de la roue [m]	0,45	0,45	0,45
Ordres du défaut	1 - 11	1 - 5	1 - 3

Tabl. 1 : Longueurs d'ondes des défauts de roues typiques pour la génération de bruits solidiens pour différents types de véhicules [2]

1-<http://www.gantha.com>

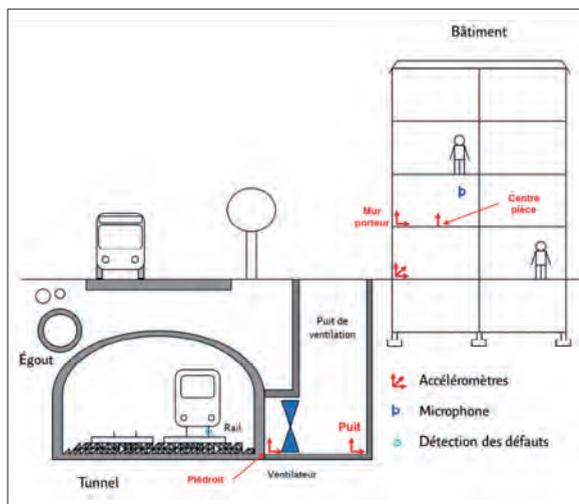


Fig. 4 : Schéma du site expérimental et emplacement des points de mesure

Conjointement aux mesures en continu des passages de rames sur la voie, des mesures similaires sont effectuées dans une pièce inoccupée de l'appartement du riverain durant un mois. Un enregistrement de l'évolution temporelle du niveau acoustique (aux basses fréquences), un enregistrement des niveaux de vitesse vibratoire au pied du mur porteur le plus proche du tunnel selon deux axes (vertical et horizontal) ont aussi été réalisés ainsi qu'une mesure de vitesse vibratoire en milieu de plancher selon l'axe vertical. L'enregistrement des niveaux est effectué par bandes de tiers d'octave suivant la constante d'intégration « slow » sur la gamme de fréquence [8 -1000Hz].

Enfin, des mesures de prélèvements vibratoires complémentaires ont été réalisées dans le puits de ventilation (à proximité de la voie et à proximité des fondations des immeubles) et selon deux axes (vertical et horizontal).

Un dispositif de détection des défauts de roues en exploitation est usuellement placé dans un endroit dégagé (transmission d'informations par 3G ou autres). Pour les besoins de cette étude (mesures conjointes en tunnel et chez un riverain), il a dû être intégré dans une niche du tunnel (Figure 5) tout en étant facilement accessible pour contrôler le bon fonctionnement du système, transmettre les données mesurées, les valider et les analyser avant envoi, au fur et à mesure, à l'atelier de maintenance des matériels roulants incriminés.

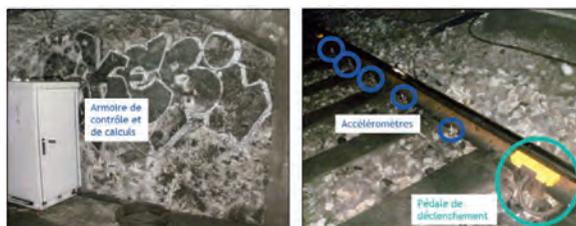


Fig. 5 : Positionnement de l'armoire dans le tunnel et emplacement des accéléromètres

Corrélation des défauts entre les mesures effectuées en tunnel et chez le riverain

Outre le meulage régulier de ce site d'essai, une des premières vérifications qui a été menée est la bonne corrélation des niveaux acoustiques et vibratoires mesurés dans l'appartement avec les défauts de roues présents sur le matériel roulant et l'indépendance de ces résultats avec une voie particulièrement émettrice de vibrations. Ainsi, la figure 6 illustre les niveaux acoustique et vibratoire globaux relevés chez les riverains de plusieurs passages de rame présentant des défauts de roue et circulant sur les voie 1 et 2. La figure montre que, quelle que soit la voie de circulation, les niveaux acoustiques et vibratoires mesurés dans le logement sont du même ordre de grandeur. Par conséquent, une voie n'est pas plus incriminée que l'autre par la présence d'un défaut localisé ou par la présence d'usure ondulatoire particulièrement prononcée.

