

Les enjeux actuels des recherches en acoustique et vibrations dans le domaine ferroviaire

Pierre-Etienne Gautier
 Franck Poisson
 Florence Foy

SNCF

Direction de la recherche et de la technologie

45, rue de Londres

75379 Paris CEDEX 08

E-mail : pierre-etienne.gautier@sncf.fr

Cet article présente comment la connaissance des mécanismes essentiels du bruit de roulement a déjà permis des progrès importants dans la réduction du bruit ferroviaire. Il reste maintenant à industrialiser des prototypes de solutions pour généraliser les applications. Ceci ouvre la voie à des études système dépassant le cadre de l'acoustique. Les recherches doivent en outre s'orienter vers les autres sources : crissements, vibrations dans le sol, meilleure compréhension de la perception dans certains cas. La combinaison de modèles physiques de sources avec la synthèse sonore et les études perceptives ouvrent la voie au design sonore, qui pourrait trouver des applications tant dans les gares que pour le confort intérieur des trains.

Les enjeux actuels

La recherche dans le domaine du bruit ferroviaire se trouve désormais à un tournant, que ce soit dans le domaine de l'environnement pour lequel la réduction du bruit est maintenant une condition d'acceptabilité pour le mode ferroviaire, et en particulier pour le fret, ou dans le domaine du confort intérieur des trains qui peut être un élément commercial discriminant pour différents industriels constructeurs de matériel ou pour différents exploitants dans l'avenir.

Dans le domaine de l'Environnement, compte tenu des recherches déjà réalisées, il s'agit maintenant de mettre en application les solutions issues des résultats déjà obtenus en garantissant leur pérennité, et d'identifier les progrès encore possibles.

Il faut aussi avoir à l'esprit les objectifs fixés par le Conseil européen de la recherche ferroviaire (ERRAC), organisme qui rassemble les opérateurs et les industriels du secteur ainsi que des universitaires, pour la réduction du bruit en environnement à l'horizon 2020 :

- Trains à grande vitesse : 83 dB (A) à 300 km/h à 25 m, contre 91 dB (A) aujourd'hui,
- Réduction du bruit des trains fret entre 10 et 20 dB (A),
- Réduction de la contribution ferroviaire de 10 dB (A) la nuit, en zones périurbaines notamment.

Les paragraphes suivants vont développer ces points en envisageant successivement les sources, la propagation, la perception, les vibrations dans le sol et enfin le confort du passager.

Les sources : une compréhension plus ou moins aboutie suivant les phénomènes

Les recherches et les progrès dans la réduction sont à des degrés divers d'avancement suivant les différentes sources.

Le bruit de roulement

Le bruit de roulement, qui a fait l'objet en tant que source principale du bruit ferroviaire, de recherches depuis plus de 10 ans est modélisé [1-6].

Il est généré par les vibrations puis le rayonnement acoustique du matériel roulant et de la voie provoquée par une excitation issue du contact roue – rail. Le phénomène exciteur est le déplacement imposé à la roue et au rail par les défauts de surface présents sur les bandes de roulement (roues et rail) et que l'on appelle rugosité.

La puissance acoustique rayonnée dans l'environnement est alors la somme des contributions issues de chaque composant émissif, à savoir :

- Les roues du véhicule,
- Le rail et les traverses pour la voie.

Le bruit lié aux vibrations de la superstructure du matériel roulant n'a qu'une influence négligeable sur le bruit global émis.

Le rayonnement de la voie est le résultat d'ondes de flexion verticales et latérales se propageant le long du rail (voir figure 1).

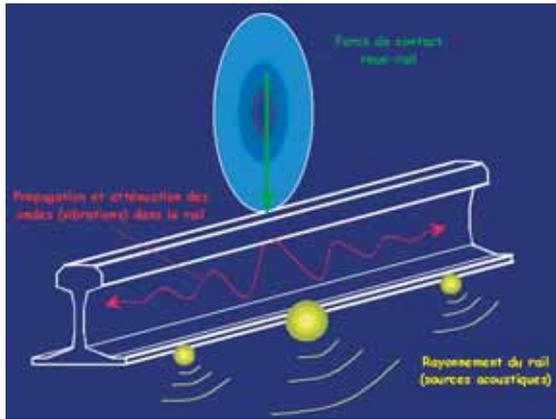


Fig. 1 : Schéma de principe du bruit émis par la voie

La part de la voie dans le niveau global de bruit émis en dB (A) est fonction de différents paramètres tels l'armement de la voie, la vitesse du train ou le chargement statique du matériel roulant. Elle est dans tous les cas non négligeable et peut même devenir prépondérante pour certaines configurations de circulation.

