

L'exposition vibratoire et sonore d'origine ferroviaire dans le bâti

Synthèse des recherches internationales sur les relations exposition-réponse réalisées dans le cadre des projets européens RIVAS et CARGOVIBES

Michel Villot

CSTB-DSC

24, rue Joseph Fourier

38400 Saint Martin d'Hères

Tél : 04 76 76 25 25

E-mail : michel.villot@cstb.fr

Résumé

Cet article présente une synthèse des recherches internationales, réalisées dans le cadre des deux projets européens récents RIVAS et CARGOVIBES, sur l'exposition vibratoire et sonore (bruit solidien) d'origine ferroviaire dans le bâti et sa relation avec le ressenti des riverains. L'article montre d'abord les spécificités des vibrations et du bruit solidien associés puis présente successivement les apports des deux projets : en particulier, (i) pour le projet RIVAS : identification de quatre descripteurs d'exposition complémentaires associés à des enquêtes grande échelle, utilisation d'une courbe exposition-réponse humaine typifiée et caractérisation/identification du bruit solidien (par opposition au bruit aérien); et (ii) pour le projet CARGOVIBES : obtention de courbes exposition-réponse « universelles » pour les vibrations ferroviaires, à partir d'une méta-analyse de sept enquêtes à grande échelle effectuées dans sept pays différents et premiers résultats sur les effets de l'exposition vibratoire sur le sommeil exprimés en termes de changements biologiques et de qualité du sommeil.

Abstract

This paper presents a summary of the international research work performed within the two recent European projects RIVAS and CARGOVIBES on exposure to vibration and ground borne noise from railways in buildings and associated annoyance. First the particularities of railway vibration and associated ground borne noise are showed; then the main findings of the two projects are presented successively: (i) for RIVAS: identification of four complementary exposure descriptors associated with large scale socio-vibration surveys, use of an idealized exposure-response curve and characterization/identification of ground borne noise (as opposed to airborne noise); and (ii) for CARGOVIBES: finding of "universal" exposure-response relationships for railway vibration from a meta-analysis of 7 large scale surveys performed in 7 different countries and first results on the effects of vibration exposure on sleep, expressed in terms of biological changes and sleep quality.



Cet article se limite à l'exposition vibratoire et sonore d'origine ferroviaire dans le bâti (donc à l'intérieur des bâtiments), le terme sonore étant lui-même limité au bruit solidien c'est-à-dire au bruit rayonné dans les locaux par les parois mises en vibration ; le bruit aérien intérieur transmis par la façade du bâtiment dans le cas de voies ferrées en surface n'est donc pas considéré. Cette exposition a été étudiée dans deux projets européens récents sur les vibrations d'origine ferroviaire, trains de fret en particulier : (i) le projet RIVAS [1] (fin en décembre 2013) centré sur la recherche de solutions d'atténuation à la source et leur évaluation en termes de diminution de l'exposition vibratoire et sonore (bruit solidien) chez les riverains et diminution de la gêne associée ; le CSTB était responsable de la tâche sur l'évaluation des solutions en utilisant les connaissances et outils existants (pas de budget de développement) ; (ii) le projet CARGOVIBES [2] (fin en mars 2014),

plus centré sur la réponse humaine aux vibrations ferroviaires et en particulier sur les effets des vibrations sur le sommeil ; le CSTB n'était pas partenaire du projet mais a participé à un séminaire commun aux deux projets européens sur la réponse humaine aux vibrations ferroviaires et a assisté à la conférence finale du projet CARGOVIBES.

Cet article est divisé en trois parties : une première partie décrit les spécificités des vibrations et du bruit solidien associé, suivie de deux autres parties centrées respectivement sur les apports du projet RIVAS et sur ceux du projet CARGOVIBES relativement à l'exposition aux vibrations et sa relation avec le ressenti des riverains. L'auteur de l'article n'est ni un spécialiste en science humaine, ni un spécialiste en médecine et il est donc possible que certains termes utilisés n'aient pas la précision souhaitée pour un expert de ces domaines.

Vibrations et bruit solidien associés

Les vibrations ferroviaires sont transmises du sol à la structure du bâtiment et aux planchers, leur contenu fréquentiel étant modifié par le comportement dynamique de ces structures (modes de résonance). Elles peuvent être perçues corporellement par les riverains, le seuil de perception exprimé en vitesse vibratoire (voir section Ressenti des riverains page suivante) étant voisin de 1 mm/s (66 dBv réf. $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$).