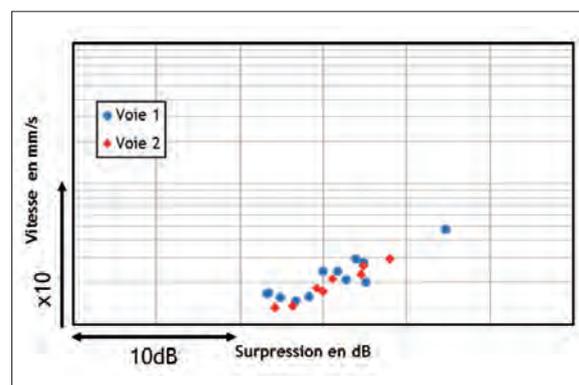


Fig. 6 : Représentation de la surpression acoustique (en dB) par rapport à la vitesse vibratoire (en mm/s) de différents passages mesurés dans un logement pour une circulation des rames voie 1 (bleu) et voie 2 (rouge)

Détection d'une rame présentant un défaut de roue

Afin de présenter les principales différences entre un matériel exempt de défauts de circularité de ses roues et un matériel impacté, seules les données extrêmes sont présentées dans cet article. La Figure 7 illustre les évolutions temporelles de la vitesse vibratoire sous les deux files de rail dans le cas d'une rame avec défauts de circularité et dans le cas d'une rame saine. Les mesures montrent clairement que les vibrations par l'une ou l'autre des roues d'un même essieu sont différentes et que l'apparition d'un défaut de roue via son amplitude est visible facilement sur l'évolution temporelle.

La figure 8, montre quant à elle, sous le patin du rail, la différence absolue entre une rame présentant un défaut et une rame saine est de 10 à 20 dB selon la file de rail considérée. Cette différence doit cependant être pondérée par le fait qu'un seul couple d'accéléromètres sous rail a été analysé. Une analyse comparative de tous les accéléromètres permettrait certainement de détecter très finement la position des défauts sur le déroulé de roue et ainsi d'affiner ce premier constat.

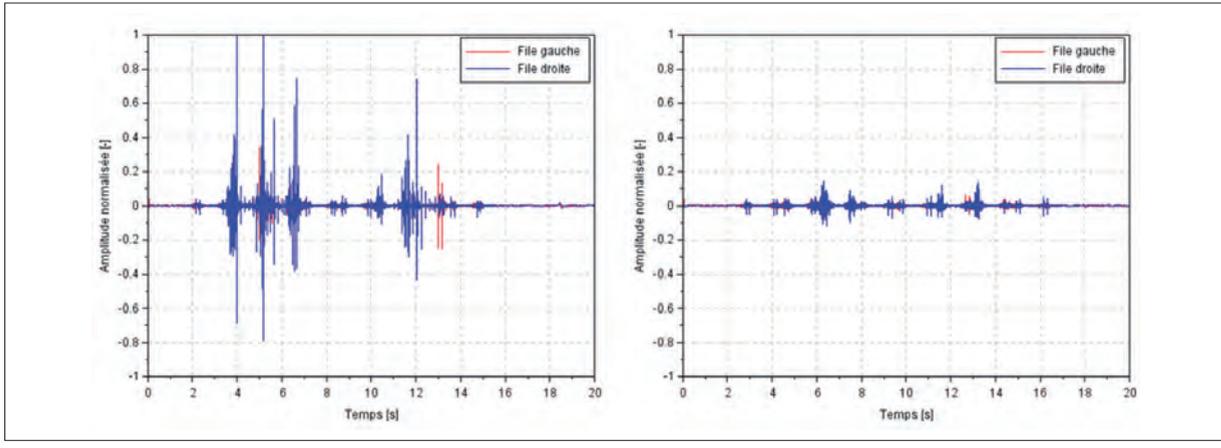


Fig. 7 : Evolution temporelle de la vitesse vibratoire normalisée sous le rail. Gauche : Rame présentant des défauts de circularité. Droite : Rame sans défaut de roue

