

| Perception des vibrations

Etienne Parizet

Laboratoire Vibrations Acoustique

INSA Lyon

25 bis, avenue J. Capelle

69621 Villeurbanne CEDEX

Tél : 04 72 43 81 21

Fax : 04 72 43 87 12

E-mail : etienne.parizet@insa-lyon.fr

A des niveaux et durées d'exposition élevés, les vibrations sont, comme le bruit, dangereuses pour la santé. Des conducteurs d'engin de chantiers peuvent, par exemple, développer des pathologies dorsales dont certaines sont reconnues comme maladies professionnelles. Cet important risque sanitaire a justifié la conduite de nombreuses études ayant permis de proposer des indicateurs d'exposition normalisés ([1] pour le corps entier et [2] pour les vibrations transmises au système main-bras par des machines) et des valeurs réglementaires dans de telles situations [3]. En revanche, pour les niveaux vibratoires usuels mesurés dans des bâtiments ou dans des véhicules de transport (automobiles par exemple), la problématique est plutôt celle du confort. Ce document est une revue bibliographique des connaissances dans ce domaine, en se limitant au cas de vibrations transmises à l'ensemble du corps. On s'intéressera donc à des phénomènes de fréquences schématiquement comprises entre 1 et 50 Hz, plage dans laquelle on trouve l'essentiel des stimuli vibratoires ressentis dans un bâtiment. Les fréquences plus basses sont typiques du mal des transports (en bateau ou en voiture) et celles plus élevées concernent surtout les vibrations transmises au système main-bras (cas de personnes travaillant avec des outils électriques ou pneumatiques, qui pose également de vrais problèmes de santé) [4].

Le parallèle sera souvent fait avec la psycho-acoustique : on verra que, dans le domaine des vibrations, de nombreuses questions restent ouvertes.

Une perception et des expériences complexes

Les organes permettant la détection sensorielle des vibrations sont nombreux. Ils peuvent être organisés en trois catégories principales :

- le système vestibulaire de l'oreille interne, comprenant les canaux semi-circulaires (plus spécialisés dans la détection des accélérations angulaires) et les organes otolithiques (pour la détection des accélérations linéaires). Les mécanismes de codage des informations sont similaires à ceux existant dans la cochlée (cellules ciliées transformant des déformations de leurs stéréocils en signaux nerveux transmis au système nerveux central);
- les capteurs de la peau : corpuscules de Meissner, de Ruffini et de Pacini, situés à différentes positions de l'épiderme ou du derme. Ils sont sensibles à des stimulations de caractéristiques différentes;
- enfin, d'autres capteurs du système proprioceptif général : des corpuscules de Ruffini et de Pacini sont présents dans les muscles et les tendons du corps.

Cependant, la perception de vibrations peut aussi provenir d'organes sensoriels spécialisés pour d'autres types de stimuli. Voir des objets vibrer, ou entendre le bruit issu de ces vibrations participe à cette perception. La perception d'un phénomène vibratoire va donc utiliser des informations sensorielles provenant d'organes très divers.

D'un point de vue purement vibratoire, plusieurs particularités sont à souligner.

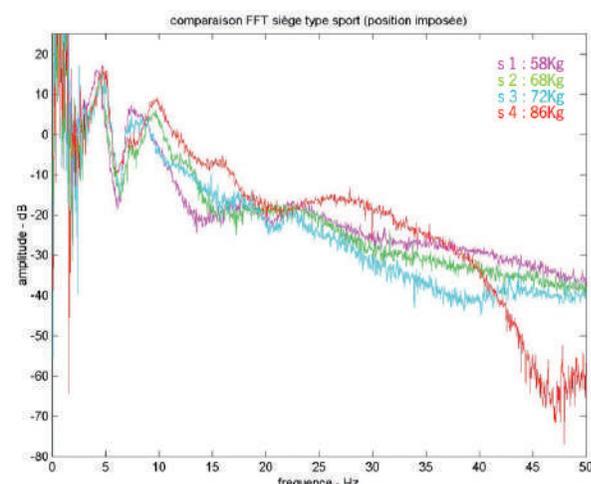


Fig.1 : Gauche : dispositif d'essai. Droite : fonctions de transfert pied de siège – interface siège/sujet pour 4 personnes.