La gamme de fréquence usuelle considérée pour les vibrations est de 1 à 80 Hz ; toutefois, pour l'aspect Effet sur les personnes, la limite basse choisie est souvent supérieure (4 ou 8 Hz), la réponse des structures (premiers modes de planchers en particulier) étant en général au-delà de ces fréquences. Ces vibrations de structure vont rayonner du bruit (bruit solidien) qui peut être perçu auditivement par le riverain si le niveau émerge du bruit de fond, de l'ordre de 30 dB(A) en supposant des bâtiments d'habitation récents et conformes à la réglementation acoustique de 1995 ; la gamme de fréquence usuelle considérée pour le bruit solidien ferroviaire, plutôt basses fréquences, est 16- 250 Hz.

Le bruit solidien [3] a donc une double nature de bruit dont la source est une paroi vibrante du local où se trouve le riverain et qui doit systématiquement être caractérisé à la fois par un indicateur acoustique et par un indicateur vibratoire. Son identification même implique une double mesure (vibratoire et sonore) pour ôter toute suspicion sur sa nature, ce qui nécessite d'élever la limite haute des mesures vibratoires à 250 Hz.

Notons que l'acoustique du bâtiment donne une relation statistique énergétique permettant d'estimer par bande de fréquences (1/3 octave) le niveau sonore induit dans un local à partir du niveau vibratoire des parois [4]. Cela permet de comparer ce niveau calculé au niveau sonore mesuré et ainsi identifier tout bruit aérien parasite. Cela permet aussi de savoir qui, des vibrations ou du bruit solidien, détermine le niveau cible à respecter pour le confort des riverains ; et la réponse dépend du contenu fréquentiel, donc de la configuration de source considérée et des premiers modes de résonance des structures (planchers en particulier) : un bruit solidien de 30 dB(A) très basses fréquences centré sur 16 Hz est généré, du fait de la forte pondération A, par un niveau vibratoire élevé (78 dBv) bien supérieur au seuil de perception (66 dBv) ; le niveau cible sera donc un niveau vibratoire de l'ordre de 66 dBv ; au contraire, un bruit solidien de 30 dB(A) centré sur 63 Hz est généré par un niveau vibratoire moins élevé (48 dBv) bien inférieur au seuil de perception ; le niveau cible sera alors un niveau de bruit solidien de l'ordre de 30 dB(A) (niveau cible de la réglementation acoustique de 1995 pour les équipements).

Apports du projet RIVAS

Dans ce projet, la première tâche a consisté à estimer le transfert vibratoire du sol (proche des voies) au bâtiment et aux planchers des logements en particulier. Les méthodes et données utilisées ne sont pas décrites dans

cet article, centré sur les relations exposition-réponse humaine, mais peuvent être trouvées dans le livrable D1.6 [4], téléchargeable sur le site du projet [1].

Une deuxième tâche a consisté à faire le point sur les descripteurs d'exposition vibratoires et sonores (bruit solidien ou plus généralement bruit basses fréquences) existants ; un rapport de synthèse a été rédigé (livrable D1.4 [5]), montrant la très grande diversité des descripteurs utilisés (vitesse ou accélération, valeur linéaire ou en dB, différentes pondérations...). Le choix des descripteurs les plus pertinents a été fait ainsi :

- Seuls les descripteurs associés à des courbes exposition-réponse, résultats d'enquêtes à grande échelle ont été retenus ;
- Les deux aspects effet perturbateur (caractérisé par une valeur maximale sur un évènement) et effet cumulatif (caractérisé par une valeur moyenne sur une durée plus longue) ont été considérés et retenus ;
- Vibrations et bruit solidien ont été pris en compte avec le même type de descripteur (deux aspects du même phénomène) ;
- Les pondérations les plus usuelles (W_m pour les vitesses vibratoires [6] et A pour le bruit) ont été utilisées, bien qu'imparfaites.

Quatre descripteurs ont donc été retenus, indiqués dans le tableau 1. Le symbole S indique une valeur efficace mobile obtenue avec une constante de temps «slow». Le niveau moyen en bruit solidien est exprimé avec la prise en compte d'un ressenti différencié suivant les périodes jour/soir/nuit (day/evening/night), en supposant ce ressenti similaire à celui du bruit (aérien) de trafic routier. Par contre les données relatives aux vibrations sont actuellement insuffisantes pour faire de même avec les vibrations (voir section Ressenti des riverains page suivante) ; aussi un niveau équivalent non différencié sur 24h est-il utilisé.