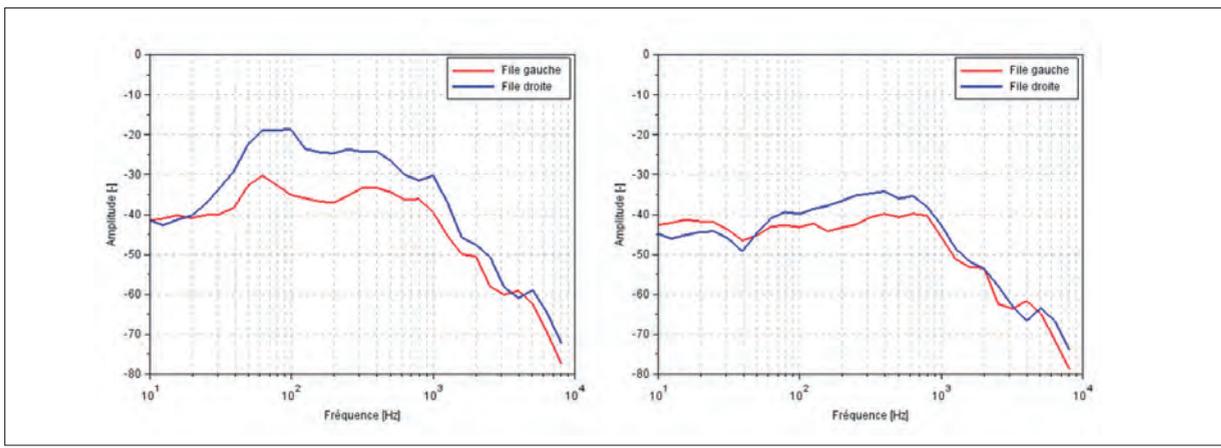


Fig. 8 : Signature spectrale, en dB et par bandes de tiers d'octave, par bandes de tiers d'octave de la vitesse vibratoire normalisée sous le rail. Gauche : Rame présentant des défauts de circularité. Droite : Rame sans défaut de roue

Il est en outre important de noter la gamme de fréquences incriminée par les défauts de la rame défectueuse qui se situe entre 20 et 1 000 Hz environ avec un maximum d'énergie entre 20 et 100 Hz.

Les résultats présentés précédemment sont illustrés cette fois en termes de différence de niveaux de vitesse (Figure 9) entre une rame présentant un défaut et une rame sans défaut de roue.

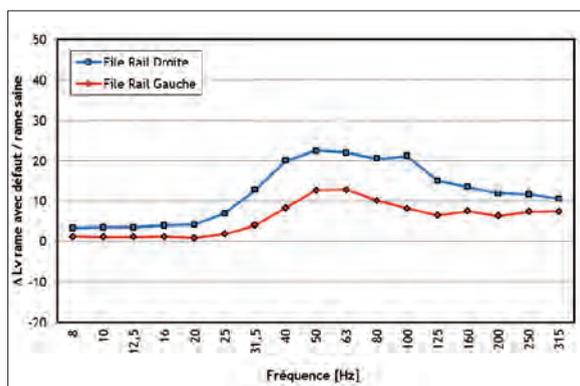


Fig. 9 : Différences de niveaux de vitesse vibratoire entre une rame avec défaut et une rame sans défaut sur les deux files de rail

Ces écarts peuvent être comparés aux mesures réalisées dans le puits de ventilation (Figure 10, page suivante) et dans le logement (Figure 11, page suivante). La gamme de fréquence impactée par le défaut de roue entre l'excitation mesurée sur le rail et celle mesurée dans le puits de ventilation est bien corrélée. L'amplification mesurée dans le puits de ventilation est d'environ 20 dB par rapport à une rame sans défaut de roue même si certaines bandes de fréquence montrent des pics supérieurs (125 et 250 Hz). Les deux axes ont un comportement similaire. L'amplification vibratoire dans le logement est de l'ordre de 10 à 15 dB. Cette amplification est quasi intégralement reproduite dans le domaine acoustique excepté aux très basses fréquences (8-20 Hz). Les mesures réalisées dans l'appartement montrent également un mode de plancher à 40 Hz, avec une augmentation des niveaux de vitesse vibratoire de l'ordre de 5 dB dans cette bande de fréquence.

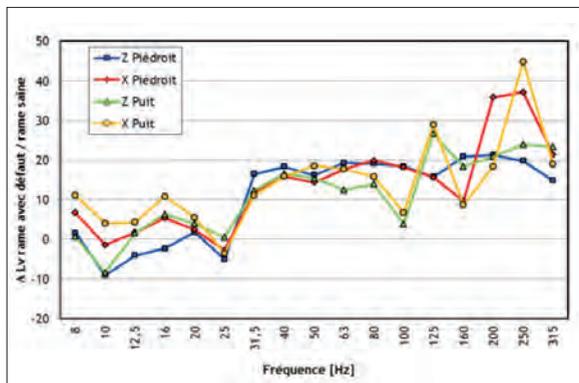


Fig. 10 : Différences de niveaux de vitesse vibratoire entre une rame avec défaut et une rame sans défaut pour chacun des points de mesure dans les puits de ventilation

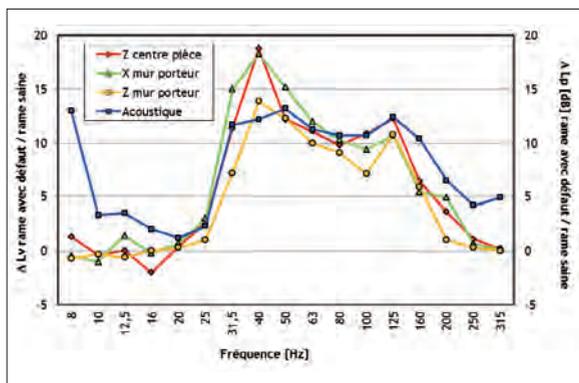


Fig. 11 : Différences de niveaux de vitesse vibratoire et de pression acoustique entre une rame avec défaut et une rame sans défaut pour chacun des points de mesure dans le logement