Tout d'abord, une vibration étant une grandeur vectorielle, la perception peut dépendre de la direction d'application (sans parler des composantes rotationnelles qui, on l'a vu, peuvent être détectées par d'autres capteurs sensoriels). Cette particularité complique la mise en œuvre des expériences en laboratoire, car il n'est pas si simple de contrôler la direction des stimuli qui s'exercent sur les sujets. Par ailleurs, le corps humain, composé de nombreux organes reliés les uns aux autres par des liaisons souples, réagit comme un solide déformable. Un effort imposé va donc créer des niveaux d'accélération variés à différents endroits du corps et cette distribution d'accélération dépend de la fréquence de l'effort. On peut utiliser les grandeurs classiques de la dynamique pour décrire cette réponse biodynamique : fonction de transfert (par exemple entre une accélération imposée à un siège sur lequel est assis le sujet et l'accélération au niveau du système vestibulaire) et impédance mécanique d'entrée (rapport entre un effort appliqué et la vitesse vibratoire résultante). La difficulté est que cette réponse dynamique dépend, entre autres paramètres, de la personne, de sa posture (allongée, assise de façon plus ou moins stricte [5]...) et de la direction d'excitation. Ceci peut donc constituer autant de cas à traiter dans les laboratoires.



Fig. 2 : Dispositif expérimental pour sujet allongé [7]

Enfin, il faut noter que le siège sur lequel est assis le sujet (ou le lit sur lequel il est allongé) a une grande importance, car il filtre considérablement les stimuli. Au cours d'une étude pour un constructeur automobile, nous avons mesuré la fonction de transfert entre des vibrations verticales relevées au pied du siège (sur la glissière) et celles relevées à l'interface siège-sujet (par un accéléromètre tri-axial placé dans une soucoupe). Le siège était fixé à une plate-forme excitée verticalement par un pot vibrant (figure 1 à gauche). La figure 1 à droite montre des exemples de fonctions de transfert mesurées pour 4 personnes de poids différents [6]. Les mesures sont exploitables aux fréquences supérieures à 3 Hz. On peut voir de grandes différences entre les fonctions de transfert : par son poids et sa morphologie, chaque sujet modifie le comportement du siège, qui intervient dans ce transfert.

La meilleure façon de contrôler parfaitement les niveaux vibratoires auxquels sont soumis les sujets consiste donc à placer ceux-ci sur un support rigide, comme l'on fait Matsumoto et al. dans le cadre d'une étude portant sur la perception de vibrations verticales par des sujets allongés [7].

On est ainsi bien loin de conditions représentatives d'une situation réelle, conditions plus faciles à réaliser pour des expériences de perception sonore. Les études naviguent donc entre deux écueils : ne pas maîtriser parfaitement les stimuli (exemple d'étude *in situ*) ou placer les sujets dans des situations non représentatives de leur vie courante.

Éléments de psychophysique

La psychophysique est l'étude de la relation entre un stimulus et la sensation associée. Parmi les différentes grandeurs pouvant être étudiées, ce document présentera des seuils de perception, des différences de niveau juste perceptibles, des courbes d'iso-sensation et la relation entre les intensités du stimulus et de la sensation. On se limitera à la situation d'un sujet assis ; dans d'autres situations, les résultats sont encore trop parcellaires et contradictoires.

Seuil de perception

La mesure de seuil de perception consiste à déterminer le plus petit niveau vibratoire conduisant à une sensation. Une telle mesure est délicate et les différents résultats publiés peuvent être largement variables selon les procédures utilisées : durée des signaux, méthodes psychophysiques, variabilité inter-sujets (comme les expériences sont longues et rebutantes, le nombre de sujets utilisés est souvent très faible).

Des résultats récents [8] sont présentés en figure 3. Les signaux étaient des vibrations sinusoïdales durant 2 s, présentés dans l'une des trois directions (verticale, d'avant en arrière, latérale). La figure 3 représente les valeurs médianes dans les trois directions. On constate, pour la direction verticale, une faible dépendance fréquentielle : le seuil de perception est compris entre 0,01 et 0,02 m/s² de 2 Hz à 100 Hz. En revanche, le seuil varie beaucoup plus fortement avec la fréquence pour les deux directions latérales.

Sur la figure 3 sont également représentées les courbes de seuil définies dans la norme britannique BS 6841 [9, page 260]. Deux courbes existent : l'une pour les vibrations verticales (en tirets sur la figure 3) et l'autre pour les directions latérales et d'avant en arrière (en pointillés). Dans les deux cas, on constate que ces seuils normalisés, issus de mesures anciennes, sont loin des valeurs de seuils actuellement admises.