	Vibrations dBv(W_m) réf. $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$	Bruit solidien dB(A)
Niveau max	$L_{vWm,S,max}$	$L_{pA,S,max}$
Niveau moyen	$L_{vWm,eq,24h}$	$L_{pA,den,24h}$

Tabl. 1 : Descripteurs d'exposition utilisés dans RIVAS
Exposure descriptors used in RIVAS

Plusieurs courbes exposition-réponse provenant d'enquêtes à grande échelle effectuées dans différents pays (Royaume Uni, Norvège et Etats Unis en particulier) ont été comparées ; elles présentent de nombreuses similarités, aussi une courbe type unique a été utilisée dans le projet pour les quatre descripteurs retenus, ses caractéristiques étant indiquées Figure 1. Cette figure montre en particulier que dans le projet RIVAS, la réponse des riverains est exprimée en pourcentage de gens très gênés (*Highly Annoyed*), que les niveaux cibles choisis (*Target*) correspondent à 5% de personnes très gênées et qu'une incertitude est prise en compte (courbe moyenne + 2 écarts-type retenus, correspondant à un niveau de confiance voisin de 95%).

1- Pour éviter toute confusion, le symbole dBv est utilisé dans cet article pour exprimer les niveaux de vitesse vibratoire en dB.

Notons que l'existence d'une courbe exposition-réponse, résultat d'une enquête à grande échelle n'est pas le seul critère de pertinence d'un descripteur d'exposition et que d'autres critères liés à sa validité scientifique ou opérationnelle ou à son efficacité existent, non pris en compte dans RIVAS. Ces critères peuvent être trouvés dans un fascicule de documentation AFNOR [3], produit par le groupe de travail S30MI et actuellement soumis à enquête, et qui recense les indicateurs physiques caractérisant l'exposition aux bruits audibles et aux vibrations générés par l'homme et analyse leur pertinence.

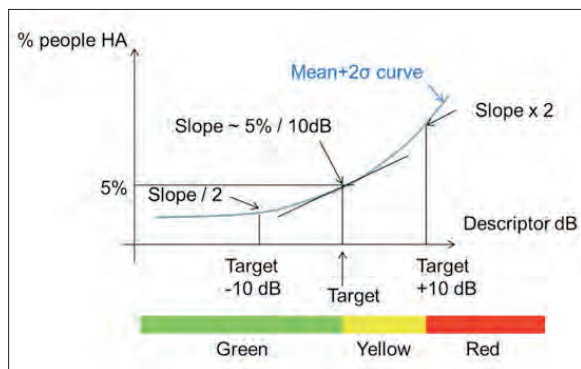


Fig. 1 : Courbe exposition-réponse type utilisée dans RIVAS
Idealized exposure-response curve used in RIVAS

Notons enfin que le caractère basses fréquences du bruit solide ferroviaire a été considéré dans RIVAS : ce caractère est identifié dans un certain nombre de pays par le calcul de la différence de deux niveaux sonores globaux $L_{pC}-L_{pA}$ avec deux pondérations différentes (pondération C, faible aux basses fréquences, et pondération A, beaucoup plus forte aux basses fréquences). Une différence d'au moins 15 à 20 dB suivant les pays permet l'identification d'un bruit « basses fréquences ». Une fois identifié, le bruit basses fréquences est comparé à des seuils spécifiques, généralement plus sévères (de 5 dB en Allemagne par exemple), peut-être pour compenser l'émergence fréquentielle du bruit solide par rapport à un bruit de même niveau sonore mais plus large bande.

Apports du projet CARGOVIBES

Seuls les résultats du projet relatifs à la réponse humaine aux vibrations ferroviaires sont considérés dans cet article et deux aspects y sont abordés : celui du ressenti du riverain en terme de gêne et celui de l'effet des vibrations sur le sommeil. Tous les résultats présentés sont extraits du livrable D1.5 [7].

Ressenti du riverain

Le ressenti du riverain est exprimé par des courbes exposition-réponse mettant en relation un descripteur d'exposition vibratoire et la réponse humaine exprimée en pourcentage de gens soit très gênés, soit gênés soit légèrement gênés. Le projet s'est donné la possibilité de reprendre l'analyse de sept enquêtes grande échelle sur les vibrations ferroviaires effectuées dans sept pays en Europe et Amérique du Nord et de les combiner (méta-analyse) pour obtenir des courbes exposition-réponse « universelles ».

