



**HAL**  
open science

# Détermination de seuils de bruit dans les trains à grande vitesse

Christophe Lambourg, Guillaume Lemaitre, Fabrice Aubin, Catherine Lavandier

## ► To cite this version:

Christophe Lambourg, Guillaume Lemaitre, Fabrice Aubin, Catherine Lavandier. Détermination de seuils de bruit dans les trains à grande vitesse. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848444

**HAL Id: hal-03848444**

**<https://hal.science/hal-03848444v1>**

Submitted on 10 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



16<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
11-15 Avril 2022, Marseille

## Détermination de seuils de bruit dans les trains à grande vitesse

C. Lambourg <sup>a</sup>, G. Lemaitre <sup>b</sup>, F. Aubin <sup>c</sup> et C. Lavandier <sup>d</sup>

<sup>a</sup> ARTEAC-LAB, 8 Allée Léon Gambetta, 13001 Marseille, France

<sup>b</sup> SNCF Direction Technologie, Innovation et Projets Groupe, 1-3 avenue François Mitterrand,  
93210 Saint-Denis, France

<sup>c</sup> SNCF Voyageurs, Centre d'Ingénierie du Matériel, 4 Allée des Gémeaux, 72100 LE MANS,  
France

<sup>d</sup> Laboratoire ETIS, CY Cergy Paris University, ENSEA, CNRS, UMR8051, Cergy, France



Cette présentation est consacrée à une étude portant sur la détermination de seuils de bruit intérieur des trains en fonction de l'activité des passagers. Dans ce cadre, une expérience a été menée au cours de laquelle des sujets étaient assis dans une maquette de train à grande vitesse. Ils devaient réaliser des tâches représentatives des activités des passagers de première et seconde classes (lecture de texte, et visualisation de vidéos), tout en étant soumis à différents bruits. Pour chacun d'eux, les sujets devaient évaluer à quel point le bruit les gênait dans ces activités (jugement d'acceptabilité). Un des principaux résultats de cette étude est que la lecture d'un texte nécessite un environnement significativement plus silencieux que pour le visionnage d'une vidéo, à gêne équivalente. Un autre résultat intéressant est que le jugement des participants est principalement influencé par le niveau global du bruit lorsque leur attention est détournée de l'écoute par la réalisation d'une tâche (écoute distraite). Ce résultat diffère de la conclusion d'une précédente étude menée sur l'évaluation de sons similaires, qui avait montré que d'autres caractéristiques du bruit influencent également le jugement des sujets lorsque leur attention se porte spécifiquement sur l'écoute des sons. Cette apparente contradiction montre l'importance qui doit être accordée à la validité écologique du protocole de ce type d'expérience pour ne pas biaiser les conclusions.

## 1 Introduction

En comparaison des autres modalités de transport, le train présente l'avantage de permettre différentes activités à bord, dans un cadre professionnel ou de loisir. Celles-ci nécessitent un environnement confortable et calme, que les opérateurs ferroviaires doivent donc s'efforcer de garantir. Dans le cadre du confort acoustique, la réduction du niveau de bruit intérieur des trains peut représenter un coût financier élevé, et entraîner une augmentation non-négligeable de la masse du train pour atténuer efficacement les basses fréquences.

À l'heure actuelle, les spécifications acoustiques du matériel roulant sont génériques et indépendantes de l'usage prévu des espaces des trains. Hors la gêne occasionnée par le bruit dépend beaucoup de l'activité des passagers. En effet, les attentes d'un vacancier seront surement moins fortes que celles d'un professionnel qui compte mettre à profit ses heures de transport pour réaliser des activités nécessitant une charge mentale élevée, ou de communiquer avec des collaborateurs.

En partant de ce constat, un projet de recherche a été mené par la SNCF dans le but d'établir des seuils de bruit en fonction des activités des passagers, et donc des différentes zones du train et différentes offres commerciales. Pour cela, un prérequis est de disposer d'un indicateur acoustique représentatif du ressenti des usagers, pour lequel il est ensuite possible de définir des valeurs seuils correspondant à différentes exigences de confort.