Le bruit de roulement est donc modélisé et le principe de sa réduction est connu.

Au niveau de l'excitation ("rugosité"), il s'agit d'avoir des roues "lisses" (freinées à disque ou par des semelles peu agressives en matériau "composite", figure 2), sur une voie "lisse".



Fig. 2 : Absorbeurs dynamiques sur la roue

La génération des défauts de rugosité n'est cependant pas encore complètement comprise [7]. Les vibrations et le rayonnement acoustique du rail et de la roue peuvent être réduits de 4 à 5 dB (A) par l'utilisation d'absorbeurs dynamiques (voir figure 3) dont l'efficacité acoustique a été prouvée sur des prototypes [8-12]. Des solutions opérationnelles sont en service. Ainsi le bruit des TGV a été réduit de près de 10 dB (A) depuis la première génération par suppression des semelles de frein en fonte. Les prototypes d'absorbeurs sur voie [12-13] et sur roue [9,11,12] restent à industrialiser, ce qui fait maintenant apparaître de nouveaux problèmes d'intégration de ces prototypes au système ferroviaire :

- problèmes de contact électrique entre la roue et le rail avec un enjeu important pour certains systèmes de signalisation utilisant des courants faibles qui circulent dans le rail,
- problèmes de tenue mécanique d'absorbeurs de vibrations sur roues fortement sollicitées thermiquement,
- problèmes de montage/démontage d'absorbeurs sur rail.

L'étude du bruit de roulement doit aussi être complétée par la modélisation de cas spécifiques comme :

- le bruit au passage des appareils de voie (aiguilles...),
- le bruit basse fréquence généré par les défauts de circularité de roues,
- les phénomènes excitateurs basses fréquences pour la génération des vibrations dans le sol.

Enfin, pour une utilisation opérationnelle dans des codes de propagation, des résultats issus des modèles de prédiction du bruit de roulement comme TWINS, les paramètres caractéristiques d'une flotte de trains ou d'un réseau doivent être connus avec une bonne précision statistique. Des études statistiques sont à développer dans ce domaine. En outre, l'évolution de ces paramètres avec l'état de maintenance du système doit faire l'objet de recherches plus approfondies.

Le bruit aérodynamique

Le bruit aérodynamique reste un enjeu [14], car il deviendra important si des progrès supplémentaires sont faits dans la réduction du bruit de roulement ou si les vitesses de circulation des TGV augmentent. Le



(a)



(b)

Fig. 3 : Absorbeurs dynamiques sur le rail



principe des solutions pour sa réduction est connu [14]. Il s'agit principalement de carénages sous caisse, mais là encore leur industrialisation doit intégrer de multiples contraintes comme le gabarit, la ventilation d'équipements de sécurité... Par ailleurs, ces sources sont multiples et à terme leur réduction simultanée doit être recherchée par sous ensemble [15], comme par exemple pour le pantographe [16-17].

Enfin la recherche fondamentale devrait permettre le calcul en aéroacoustique de cas industriels (écoulement dans des cavités complexes carénées) pour faciliter les études d'avant projet, les cas récemment traités étant encore académiques [18-20].

L'industrialisation des solutions

Nous avons vu que l'enjeu majeur pour la mise en application de certaines solutions est l'intégration de ces solutions encore à l'état de prototypes dans le système ferroviaire. Ainsi la mise en place de semelles de frein de type composite sur le matériel fret pose-t-elle des problèmes potentiels de conduction électrique roue/rail pour des courants faibles utilisés par certains types de signalisations. De plus, avec ce type de freinage, les roues sont plus sollicitées thermiquement et la fixation ultérieure d'absorbeurs permettant d'obtenir des gains supplémentaires est plus problématique. La compatibilité de certaines solutions comme les carénages, avec certaines contraintes fonctionnelles (ventilation d'organes sensibles comme les boîtes d'essieu ou les disques de frein) ou certaines pratiques de maintenance (écrans masquant la visibilité de roues) oblige à repenser plus globalement certains sous-ensembles.

