

Construction de modèles de synthèse acoustique de matériels ferroviaires

N. Vincent
P. Bouvet
 VIBRATEC
 28, chemin du petit Bois
 BP 36
 69131 Ecully CEDEX

F. Poisson
 SNCF
 Direction de la Recherche et de la technologie
 45, rue de Londres
 75379 Paris CEDEX 08

T. Loizeau
 SNCF
 Centre d'Ingénierie du Matériel
 4, allée des Gémeaux
 72100 Le Mans

Une méthodologie de construction de modèle de synthèse acoustique permettant de simuler le transfert de bruit aérien à l'intérieur de matériel ferroviaire est présentée. À titre d'illustration, cette méthodologie est appliquée sur un matériel existant : une remorque de TGV-A. Un bon accord entre niveaux de bruit interne calculés et mesurés est obtenu pour plusieurs conditions de vitesse et d'environnement : champ libre et tunnel.

Reliable simulation models are required to minimise interior noise levels of new rolling stock at the design stage. A methodology to build predictive acoustic models for air-borne noise transmission inside a train is presented. This methodology is applied on an existing train (French TGV-A). Simulations are then compared to experimental results for several speeds and several environments : free field and tunnel. A good agreement between simulations and measurements is found.

Introduction : modèle de synthèse acoustique

Dans le cadre d'appels d'offres de nouveaux matériels ferroviaires, un engagement contractuel concernant les performances de confort acoustique interne est à présent systématiquement requis de la part des constructeurs consultés.

Il est donc nécessaire de développer des modèles acoustiques fiables pour être en mesure de valider une architecture de matériel le plus en amont possible d'un projet.

La notion de modèle de synthèse acoustique recouvre la construction d'un modèle qui puisse être utilisé comme outil de conception acoustique à tous les stades d'un projet. Un tel modèle doit présenter un compromis optimal entre les exigences suivantes : facilité de mise en place, robustesse des prévisions, rapidité des variations paramétriques et souplesse de mise à jour tout au long de l'avancement du projet.

Le présent article décrit une méthodologie développée par la société Vibratéc pour construire des modèles de synthèse acoustique, permettant de prévoir les niveaux de bruit dans des matériels ferroviaires. L'application à la prévision du bruit interne dans un matériel TGV-A permet d'illustrer l'intérêt d'une telle démarche prédictive.

Méthodologie de construction du modèle

On s'intéresse ici à la transmission aérienne du bruit sur toute la plage 100 Hz – 5 000 Hz.

La problématique physique comprend les 4 étapes suivantes : la connaissance des sources acoustiques externes, l'obtention du chargement acoustique externe des panneaux constituant le train, la réponse vibro-acoustique de la structure et le calcul du champ acoustique interne.

Étape 1 : Caractérisation des sources acoustiques

Les principales composantes acoustiques externes sont les suivantes :

- le bruit de roulement rail/roue,
- le bruit de motorisation : moteur électrique, moteur diesel, réducteur, échappement...
- le bruit des auxiliaires : ventilation, climatisation, équipements électriques...
- le bruit des sources aérodynamiques : bruit lié aux bogies, aux césures, au pantographe ; ces sources de bruit deviennent significatives dans le bruit interne et externe pour des vitesses dépassant 200 à 250 km/h.

La quantification de certaines sources comme le bruit d'interaction rail/roue peut être conduite par calcul (logiciel TWINS par exemple). Par contre, l'estimation du niveau de puissance acoustique de la majorité des sources nécessite la constitution de bases de données, complétées par l'utilisation de lois simples et robustes permettant des extrapolations des valeurs acoustiques en fonction de certains paramètres comme la vitesse par exemple.

Étape 2 : Chargement acoustique externe des panneaux

Le chargement acoustique externe de l'ensemble des parois du train peut être obtenu en convoluant les niveaux de puissance des sources par des fonctions de transfert $L_{pi} - L_{wk}$; traduisant l'influence de la source indiquée k sur la pression acoustique pariétale en une zone i de paroi.

Ces fonctions de transfert peuvent être obtenues soit sous forme expérimentale, par exemple à partir de mesures à l'arrêt au moyen de sources de puissance acoustique calibrées, soit de manière numérique : tirs de rayons ou utilisation des éléments finis (approche BEM ou éléments infinis).

Dans le cas de train à grande vitesse, ce chargement acoustique pariétal doit être complété par le chargement aérodynamique de la couche limite turbulente. Des lois de type Corcos peuvent être employées : toutefois, les coefficients des formules théoriques doivent être ajustés au moyen de données expérimentales.