Comme RIVAS, le projet montre qu'à la fois l'effet perturbateur des vibrations, caractérisé par une valeur maximale, et l'effet cumulatif, caractérisé par une valeur moyenne sur une durée longue ou un nombre d'événements, doivent être considérés ; les courbes exposition-réponse sont alors présentées en fonction de trois types de descripteur : une vitesse maximale (constante « Fast »), une accélération moyennée sur 24h et une valeur de dose vibratoire (VDV, grandeur normalisée au Royaume Uni [8]). La pondération utilisée est la pondération W_k , définie par la norme ISO 2631-1:1997. Le résultat avec le descripteur « vitesse max » est donné Figure 2 et celui avec le descripteur « accélération moyennée » donnée Figure 3 ; les deux figures montrent la prise en compte d'incertitudes (valeur moyenne et écart type représentés). Notons que les réponses ne sont pas différenciées suivant le type de train (voyageur ou fret).

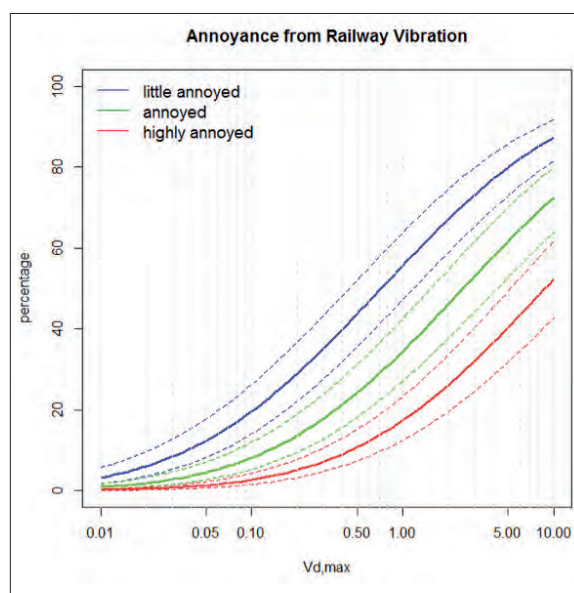


Fig. 2 : Courbes exposition-réponse (méta-analyse de CARGOVIBES) avec descripteur de type vitesse max (constante Fast) en mm/s
Exposure-response curves (meta-analysis from CARGOVIBES) in term of maximum running (Fast) rms velocity in mm/s

Le livrable D1.5 montre également que dans le cas des vibrations ferroviaires, des formules de passage peuvent être données entre niveau d'accélération pondéré W_m (norme ISO 2631-2 :2003) et niveau d'accélération pondéré W_k (norme ISO 2631-1:1997), entre niveau d'accélération pondéré W_m (norme ISO 2631-2:2003) et niveau de vitesse pondéré W_m (norme NS 8176:2005) et entre valeur efficace mobile *Slow* et valeur efficace mobile *Fast*. Pour les vibrations ferroviaires, des relations peuvent donc être trouvées entre les multiples descripteurs possibles d'exposition vibratoire, excepté bien évidemment la relation entre grandeur max et grandeur moyenne qui dépend du type de train et du trafic. En utilisant les formules de passage du livrable et en exprimant la vitesse max de la figure 2 en valeur efficace mobile *Slow* avec pondération W_m , la valeur correspondant à 5% de personnes très gênées (cible utilisé dans RIVAS) est voisine de 0,1mm/s.

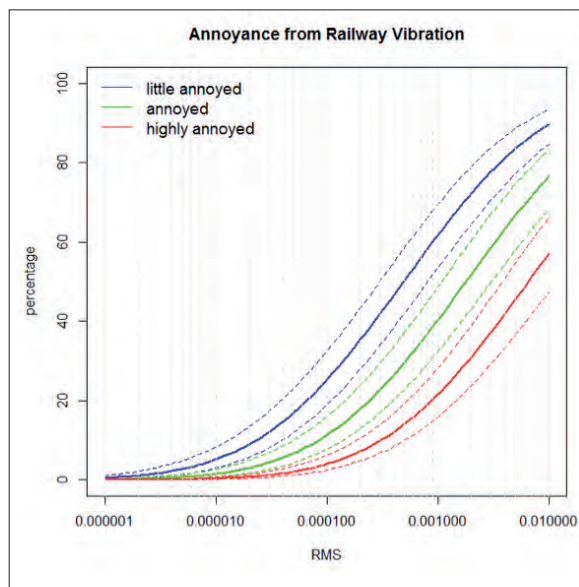


Fig. 3 : Courbes exposition-réponse (méta-analyse de CARGOVIBES) avec descripteur de type accélération moyenne sur 24h en m/s^2
 Exposure-response curves (meta-analysis from CARGOVIBES) in term of rms acceleration in m/s^2 averaged over 24h