Par ailleurs pour assurer une validation globale des réductions obtenues sur le système quand des améliorations sont développées sur certains de ses éléments (véhicule et/ou voie), il paraît important de s'orienter vers la création de plates-formes de validation de prototypes. Ces plates-formes, qui utiliseraient des prototypes montés sur véhicules ou infrastructures opérationnels, pourraient en outre permettre d'évaluer la tenue dans le temps des performances des prototypes ainsi que les éventuels problèmes apparaissant en service.

Le développement de modèles globaux : la synthèse sonore devient un outil pour la compréhension et la prévision de l'efficacité de solutions

À partir des modèles de sources élémentaires, des modèles globaux permettant de calculer l'émission d'un véhicule ou d'un train ont été développés. Par exemple, le modèle MAT2S développé dans le cadre de la coopération franco allemande Deufrako K2 [15], permet de prévoir la signature acoustique au passage d'un train (voir figure 4).

Les modèles de sources paramétrables dans MAT2S permettent la prévision des potentiels de progrès sur le bruit global à partir de progrès prévus ou imposés sur les sources élémentaires. Une évolution majeure de ces modèles est maintenant de leur permettre de réaliser la synthèse sonore du bruit émis pour, d'une part, valider

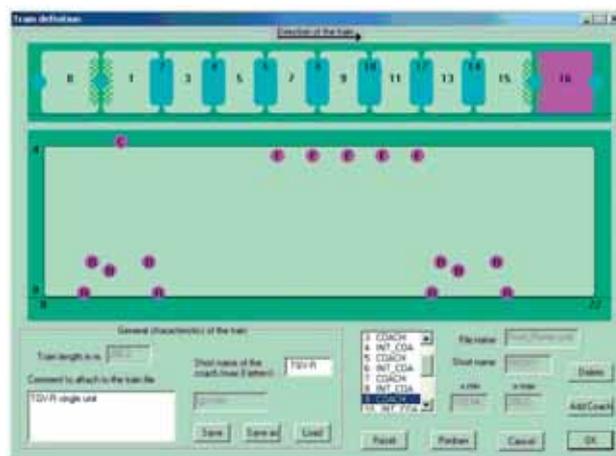


Fig. 4 : Assemblage des sources dans le logiciel MAT2S

au stade de l'avant projet le besoin de réduction sur les sources élémentaires, et d'autre part, fournir des échantillons sonores pour les études de perception. Par ailleurs, plusieurs classes de modèles peuvent être distinguées suivant les applications recherchées [21] :

Classe 1 : modèles représentant un mécanisme de base (TWINS [2]...),

Classe 2 : modèles adaptés à l'émission d'un convoi sur une voie (MAT2S [15]),

Classe 3 : modèles dédiés à la propagation dans le cadre d'études d'impact ou à la cartographie (MITHRAFER, HARMONOISE...).

Il est important d'assurer les liens entre les modèles des différentes classes pour qu'ils puissent s'alimenter les uns les autres. Par ailleurs, il est aussi important de déterminer, a priori, la précision requise à la réalisation d'un modèle de type 1 ou 2 pour alimenter une application aval sur 3. Ceci permettra d'éviter que des exigences de précision irréalistes ne soient imposées aux modèles de classe 1 ou 2.

Les autres sources deviennent importantes

Au-delà du bruit de roulement et du bruit aérodynamique, le travail de recherche sur les autres sources devient



Fig. 5 : Pont métallique à poutres latérales hautes

maintenant primordial, même si ces sources apparaissent globalement moins prédominantes. Ainsi, le bruit des ponts métalliques (voir figure 5) a fait l'objet de modélisations qui permettent de définir des solutions de réduction [22-23]. Le bruit des triages, essentiellement dû aux crissements des freins de voie (systèmes installés au sol et servant à ralentir les wagons triés), doit faire l'objet de recherches spécifiques.

Plus généralement, les phénomènes de crissement que ce soit au freinage ou en courbe de faible rayon [24-26] sont des problèmes intéressants et importants pour la recherche. En effet, le bruit de crissement des freins à disque des matériels ferroviaires constitue une source d'inconfort tant pour les passagers que pour les clients en attente sur les quais. Cette gêne occasionnée par les systèmes de freinage sur l'environnement suscite l'émergence de nouvelles études mécaniques. Les différentes investigations montrent que le crissement est une vibration auto entretenue du mécanisme de freinage et que le bruit émis couvre la plage de fréquences 5 000 – 20 000 Hertz.