Étapes 3 et 4 : Réponse vibro-acoustique de la caisse et champ acoustique interne

Compte tenu de l'amplitude de la bande de fréquence d'intérêt (100 Hz – 5 000 Hz), les approches de type éléments finis ne conviennent pas. Une approche de type SEA est donc retenue.

La plage de validité de la SEA est limitée en hautes fréquences par l'influence potentielle des fuites acoustiques qui ne peuvent être prédites correctement au stade de la définition de l'architecture générale ; en conséquence, le calcul sous-estime parfois les niveaux acoustiques au-dessus de 2 000 Hz environ ; toutefois, cette sous-estimation n'affecte pas la validité de la prévision en termes de bruit global, les composantes de bruit au-dessus de 2 000 Hz étant en général marginales dans le niveau global de bruit interne.

La limite théorique basse fréquence de validité des hypothèses de la SEA peut être estimée à 200 Hz environ dans le cas de matériel ferroviaire. En conséquence, l'indice de confiance des calculs dans la bande 100-200 Hz est plus limité.

La construction d'un modèle SEA fiable nécessite l'utilisation de base de données concernant, notamment, le comportement vibro-acoustique des panneaux les plus complexes.

Au niveau des 4 étapes de calcul, l'approche numérique est conduite par bande de tiers d'octave.

Application de la démarche au TGV-A

La démarche de modélisation est appliquée à la prévision du niveau de bruit interne dans une voiture de première classe de TGV-A (voir figure 1) et est validée par confrontation avec des résultats expérimentaux. Plusieurs environnements (champ libre et tunnel) et plusieurs vitesses de circulation (de 160 à 300 km/h) sont étudiés.

En parallèle, le poids du bruit d'origine solidienne a été évalué de manière expérimentale par une approche de type analyse des voies de passage.

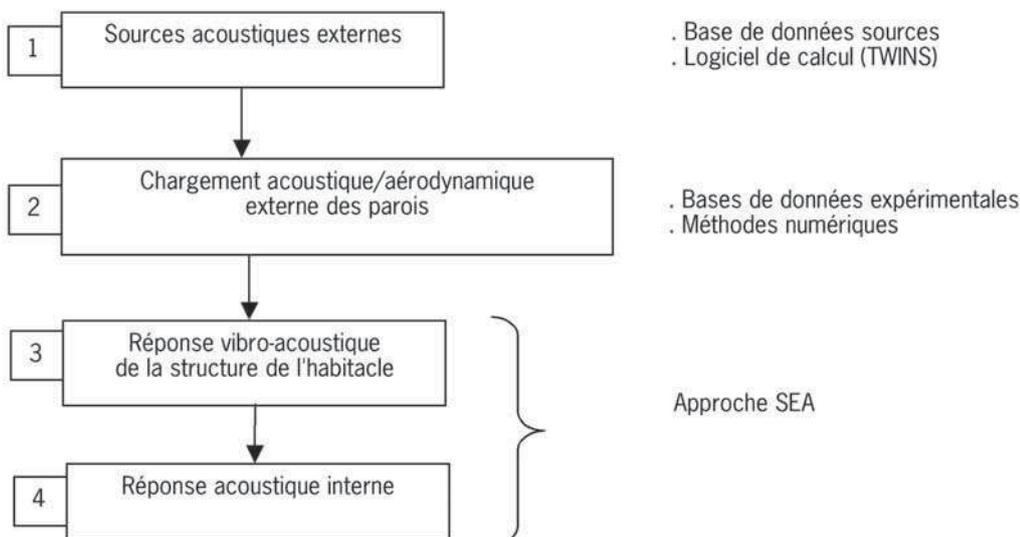


Schéma 1 : Méthodologie de modélisation du bruit interne

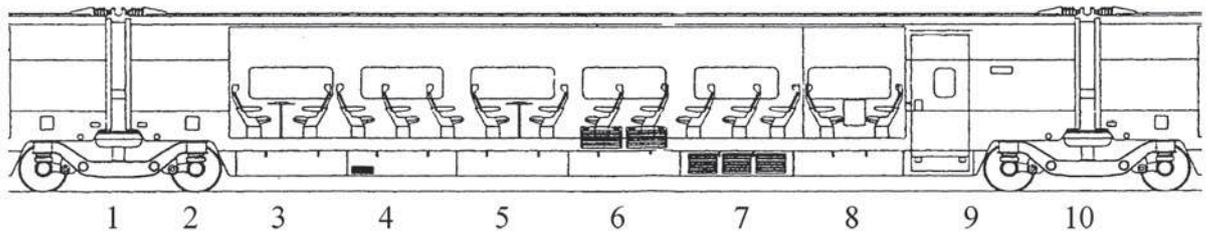


Fig. 1 : Vue d'une remorque de TGV-A

Construction du modèle

La construction du modèle suit les 4 étapes décrites précédemment :