La perception du bruit et le confort acoustique dans les trains font l'objet de travaux de recherche depuis plusieurs décennies. Ces travaux visent à comprendre le lien entre les caractéristiques du bruit et la perception qu'en ont les passagers, et d'en déduire des indicateurs dits « objectifs », c'est-à-dire calculés à partir du bruit mesuré, bien corrélés avec le ressenti. Comme dans beaucoup d'autres domaines des transports et de l'industrie, il a été montré que l'intensité sonore joue un rôle prépondérant sur le désagrément occasionné (voir par exemple [1] et [2]). L'indicateur normalisé utilisé par la plupart des opérateurs ferroviaires pour caractériser l'intensité est le niveau pondéré A, avant tout par facilité. En effet, plusieurs études ont montré que les modèles de sonie sont plus représentatifs de la perception de l'intensité [3].

Cependant, la gêne éprouvée par les passagers est également liée à d'autres caractéristiques du bruit, dont en particulier la prépondérance des basses fréquences engendrées par les sources aéro-acoustiques, le contact roue-rail et les phénomènes de travellage [4]. Deux types d'indicateurs ont été proposés pour caractériser l'influence de l'équilibre spectral : i) l'écart à un gabarit de spectre optimal semblable à ceux utilisés pour spécifier le bruit de fond des bureaux [5,6]; ii) des indicateurs psychoacoustiques tels que l'acuité [1-3, 7-8].

La gêne des passagers est également influencée par la présence de composantes tonales. Celles-ci sont liées au fonctionnement des équipements électriques et des systèmes de climatisation, et se traduisent par des sifflements particulièrement audibles lorsque le train est à l'arrêt [9]. Différents indicateurs ont été établis pour caractériser leur perception [10].

Les études mentionnées précédemment ont été réalisées en suivant une approche psychoacoustique, dans laquelle des sons sont diffusés dans des conditions de laboratoire à un panel d'auditeurs, qui doivent les écouter attentivement et les évaluer. Dans cette approche, on cherche à maximiser la répétabilité et la sensibilité des évaluations en réduisant autant que possible l'influence d'autres facteurs externes qui pourraient perturber l'attention des sujets du test.

Si ces méthodes permettent ainsi d'identifier les caractéristiques du bruit perçues par les auditeurs, et donc de mettre au point des indicateurs ou des échelles de désagrément, elles ne permettent pas à elles-seules de fixer des seuils. Traditionnellement, les seuils utilisés à l'heure actuelle dans les spécifications du matériel roulant relèvent de l'expérience des experts, et d'un compromis entre ce que serait souhaitable et ce qui est réalisable.

Cependant, d'autres approches ont été suivies pour étudier la gêne sonore et pourraient permettre d'établir ces seuils sur des bases plus objectives. Plusieurs travaux réalisés notamment par SNCF ont montré que ce qui gêne les passagers, c'est ce qui les empêche de réaliser leurs activités [11, 12], et en particulier les conversations des autres passagers, les bruits intermittents (portes, bruits de pas), et les bruits parasites (grincements, vibrations, grésillements). Concernant les conversations, le bruit du train peut également avoir un effet positif en préservant la confidentialité des conversations [13-15]. Le niveau optimal de bruit intérieur pour masquer une discussion aux autres passagers semble se situer entre 60 et 65 dB(A), voire moins

[15, 16]. Des niveaux supérieurs à 71 dB(A) empêchent en revanche les passagers de discuter avec leur voisin [17]. Ces valeurs limites sont à comparer avec les niveaux cible préconisés par l'Union Internationale de Chemins de fer. Par exemple, avec un niveau requis de 75 dB(A) en plateforme, il est impossible pour les passagers de téléphoner dans ces espaces (malgré les recommandations de l'opérateur), ce qui les incite à téléphoner à leur place, et donc à déranger leurs voisins (!)

Pour pouvoir fixer des seuils, il est donc nécessaire d'étudier l'effet du bruit sur les activités des passagers. Dans une telle approche, dite « cognitive », il n'est pas demandé aux sujets de l'étude de focaliser leur attention sur l'écoute, ni de juger directement les sons (écoute distraite). Mais on cherche plutôt à évaluer l'effet du bruit sur des tâches qu'ils doivent réaliser [18]. Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans ce cadre pour évaluer l'effet du bruit intérieur de tramway ou de bus [19], du métro [20], d'hélicoptères [21] ou routiers [22].