Le livrable D1.5 montre enfin que des facteurs autres que l'exposition aux vibrations ont une influence sur la réponse humaine aux vibrations : période de la journée considérée, situation particulière (visibilité de la source), facteur individuel ou culturel (peur de dommages aux structures)... Mais d'autres études sur site sont nécessaires pour consolider les résultats obtenus.

Effet des vibrations sur le sommeil

Seule une très brève synthèse des résultats est donnée dans cette section ; le lecteur pourra trouver tous les détails de l'étude dans le livrable D1.5 du projet.

Les résultats obtenus proviennent en particulier d'une étude en laboratoire effectuée dans le cadre du projet et d'études sur site. Ces études montrent que l'exposition vibratoire est reliée significativement à une augmentation des principaux effets sur le sommeil suivants :

- Changements biologiques :
 - changement de l'activité cardio-vasculaire
 - modification de la structure du sommeil
- Qualité du sommeil :
 - réveil précoce
 - difficulté à se rendormir
 - conscience d'un sommeil (repos) perturbé

Le rapport conclut que les données obtenues sont insuffisantes pour exprimer les effets des vibrations sur le sommeil sous la forme de courbes exposition-réponse ou pour identifier des seuils, et que si les effets des vibrations sur la santé doivent être explorés, des études épidémiologiques seront alors nécessaires.

Perspective

Tous les résultats présentés montrent que les deux projets européens RIVAS et CARGOVIBES ont permis de progresser de manière significative dans la connaissance du ressenti des riverains aux vibrations ferroviaires et bruit solident associé ; les résultats montrent aussi que d'autres études sont nécessaires pour préciser des points comme l'influence sur la réponse humaine aux vibrations de la période de la journée, du type de trafic (voyageur ou fret) ou de la visibilité ou non de la source. D'autres études sont également nécessaires pour exprimer les effets des vibrations sur le sommeil sous la forme de courbes exposition-réponse ou pour identifier des seuils. Il doit être noté que l'exposition simultanée aux vibrations et au bruit aérien transmis par la façade dans le cas de voies ferrées en surface n'a pas été abordée, ainsi que le cas fréquent de deux sources de nuisances ferroviaire et routière en présence (problème de co-exposition). Signalons enfin le travail actuel du groupe de normalisation ISO/TC108/SC2/WG8 sur les vibrations et bruit solident ferroviaires : ce groupe a produit la norme de directive générale ISO 14837-1 [9] sur le sujet, travaille actuellement sur la partie relative aux mesures et à l'expression des résultats (Partie 3) et la partie sur les solutions d'atténuation (Partie 5), mais n'a pas encore abordé la partie relative aux critères d'évaluation (Partie 4).

Références bibliographiques

- [1] Projet européen (FP7) RIVAS (2011-2013), « Railway Induced Vibration Abatement Solutions » ; site du projet : www.rivas-project.eu
- [2] Projet européen (FP7) CARGOVIBES (2011-2014), « Attenuation of ground-borne vibration affecting residents near freight railway lines » ; site du projet : www.cargovibes.eu
- [3] AFNOR, Fascicule de documentation, « Indicateurs physiques acoustiques et vibratoires adaptés au ressenti des riverains » ; production du groupe S30MI ; soumis à enquête en 2015
- [4] RIVAS Livrable D1.6 (public), « Definition of appropriate procedure to predict exposure in buildings and estimate annoyance », (2012)
- [5] RIVAS Livrable D1.4 (public), « Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration », (2012)
- [6] Norwegian Standard NS 8176:2005, Vibration and shock – Measurement of vibration in buildings from land based transport and guidance to evaluation of its effects on human beings
- [7] CARGOVIBES Livrable D1.5 (public), « Guidance document for the evaluation of railway vibration », (2013)
- [8] British standard BS 6472-1:2008: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 1: Vibration sources other than blasting.
- [9] ISO 14837-1 :2006, Vibrations mécaniques – Vibrations et bruits initiés au sol dus à des lignes ferroviaires – Partie 1 : Directives générales.