- Prise en compte des sources : les 2 principales sources acoustiques auxquelles est soumise une remorque de TGV, à savoir, le bruit de roulement rail/roue et le bruit aérodynamique du bogie, sont prises en compte. La composante de bruit de roulement est estimée au moyen du logiciel TWINS ; un ajustement de cette composante est réalisé par confrontation aux niveaux mesurés en roulage sur un microphone situé dans la zone bogie. La composante de bruit aérodynamique bogie est issue de données expérimentales obtenues dans le cadre du programme de recherche franco-allemand Deufrafo-K2.
- Chargement acoustique et aérodynamique des panneaux : les chargements acoustiques sont obtenus au moyen d'approches expérimentales. Le chargement aérodynamique est appliqué en utilisant la formulation de type Cockburn & Robertson disponible dans le logiciel AutoSEA. Un ajustement des paramètres d'entrée du modèle a été réalisé de manière à obtenir un chargement similaire à celui du modèle de Corcos utilisé par la SNCF et dont les paramètres avaient été recalés à des mesures en lignes, conduites au moyen de microphones affleurants.
- Réponse vibro-acoustique de la remorque : un modèle SEA a été construit sous le logiciel AutoSEA. Ce modèle distingue les principaux éléments de structure (plancher, faces latérales, baies, pavillon, porte) et le volume interne (figure 2). Le chargement acoustique s'applique sur tous

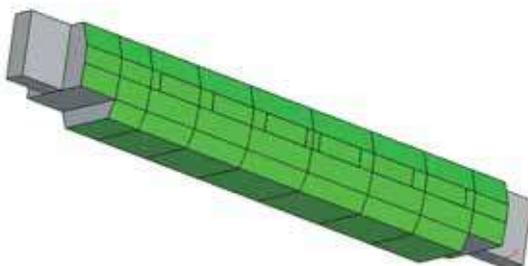


Fig. 2 : Vue externe du modèle

les panneaux tandis que le chargement aérodynamique est limité aux parois latérales, au pavillon et au plancher (les zones bogie et césure sont supposées être protégées de l'écoulement).

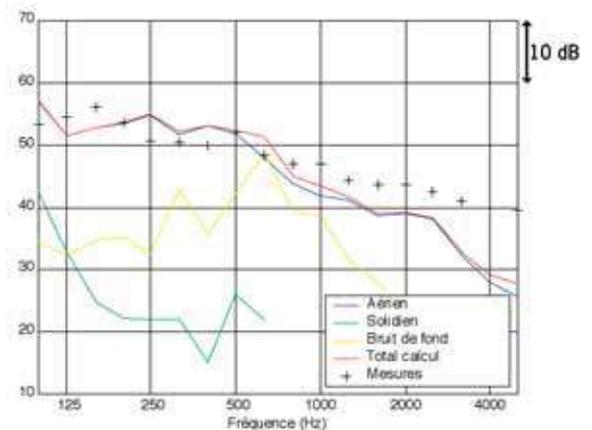
En parallèle de la construction du modèle, une campagne de mesures a été conduite sur une remorque à l'arrêt de manière à ajuster certains paramètres du modèle SEA.

Confrontation avec les mesures en ligne

Les niveaux de bruit interne estimés à partir du modèle sont comparés aux niveaux relevés lors d'essais en ligne pour 9 couples de conditions environnement/vitesse. La composante de bruit solidien transmise par les liaisons bogie/caisse et la composante du bruit de ventilation mesurée à l'arrêt (bruit de fond) sont additionnées au niveau aérien calculé par AutoSEA.

Des écarts entre niveaux calculés et mesurés atteignant 5 dB (A) peuvent être observés lors de la comparaison par tiers d'octave. Le meilleur accord entre simulation et expérimentations est constaté sur les tiers d'octaves centraux compris entre 200 Hz et 2 000 Hz environ. Par contre, l'écart, en termes de niveau global, n'excède pas 3 dB (A), ce qui peut être considéré comme satisfaisant compte tenu de la multiplicité des sources et des chemins de transfert.

Les figures 3 et 4, qui visualisent la comparaison entre les niveaux acoustiques calculé et mesuré au centre de la voiture, sont très représentatives des résultats observés : cas d'un bon accord calcul/mesure (figure 4) et cas d'un écart plus élevé (figure 3).