Le travail présenté ici a procédé en plusieurs étapes : tout d'abord, de nombreux enregistrements ont été effectués à bord de plusieurs trains, afin de réunir une base de données de bruits fond. Ensuite, une première étude expérimentale en suivant une approche psychoacoustique, a permis de caractériser les composantes du bruit intérieur intervenant dans le désagrément perçu par les voyageurs. Une seconde étude expérimentale fondée sur une approche cognitive (écoute distraite) a ensuite permis de déterminer des seuils d'acceptabilité du confort en plaçant des participants dans une maquette de couloir de TGV et en mesurant l'effet de différents bruits sur des activités de lecture et de travail.

## 2 Etude préliminaire en suivant une approche psychoacoustique

### 2.1 Méthodologie

En grand nombre d'enregistrements ont été réalisés dans des trains en service commercial (12 matériels roulants différents, 22 voyages), à différentes vitesses (de 0 à 320 km/h) et différents emplacements dans le trains (salle voyageur, plateformes, voiture bar). Les prises de son ont été effectuées par un opérateur portant une paire de microphones binauraux. La vitesse au moment de la prise de son était mesurée à l'aide d'un GPS.

Une sélection de 78 séquences a été effectuée parmi ces enregistrements, en retenant uniquement des extraits ne contenant pas de bruits parasites particuliers, ni de conversations entre passagers.

Le protocole expérimental était inspiré du test MUSHRA préconisé par l'ITU pour évaluer les codecs audio [13]. Le test est constitué d'une série d'écrans avec 11 curseurs, chaque curseur correspondant à une séquence sonore (voir la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les participants écoutaient les séquences en cliquant sur un bouton et jugeaient chaque son à l'aide d'un curseur variant de « le plus gênant » à « le moins gênant ». Ils pouvaient réécouter les sons autant de fois qu'ils le souhaitaient. Ils pouvaient aussi réordonner les sons sur l'interface de manière à faciliter la comparaison.

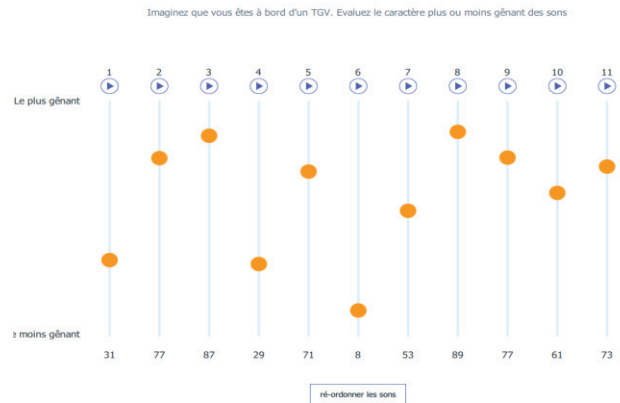


Figure 1 – Interface du test de l'étude préliminaire

Le test était divisé en trois séries de 26 sons, chaque série correspondant à une gamme de sonie, pour que celle-ci ne varie pas trop entre les sons. Dans chaque série, deux sons *a priori* le moins et le plus gênant (« ancrés ») ont été répétés systématiquement à chaque écran, sans qu'ils soient indiqués aux participants, pour pouvoir agglomérer les résultats obtenus. Les ancrés correspondant aux trois gammes de sonies ( $3 \times 2 = 6$  sons) ont également été comparées entre elles.

L'ordre des séries, des écrans, et des sons dans chaque écran était déterminé de manière aléatoire pour chaque participant.

Trente-cinq personnes (18 femmes et 17 hommes entre 18 et 64 ans) ont participé à l'étude.

L'expérience se déroulait dans une salle traitée acoustiquement. Les séquences binaurales étaient reproduites par un système constitué de deux haut-parleurs placés à 20 cm des oreilles du participant et d'un caisson de basse positionné derrière. Les séquences étaient égalisées pour compenser la réponse en fréquence des microphones et des haut-parleurs. Un tel système dit « transaural champ proche » permet une reproduction très précise du champ acoustique enregistré, y compris ses composantes spatiales, dans des conditions d'écoute plus confortables et naturelles qu'un casque [24].