Des résultats récents ont été obtenus grâce à l'exploitation d'un modèle numérique du frein de TGV (voir figure 6) et grâce à des essais en ligne sur le train. L'approche développée est une approche modale qui permet de mettre en évidence la déstabilisation par flottement du régime de glissement stationnaire des plaquettes avec le disque. Les modes instables (voir figure 7) sont alors ceux qui vont être responsables du changement de la solution dynamique : le passage du glissement à un régime plus complexe. En effet, des vibrations non-linéaires se propageant sous forme d'onde et caractérisées par un cycle glissement-adhérence-décollement au niveau de la zone de contact semblent être responsables du bruit émis.

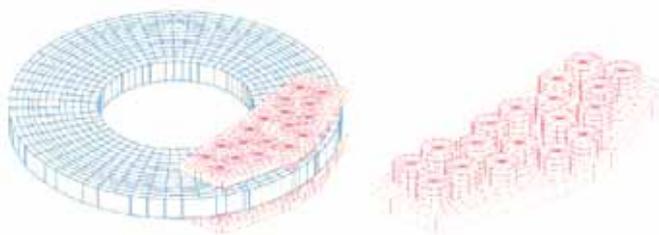


Fig. 6 : Modèle éléments finis garniture et disque de frein TGV

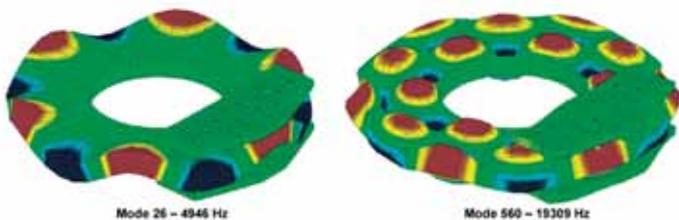


Fig. 7 : Animations de modes de crissement

Enfin, le bruit de traction et des auxiliaires est un sujet à ne pas négliger. Si des solutions ont été présentées comme sur des démonstrateurs (locomotive suisse Lok2000), des solutions plus économiques doivent permettre la généralisation à un plus grand nombre de matériels.

La propagation

L'effet des conditions météorologiques sur la propagation est maintenant modélisé [27], que ce soit pour le calcul spécifique de situations complexes pour lesquelles des méthodes telles que les équations paraboliques peuvent être employées, ou les études d'impact pour lesquelles la méthode «NMPB fer» calcule une moyenne dite de «long terme» prenant en compte forfaitairement différentes conditions de propagation. L'enjeu est maintenant la prise en compte équitable et acceptée de la météo, en faisant mieux reconnaître les différents types de situations, les effets météorologiques et leurs fréquences d'occurrence (voir figure 8).



Fig. 8 : Mesures acoustiques et météorologiques simultanées

Une approche probabiliste de la propagation pourrait y contribuer. Le contexte de développement de telles méthodes est clairement européen et commun aux modes routier et ferroviaire et doit être réalisé dans le cadre de projets comme HARMONOISE [28].

La perception et la gêne

Les différentes études menées sur la perception de bruits des transports et synthétisées dans un rapport récent pour la Commission européenne [29-30] ont fait apparaître un différentiel de gêne vis-à-vis des différents modes. Ce différentiel, favorable au mode ferroviaire, se retrouve dans une étude sur la multi-exposition (route/fer) menée en partenariat avec l'INRETS [31], lorsqu'une source est dominante.

Il apparaît néanmoins que les situations de multi-exposition sans dominance, de même que certains effets temporels et fréquentiels, doivent être approfondis dans le cadre de recherches futures [31].