Fig. 3 : Bruit interne en milieu de voiture
- champ libre - 300 km/h - dB (A)

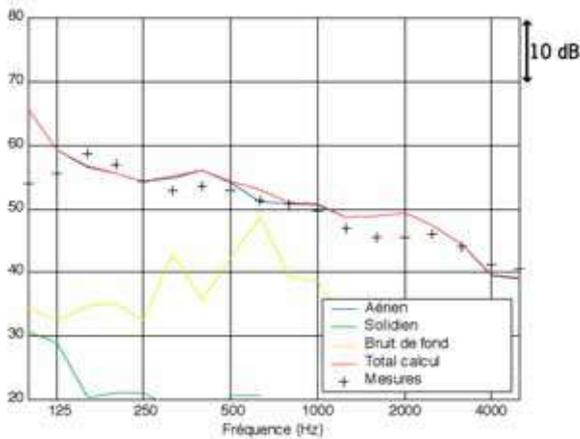


Fig. 4 : Bruit interne en milieu de voiture – tunnel bivoie à 270 km/h – dB (A)

Exploitation du modèle : diagnostic des sources et des voies de passage

Une fois validé, le modèle permet, dans un premier temps, de conduire un diagnostic du bruit interne : quantification du poids respectif des sources externes et localisation/hierarchisation des voies de transfert du bruit.

- Poids des sources dans le bruit externe : la participation effective des 3 principales sources (roulement rail/roue, bruit aérodynamique bogie et excitation par la couche limite turbulente) a été quantifiée pour les différents couples vitesse/environnement étudiés. La quantification peut être conduite en termes de niveau global mais aussi par bande de tiers d'octave.

À 300 km/h en champ libre, le bruit aérodynamique du bogie constitue la source prépondérante devant le bruit de roulement et la couche limite turbulente, dans le cas de surfaces de roulement présentant une faible rugosité. Les composantes roulement et bruit aérodynamique bogie s'équilibrent autour de 220 km/h environ.

- Hiérarchisation des voies de passage du bruit : la proportion de l'énergie acoustique entrante dans la remorque associée aux principaux panneaux a été déterminée. Ainsi, à haute vitesse en champ libre, près de 50 % de l'énergie entrante passe par les faces latérales, baies incluses (figure 5). Ce pourcentage augmente lors de la circulation en tunnel.

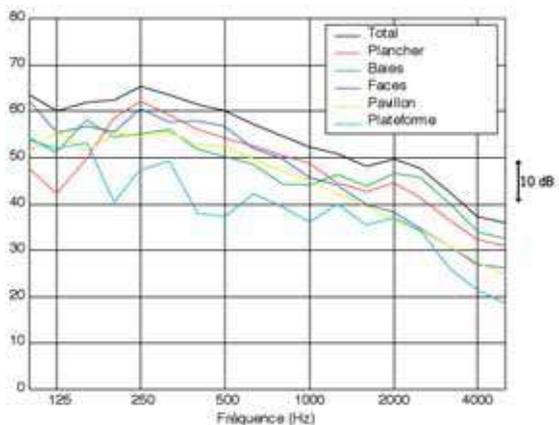


Fig. 5. Puissances entrantes en salle dues aux transferts aériens. Par panneau, champ libre, 270 km/h – Lw en dB (A)

Exploitation du modèle : variations paramétriques

Dans une deuxième étape, des variations paramétriques peuvent être conduites, au niveau des sources, de la modification de certaines parois ou de l'aménagement interne.

Ainsi, une analyse de l'influence de la qualité de l'état des surfaces de roulement sur les niveaux de bruit interne a été conduite : des surfaces rail/roue considérées comme médiocres génèrent un renforcement des niveaux de bruit de 1 à 3 dB (A) à 160 km/h. À 300 km/h, l'impact de ce paramètre sur le confort acoustique devient marginal (moins de 1 dB (A)).

Conclusions - perspectives

Une méthodologie de construction de modèle de synthèse acoustique de matériel ferroviaire a été présentée. Cette méthodologie a été appliquée et testée avec succès sur une voiture de TGV-A.

Cette méthodologie reste tout à fait adaptée pour la modélisation de nouveaux matériels dès le stade de la définition de l'architecture générale : la robustesse de la prévision dépend fortement, dans ce cas, de la pertinence des données d'entrées utilisées pour le modèle. L'utilisation de bases de données suffisamment riches, tant au niveau des sources que des transferts du bruit s'avère nécessaire pour fiabiliser cette démarche de prédiction.

Cette méthodologie mérite à présent d'être complétée par une approche de prévision des transferts solidiens via les liaisons bogie/caisse et motorisation/caisse. En effet, dans un certain nombre de configurations de roulage, cette composante peut présenter une contribution significative au bruit interne.