### 2.2 Résultats

Après avoir vérifié que les réponses des participants étaient cohérentes entre elles, celles-ci ont été soumises à une analyse de régression multilinéaire. Une telle analyse cherche à modéliser les jugements des participants par une combinaison linéaire d'indicateurs. Douze indicateurs psychoacoustiques standards ont ainsi servi à cette analyse [1] et les différents modèles possibles ont été comparés entre eux à l'aide du coefficient de détermination  $R^2$  (i.e. le pourcentage de variance expliquée par le modèle). Le modèle le mieux ajusté aux données faisait ainsi intervenir un indicateur de sonie et un indicateur de tonalité, avec un effet de la sonie beaucoup plus important que celui de la tonalité ( $R^2=93\%$ ). Ce modèle est représenté dans la Figure 2.

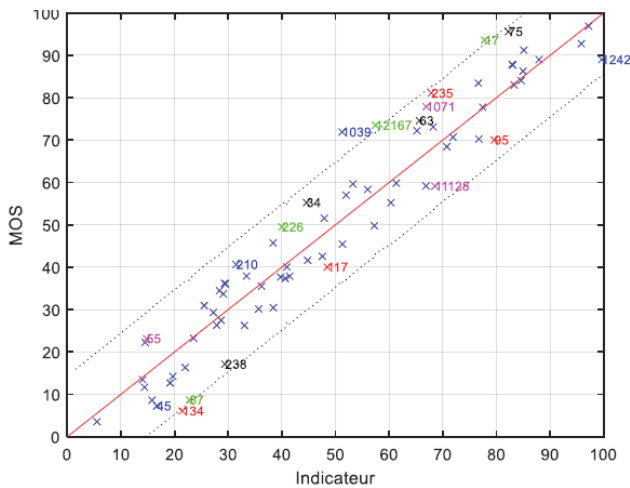


Figure 2 – Modèle de régression de l'indicateur établi au cours de l'étude préliminaire. L'axe des abscisses représente la prédiction du modèle. L'axe des ordonnées représente les notes moyennes des participants. Les lignes en pointillé représentent l'intervalle de confiance à 95 % autour de la droite de régression.

Cette première étude a confirmé les résultats reportés dans la littérature scientifique : Ils montrent que le niveau sonore est le premier facteur qui influence le désagrément, et que les modèles de sonie sont plus précis que le niveau moyen pondéré A. Ils montrent également que l'émergence de composantes tonales est un autre facteur contribuant à la gêne. Ces composantes sont particulièrement gênantes à basse vitesse ou à l'arrêt, car elles émergent nettement du bruit de fond. Leur influence est cependant moins importante que celle de la sonie, notamment lorsque le train est en circulation.

La combinaison de ces deux facteurs a permis de définir un indicateur représentatif du désagrément exprimé par les sujets du test. L'étape suivante du projet a consisté à établir des seuils pour cet indicateur.

### 3 Etude de l'effet du bruit sur l'activité des voyageurs

#### 3.1 Méthodologie

Cette seconde expérience a été réalisée sur un panel de 60 participants, représentatif des passagers de TGV (30 hommes et 30 femmes de 19 à 64 ans).

Elle s'est déroulée dans une salle d'écoute du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique de Marseille, dont les dimensions et la réponse acoustique sont conformes aux préconisations de l'ITU pour l'évaluation des dégradations faibles des systèmes audio [25]. Pour favoriser une remise en contexte, les participants étaient installés dans une maquette de couloir de TGV Océane. La maquette était constituée de trois rangées de deux sièges et d'une paroi reproduisant la baie vitrée (voir Figure 3). Elle était sonorisée à l'aide de 8 haut-parleurs médium aigu disposés autour du participant, en dehors de son champ de vision, complétés par 2 subwoofer placés derrière. Le système audio était égalisé de manière à

reproduire précisément le signal sonore enregistré au niveau de la tête du participant.



Figure 3 – participant réalisant la tâche de visionnage des séries dans la maquette sonorisée. Les rideaux sont tirés pendant l'expérience.

L'expérience comportait deux tests successifs, correspondant à deux situations différentes à bord d'un train :

- Passager « pro » en voiture première classe lisant des textes
- Passager « loisir » en voiture seconde classe visionnant des vidéos

Quatorze séquences sonores étaient utilisées pour la tâche de lecture. Ces séquences étaient créées à partir d'un enregistrement de bruit intérieur de train, modifié de manière à faire varier son niveau sonore (selon sept niveaux) et l'émergence des composantes tonales (selon deux modalités : absence totale d'émergence ou très forte émergence tonale). Pour la tâche de visionnage de vidéo, sept séquences sonores se distinguant uniquement par leur niveau sonore ont été présentées. Ces séquences duraient environ deux minutes chacune.