Le bruit intérieur, dans les gares et dans les trains pour le confort du passager

Un progrès important a été réalisé ces dernières années avec la modélisation du bruit intérieur des TGV. Des techniques de type SEA (voir figure 9) combinées à des modèles spécifiques de sources et de transfert aérien permettent une modélisation avec une précision de quelques dB dans la bande de fréquences 400-5 000 Hz [32]. Les contributions relatives des différentes sources - roulement et aérodynamique - en fonction de la vitesse sont quantifiées ainsi que la part des différents éléments de la structure au bruit rayonné. Les mécanismes de sources particulières en basses fréquences ont aussi

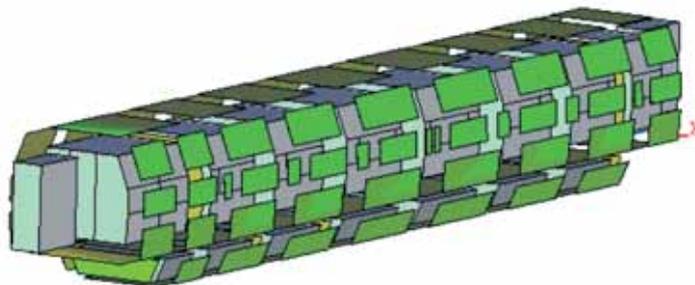


Fig. 9 : Modèle SEA de remorque de TGV Duplex

été compris. Il reste maintenant à rendre ces modèles physiques, au-delà de la prédiction du spectre tiers d'octave, aptes à synthétiser le bruit ambiant. Ils doivent peut-être, pour ce faire, être simplifiés. Cette synthèse par modèle physique permettra, en fournissant des échantillons sonores pour les études psycho-acoustiques, de mieux relier aux paramètres de conception du train le ressenti du client en circulation. Ainsi, les options de conception favorables au confort du voyageur pourront être mieux spécifiées.

Les indicateurs utilisés pour la spécification du confort ont évolué récemment. À des critères d'ambiance générale en circulation, caractérisés par un niveau sonore global LAeq, s'ajoutent maintenant des limitations de l'émergence d'équipements particuliers (climatisation...). Des travaux [33-34] sont en cours pour établir des indicateurs

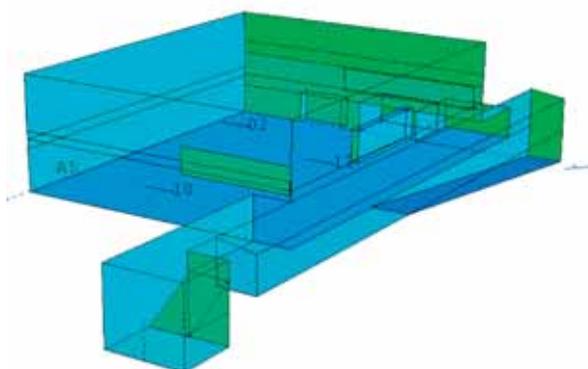


Fig. 10 : Modèle de la gare de Nantes

complémentaires pour les situations particulières (transitoires...).

Cette double évolution, évolution des indicateurs déterminés à partir du ressenti du client et synthèse d'ambiances sonores à partir de modèles physiques, ouvre la voie au design de l'ambiance sonore à bord des trains.

Il faut noter qu'une démarche identique est en cours pour le confort acoustique des gares. Il est maintenant possible de synthétiser des ambiances sonores incluant les sources de bruit (annonces, composteur, motrice...) et les caractéristiques du bâti d'une future gare (voir figure 10). Cet outil permet de générer des échantillons sonores et de mener des études paramétriques en laboratoire (tests d'écoute) pour améliorer les critères d'intelligibilité. L'évolution naturelle serait, là aussi, le design de l'ambiance acoustique d'une gare.

Les vibrations dans le sol

Les phénomènes dynamiques liés aux vibrations basses fréquences – jusqu'à 250 Hz - dues au trafic ferroviaire ont fait l'objet de travaux multiples récemment. Un nombre non négligeable s'est focalisé sur des phénomènes potentiellement spectaculaires (vitesses de circulation proches des vitesses d'ondes dans le sol) mais d'occurrences limitées à des cas particuliers (sols très mous). Un nombre significatif de modèles

prévoyant la propagation des vibrations dues au trafic ferroviaire a été établi [35-37].

En général, les mécanismes générateurs restent à mieux modéliser pour rendre ces modèles quantitativement prédictifs, à l'instar de TWINS pour le bruit de roulement, dans une large gamme de conditions de fonctionnement. En particulier, la validation de tels modèles sur un nombre important de configurations opérationnelles resterait à faire. La propagation des vibrations est très dépendante de caractéristiques éventuellement variables de sols déjà mal connus. Des progrès pour développer des méthodes robustes pourraient sans doute être fort utiles.