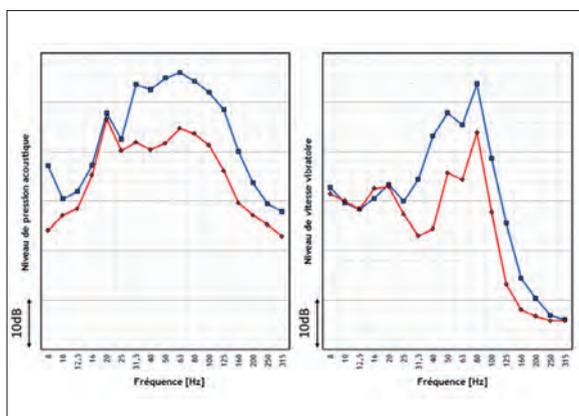


Fig. 12 : Signatures spectrales d'une rame avec défauts (bleu) et d'une rame sans défaut de roue (rouge) en termes de niveaux de pression acoustique (gauche) et de niveaux de vitesses vibratoires au centre du plancher (droite)

La comparaison entre les deux rames en termes de contenu fréquentiel est présentée sur la figure 12. Elle montre que l'énergie vibratoire est majoritairement centrée sur la bande de 80 Hz, alors qu'en acoustique, le spectre est naturellement plus large et couvre la plage 31,5 jusqu'à 125 Hz.

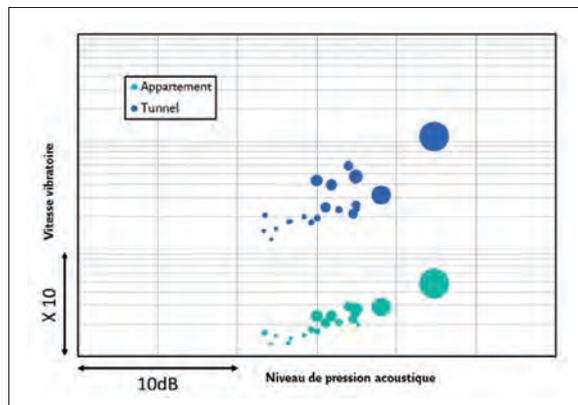


Fig. 13 : Corrélation entre niveau de pression acoustique chez le riverain, niveaux vibratoires dans le tunnel et dans l'appartement, et classement de la rame suivant la sévérité du défaut (plus le point est grand, plus le défaut est sévère)

Enfin, la figure 13 présente la corrélation entre les relevés du système de détection (plus le point est grand, plus le défaut détecté est sévère) et les niveaux acoustiques et vibratoires mesurés dans l'appartement et dans le tunnel. Elle montre clairement que le système de détection détecte les défauts qui produisent le plus de niveaux acoustiques et vibratoires dans le bâtiment. Une optimisation de la maintenance sur la base de ce système permettrait donc de corriger en priorité les rames les plus gênantes.

Conclusions

Dans un souci constant de réduire son impact environnemental, la RATP a expérimenté un système de détection des défauts de roue en ligne. Les premiers résultats d'une expérimentation lourde (tunnel - logement) ont été présentés et ont montré l'intérêt de détecter au plus tôt les défauts sur le matériel roulant : les amplifications mesurées en tunnel pour les rames impactées sont correctement identifiées dans les logements. De nombreuses autres analyses restent à effectuer sur cette campagne de mesure (corrélation entre les défauts mesurés et les remontées de la maintenance, vérification si le classement des rames en tunnel est corrélé aux mesures dans le logement, etc.). Un tel équipement intégré à demeure sur le réseau et correctement corrélé à l'identification des rames, ainsi qu'à un planning de maintenance préventive permettrait de réduire significativement les rames les plus génératrices de vibrations, et par conséquent les niveaux vibratoires émis dans l'environnement de la ligne monitorée.

Références bibliographiques

- [1] 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
- [2] RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) – Collaborative project – Deliverable D5.1 – Train induced ground Vibration – influence of Rolling Stock – State of the art survey
- [3] A. Schöbel et S. Mirkovic, Flat wheel detection as a part of wayside train monitoring system, Istrazivanja i projektovanja za privredu, Vol 8, issue 3, 2010
- [4] Scilab 5.5.2 - Logiciel libre et gratuit diffusé sous Licence CeCILL et développé par le Consortium Scilab - Digiteo. www.scilab.org