Dans la tâche de visionnage, les participants portaient également un casque audio (AKG K745) leur permettant d'écouter la bande son. Ces casques de type ouvert sont transparents acoustiquement jusqu'à 1 kHz, puis ont une atténuation croissante au-delà, jusqu'à 20 dB au-dessus 2-3 kHz. Par la suite, l'atténuation en fonction de la fréquence a été prise en compte dans le calcul des indicateurs pour que les caractéristiques du casque n'introduisent pas de biais dans les résultats.

Dans la tâche de lecture, les sujets lisaient une série de 4 textes, choisis aléatoirement parmi une base de 56 textes de difficultés similaires. Chacun des textes étaient lus alors qu'une des 14 séquences de bruit de fond était jouée, totalisant 56 essais (4\*14) par participant (en plus de séquences de calibration et d'entraînement). Après chaque essai, les participants répondaient à des questions sur le texte [26], et ils jugeaient de l'effet du bruit sur la lecture en répondant la question : « imaginez que vous deviez lire pendant un voyage de 3 heures, comment jugeriez-vous ce

son ? » sur une échelle en 5 points : 1- Complètement acceptable, 2-Acceptable, 3-Tout juste acceptable, 4-Inacceptable, 5-Complètement inacceptable.

Dans la tâche de visionnage les participants regardaient des épisodes d'une série télévisuelle, alors que les bruits de fond étaient joués. Il y avait sept séquences correspondants au sept niveaux du bruit de fond. Après chacune d'elles, les participants jugeaient de l'acceptabilité du bruit en répondant aux mêmes questions que pour la tâche de lecture.

### 3.2 Résultats

Bien que la moitié des sons présentés au cours de la tâche de lecture aient une émergence tonale très différente de l'autre moitié, aucun effet significatif de ce facteur sur les réponses des sujets n'a pu être mis en évidence ( $p > 0.05$  test de Wilcoxon), contrairement à ce qui a été observé sur les résultats du test préliminaire.

Sans grande surprise, l'intensité sonore a en revanche un effet très significatif sur les réponses. La Figure 4 représente les résultats de la question d'acceptabilité de la gêne en 5 points en fonction du niveau sonore pondéré A, ainsi que les modèles de régression polynomiale obtenus pour les deux tâches. Les coefficients de détermination  $R^2$  associés à ces modèles sont très élevés (respectivement 0.9 et 0.95 pour la lecture et le visionnage de vidéo). Les résultats obtenus avec l'indicateur de sonie ISO532B sont équivalents (non représentés ici).

De manière attendue, les participants ont trouvé les séquences avec le niveau le plus faible comme étant les plus acceptables (100 % des participants considérant les séquences les plus faibles « tout juste acceptables » ou mieux, alors que seulement 20 % des participants ont considéré les séquences les plus fortes comme « tout juste acceptables » ou mieux).

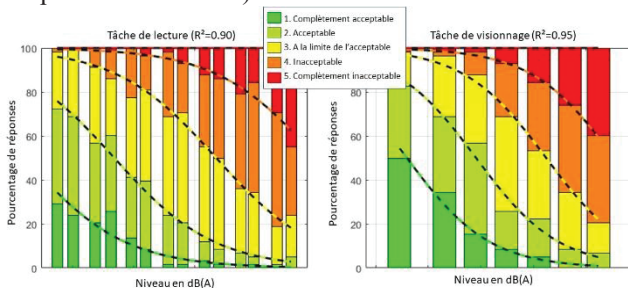


Figure 4 - Jugements d'acceptabilité de la gêne en fonction du niveau sonore pondéré A pour la tâche de lecture (gauche) et de visionnage de vidéo (droite). Les barres de de couleur représentent le pourcentage de réponses dans chaque catégorie. Les pointillés représentent la régression logistique multinomiale.

La Figure 5 permet de comparer les résultats des deux tâches, en juxtaposant les modèles de régression logistique (modélisant les pourcentages de réponses au moins supérieures à « A la limite de l'acceptable ») pour les deux tâches. On peut noter le même type de relation, mais décalée vers les niveaux les plus faibles pour la tâche de lecture en comparaison de la tâche de visionnage de vidéos. Il est rappelé que l'atténuation du casque a été compensée avant le

calcul des niveaux sonores correspondant à cette tâche, et n'est donc pas responsable de l'écart observé.