En outre, des critères reconnus au plan européen pour la gêne due aux vibrations des transports doivent être établis.

Conclusion

La recherche en acoustique ferroviaire aborde un tournant important tant par les sujets à aborder, que par le type d'actions nécessaires. Le bruit de roulement est compris et des progrès importants en matière de réduction (- 10 dB (A)) ont été déjà réalisés sur les TGV et les véhicules voyageurs, et peuvent l'être bientôt sur le fret. Il reste cependant un important besoin d'industrialiser des prototypes de solutions pour les généraliser, et de mieux intégrer les solutions acoustiquement optimisées à l'ensemble du système ferroviaire. Il reste cependant un besoin de recherches sur les phénomènes de crissements au freinage et en courbe, le calcul du bruit aérodynamique dans des situations industrielles, la modélisation des termes sources pour les vibrations. La construction

d'outils de synthèse de l'ambiance sonore à partir de modèles physiques de matériel roulant et/ou de gares ouvre la voie, en combinaison avec des études perceptives, au design de l'ambiance sonore, c'est-à-dire l'optimisation de la fonction de chacun de ces espaces grâce à la modalité acoustique.

Références bibliographiques

- [1] P.J. Remington, «Wheel/rail noise – part I : Validation of the theory», *JASA* 81, pp. 1824-1832, (1987)
- [2] D. J. Thompson, "Wheel-rail noise generation, part 1", *Journal of Sound and Vibration* 161 (3), (1993)
- [3] D. J. Thompson, B. Hemsworth and N. Vincent, "Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Part 1 : Description of the model and method", *Journal of Sound and Vibration* 193, pp.123-135, (1996)
- [4] D. J. Thompson, P. Fodiman and H. Mahé, "Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Part 2 : Results", *Journal of Sound and Vibration* 193, pp.137-147, (1996)
- [5] L. Castel, P.-E. Gautier, N. Vincent, J.-P. Goudard, "350 kph running tests to assess a new railway noise mode", in *Proceedings of Internoise'93*, Leuven 1993, Tome III, (1993)
- [6] C.J.C. Jones, D.J. Thompson, "Extended validation of a theoretical model for railway rolling noise using novel wheel and track designs", in *Proceedings of 7 th IWRN, Portland-Maine 2001*, (2001)
JC Nielsen, 2003
- [7] P. E. Gautier, N. Vincent, D. J. Thompson and G. Hölzl, "Railway wheel optimization", in *Proceedings of Internoise'93*, Leuven 1993, pp.1455-1458, (1993)
- [8] B. Hemsworth, P. E. Gautier and R. Jones, "Silent Freight and Silent Track projects", in *Proceedings of Internoise'2000*, Nice 2000, (2000)
- [9] C. Jones and D. J. Thompson, A. Frid, M. O. Wallentin, "Design of a railway wheel with acoustically improved cross-section and constrained layer damping", in *Proceedings of Internoise'2000*, Nice 2000, vol. 2, pp.673-678 (2000)
- [10] A. Bracciali and M. Bianchi, "Lucchini CRS Sypoe damped wheels noise qualification", in *Proceedings of 13 th International Wheelset Congress*, Rome. 2001, (2001)
- [11] L. Guccia, P. Fodiman, P. E. Gautier, N. Vincent and P. Bouvet, "High-speed rolling noise : design and validation of low noise components", in *Proceedings of Word Congress on Railway Research*, Florence 1997, pp.179-187, (1997)
- [12] D. J. Thompson, C. J. C. Jones and D. Farrington, "The development of a rail damping device for reducing noise from railway track", in *Proceedings of Internoise 2000*, Nice 2000, vol. 2, pp.685-690 (2000)
- [13] C. Talotte, "Aerodynamic noise, a critical survey", *Journal of Sound and Vibration* 231 (3), pp.549-562, (2000)
- [14] DEUFRAKO ANNEX K (1994) and K2 (1999), Sources de bruit des transports guidés à grande vitesse, final reports
- [15] W. Behr, T. Lölgen, W. Baldauf, L. Willenbrink, R. Blaschko, K. Jäger and J. Kremlacek, «Low noise pantograph ASP, recent developments», in *Proceedings of Internoise'2000*, Nice 2000, (2000)
- [16] T. Okamura, Y. Kusumi and T. Hariyama, "Development and prospect for low noise pantograph", in *Proceedings of Internoise'2000*, Nice 2000, (2000)
- [17] C. Talotte, H. Giardi and D. Juvé, «Simulations numériques aéroacoustiques de singularités représentatives des véhicules de transport terrestre», in *SIA Confort acoustique automobile et ferroviaire*, Le Mans 2000, (2000)
- [18] D. Leclercq, M. Jacob, A. Louisot and C. Talotte, "Forward-backward facing step pair : aerodynamic flow, wall pressure and acoustic characterisation", in *Proceedings of the 7th AIAA Congress*, Maastricht 2001, (2001)
- [19] X. Gloerfelt, C. Bailly and D. Juvé, "Computation of the noise radiated by a subsonic cavity using direct simulation and acoustic analogy", in *Proceedings of the 7th AIAA Congress*, Maastricht 2001, (2001)
- [20] C. Talotte, P.-E. Gautier, D.J. Thompson, C. Hanson, "Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources : a critical survey", in *Proceedings of 7 th IWRN, Portland-Maine 2001*, (2001)
- [21] G. Janssen, "A calculation model for railway bridges", *Journal of Sound and Vibration* 193 (1), pp.295-305, (1996)
- [22] F. Poisson, L. Dieleman «La réduction du bruit des ponts métalliques» in *Revue Générale des Chemins de Fer*, novembre 2003 pp75,84
- [23] F. Périard – Wheel/rail noise generation curve squealing by trams – Doctoral thesis, TU Delft
- [24] M. A. Heckl and I. D. Abrahams, "Curve squeal of train wheels, part 1 : mathematical model for its generation", *Journal of Sound and Vibration* 229, pp.669-693, (2000)
- [25] F. G. de Beer, M. H. A. Janssens, P. P. Kooijman and W. J. van Vliet, "Curve squeal of railbound vehicles (part 1) : frequency domain calculation model", in *Proceedings of Internoise'2000*, Nice 2000, (2000)
- [26] M. Bérengier, C. Cremezi-Charlet «La propagation du bruit en milieu extérieur» in *Revue Générale des Chemins de Fer*, novembre 2003 pp85,95
- [27] H. Van Leeuwen, R. Nota "The Harmonoise engineering model", in *Proceedings of Euronoise 2003*, Naples, 2003
- [28] EU/WG2-Dose/effects, Position paper on relationships between transportation noise and annoyance, (2000)
- [29] H.M.E. Midlema, W. Passchier-Vermeer, H. Vos "Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance", *TNO Inro report* 2002-59, (2003)
- [30] P. Champelovier, C. Cremezi-Charlet, J. Lambert, «Evaluation de la gêne due à l'exposition combinée aux bruits routier et ferroviaire», rapport INRETS n° 242, Sept 2003
- [31] F. Poisson, F. Letourneaux, T. Loizeau, N. Vincent, «Inside noise of high speed train coaches», in *Proceedings of Forum acusticum SS – NOI-03*, Sevilla 2002, (2002)
- [32] M. Mzali, D. Dubois, J.-D. Polack, F. Létourneaux, F. Poisson "The acoustical comfort inside trains : the passengers' point of view" in *Proceedings of Internoise'2000*, Nice 2000, (2000)
- [33] M. Mzali, D. Dubois, J.-D. Polack, F. Létourneaux, F. Poisson "Mental representation of auditory comfort inside trains : methodological and theoretical issues", in *Proceedings of Internoise*, août 2001, la Hague.
- [34] B Picoux, «Etude théorique et expérimentale de la propagation dans le sol des vibrations émises par un trafic ferroviaire», Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Nantes, novembre 2002
- [35] Propagation dans le sol des vibrations émises par un véhicule ferroviaire se déplaçant à vitesse constante, rapport LMM Ecole Centrale Nantes, SNCF, Solétanche, Prédit aide DGAD/SRAE/99107, mars 2002
- [36] M. Villot et al, «Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour la gestion de l'environnement vibratoire des infrastructures de tramway», rapport CSTB ER 712 99 013B septembre 2001