Il ressort de la Figure 5 qu'il est nécessaire de réduire le niveau sonore d'environ 5 dB(A) pour atteindre un pourcentage d'acceptabilité du bruit pendant la tâche de lecture équivalent à celui de la tâche de visionnage de vidéo. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la lecture attentive d'un texte requiert plus de ressources attentionnelles et cognitives que le visionnage d'une série humoristique.

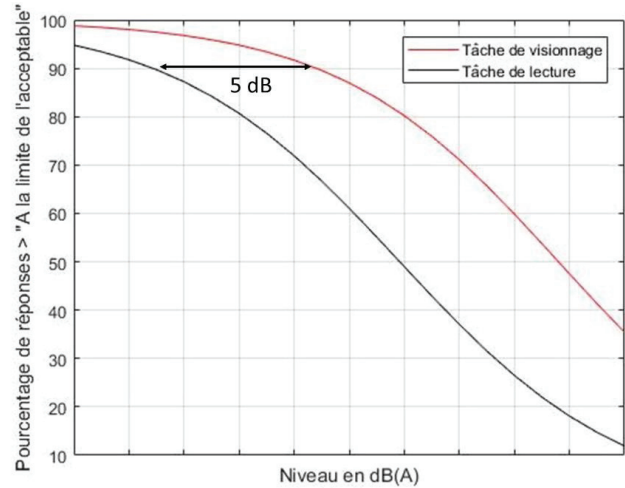


Figure 5 - Comparaison entre les modèles de régression logistique (pourcentage de réponse supérieures ou égales à « A la limite de l'acceptable ») pour les deux tâches.

## 4 Discussion générale

D'un point de vue méthodologique, il est intéressant de comparer les deux études présentées ici. Une approche psychoacoustique a été suivie pour l'étude préliminaire, dans laquelle les participants écoutaient attentivement des séquences sonores et devaient juger du désagrément qu'ils occasionnent, hors contexte. La seconde étude fondée sur une approche cognitive, se distingue par le fait que les participants étaient placés dans une situation de voyage réaliste, en effectuant des activités typiques de voyageurs, sans prêter une attention particulière aux séquences sonores diffusées (écoute distraite). Ils devaient d'autre part juger dans quelle mesure ils étaient gênés pour effectuer la tâche demandée, et non évaluer le bruit en lui-même. Les résultats de ces deux études sont qualitativement différents : alors que la première a permis d'identifier les caractéristiques du bruit perçues par les participants, la seconde étude a mis évidence lesquelles de ces caractéristiques peuvent expliquer effectivement la gêne ressentie par les voyageurs dans leurs activités. Bien que les composantes tonales émergences soient jugées désagréables dans une situation d'écoute attentive, elles ne participent que marginalement à la gêne des voyageurs lorsque ceux-ci sont plongés dans une activité, alors que l'intensité sonore reste le facteur principal de gêne. C'est donc la combinaison de ces deux approches qui permet de faire la part des choses.

En ce qui concerne l'établissement de seuils pour différentes activités, la seconde étude a montré que les activités nécessitant des ressources attentionnelles et

cognitives (p. ex. lire et comprendre un texte) nécessitent un environnement plus calme d'environ 5 dB(A) que pour une activité de loisir. Ce travail (ainsi que d'autres études non décrites ici) a permis à SNCF et SNCF Voyageurs d'établir des nouveaux seuils acoustiques pour le matériel roulant, et garantir ainsi que les voyageurs pourront réaliser confortablement des activités correspondant à différentes offres commerciales. Ces seuils ont été intégrés dans un outil de cartographie acoustique utilisé par l'ingénierie du matériel, permettant de comparer le confort de différents trains, différentes positions dans le train, à différentes vitesses. Ils pourraient également être utilisés pour la spécification de nouveau matériel, ou lors d'opérations de rénovation, par exemple pour créer des espaces dédiés à différentes activités à bord.

## Références

- [1] Choi, S., Park, C. P., Park, B., & Paik, J.-S. (2011). Acoustic comfort indicator for the assessment of interior noise in Korean high-speed trains.
- [2] Meng, F., & Yang, L. (2014). Sound Quality Evaluation on Interior Noise in High-speed Trains.
- [3] Zwicker, E., & Fastl, H. (1991). *Psychoacoustics: Facts and models* (Vol. 22). Springer Verlag.
- [4] Wu, T. X., & Thompson, D. J. (2006). On the rolling noise generation due to wheel/track parametric excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3–5), 566–574.
- [5] Blazier, W. E. (1981). Revised noise criteria for application in the acoustical design and rating of HVAC systems. *Noise Control Engineering Journal*, 16(2), 64–73.
- [6] Hardy, A. E. J. (2000). Measurement and assessment of noise within passenger trains. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 819–829.
- [7] Hong, J. Y., Cha, Y., & Jeon, J. Y. (2015). Noise in the passenger cars of high-speed trains. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(6), 3513–3521.
- [8] Parizet, E., Hamzaoui, N., & Jacquemoud, J. (2002). Noise assessment in a high-speed train. *Applied Acoustics*, 63(10), 1109–1124.
- [9] Patsouras, C., Fastl, H., Widmann, U., & Hölzl, G. (2000). Privacy versus sound quality in high speed trains.
- [10] F. Dubois (2011) Détection de signaux émergents au sein d'habitacles : Mesures et modélisation, Thèse de doctorat de l'Université de Provence Aix Marseille I
- [11] Khan, M. S. (2002). Evaluation of acoustical comfort in passenger trains. *Acta Acustica United with Acustica*, 88(2), 270–277
- [12] Mzali, M. (2002). Perception de l'ambiance sonore et évaluation du confort acoustique dans les trains. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 6.
- [13] Hong, J. Y., & Jeon, J. Y. (2014). Enhancement of acoustic environment with regard to speech privacy and annoyance in passenger cars of high-speed trains.
- [14] Khan, M. S. (2003). Effects of masking sound on train passenger aboard activities and on other interior annoying noises. *Acta Acustica United with Acustica*, 89(4), 711–717.
- [15] Jeon, J. Y., Hong, J. Y., Jang, H. S., & Kim, J. H. (2015). Speech privacy and annoyance considerations in the acoustic environment of passenger cars of high-speed trains. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(6), 3976–3984.
- [16] Kuwano, S., Namba, S., & Okamoto, T. (2004). Psychological evaluation of sound environment in a compartment of a high-speed train. *Journal of Sound and Vibration*, 277(3), 491–500.
- [17] Maffei, L., Masullo, M., Alexeeva, N., Palmieri, U., & Senese, V. P. (2012). The speech intelligibility aboard metros in different running conditions. *Acta Acustica United with Acustica*, 98(4), 577–587.
- [18] Brocolini, L., Parizet, E., & Chevret, P. (2016). Effect of masking noise on cognitive performance and annoyance in open plan offices. *Applied Acoustics*, 114, 44–55.
- [19] Sandrock, S., Griefahn, B., Kaczmarek, T., Hafke, H., Preis, A., & Gjestland, T. (2008). Experimental studies on annoyance caused by noises from trams and buses. *Journal of Sound and Vibration*, 313(3–5), 908–919.
- [20] Iachini, T., Maffei, L., Ruotolo, F., Senese, V. P., Ruggiero, G., Masullo, M., & Alekseeva, N. (2012). Multisensory assessment of acoustic comfort aboard metros: a virtual reality study. *Applied Cognitive Psychology*, 26(5), 757–767.
- [21] Soheila, J. E., Mickaël, C., & Simon, F. (2019). Assessment of the helicopter cabin noise impact on mental calculation and memory performance. INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering.
- [22] Ruotolo, F., Maffei, L., Di Gabriele, M., Iachini, T., Masullo, M., Ruggiero, G., & Senese, V. P. (2013). Immersive virtual reality and environmental noise assessment: An innovative audio-visual approach. *Environmental Impact Assessment Review*, 41, 10–20.
- [23] I. T. U. (Ed.). (2014). Recommendation ITU-R BS.1534-1. Method for the subjective assessment of intermediate quality level of audio systems.
- [24] Vidal, A. (2017). Diffusion de son 3D par synthèse de champs acoustiques binauraux. Université Aix-Marseille.
- [25] I. T. U. (Ed.). (2015). Recommendation ITU-R BS.1116-3. Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems.
- [26] Lavandier, C., Regragui, M., Dedieu, R., & Royer, C. (2022). Influence of road traffic noise peaks on reading task performance and disturbance in a laboratory context. *Acta Acustica*, 6(3).