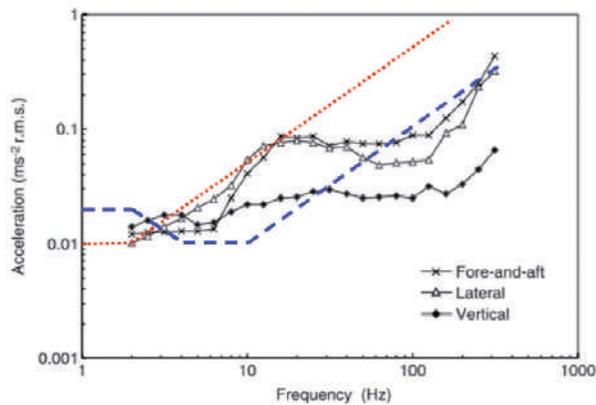


Fig. 3 : Seuils de perception de vibrations sinusoïdales dans les trois directions [8]

Seuil différentiel d'intensité

Lorsqu'on se situe au-delà du seuil de perception, on peut chercher la différence minimale de niveau permettant à un sujet de détecter une différence. Cette information est nécessaire pour l'interprétation de résultats expérimentaux : une réduction constatée après modification d'un système est-elle sensible ?

Pour du bruit, la valeur communément admise est de l'ordre de 1 dB pour des bouffées de bruit, quel que soit le niveau des signaux (c'est la loi de Weber, qui n'est pas respectée pour des sons purs, car la discrimination en niveau de sons purs est meilleure à forts niveaux [10, page 139]).

Dans le domaine vibratoire, les études équivalentes sont très peu nombreuses. On peut citer la thèse de M. Bellmann [11], qui, pour des vibrations sinusoïdales verticales de niveaux plutôt faibles (0,0063 m/s²), a obtenu des seuils de l'ordre de 1,5 dB (figure 4). Sur cette figure sont également représentés des résultats antérieurs [12], obtenus pour deux fréquences seulement (5 et 20 Hz) mais deux amplitudes (0,1 et 0,5 m/s²). Les seuils sont légèrement plus faibles, mais l'incertitude expérimentale rend ces différences non significatives.

Enfin, une étude comparable vient d'être menée au Laboratoire Vibrations Acoustique de l'INSA-Lyon, en utilisant non plus des signaux sinusoïdaux, mais du bruit de bande étroite (5 à 15 Hz). Les résultats sont du même ordre de grandeur [13] : on peut ainsi admettre qu'une différence de 1 ou 1,5 dB est nécessaire pour entraîner une discrimination des signaux.

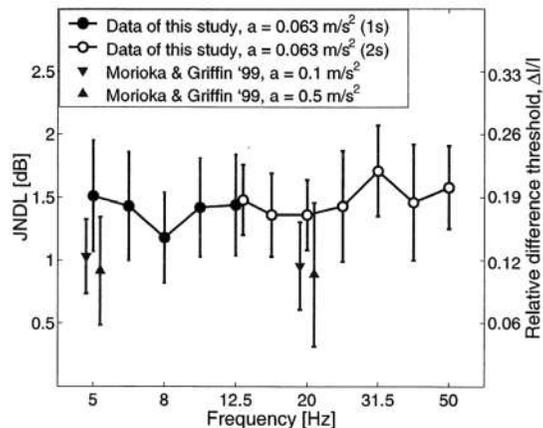


Fig. 4 : Seuils de détection de niveau pour des vibrations verticales sinusoïdales [11]

Courbes d'égal sensation

On peut également choisir un signal de référence, de fréquence et d'amplitude donnée, et rechercher, pour d'autres fréquences, l'amplitude conduisant à une égale sensation. Dans le domaine acoustique, on obtient ainsi les lignes isoniques normalisées (ISO 226-2003). Ici encore, les expériences équivalentes dans le domaine vibratoire sont beaucoup plus parcellaires. Bellmann [11] a utilisé une vibration verticale de fréquence 20 Hz et d'amplitude 0,1 m/s² (figure 5).

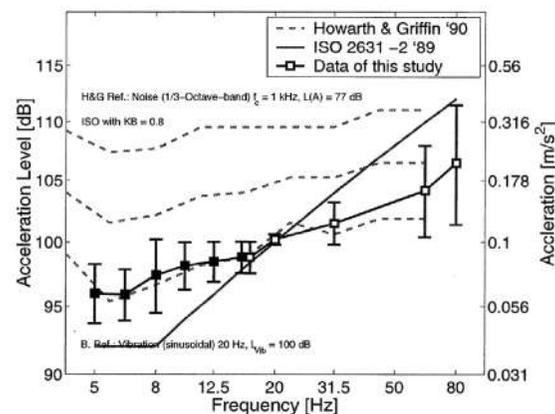


Fig. 5 : Courbe d'égal sensation (référence : 20 Hz, 0,1 m/s²) [11]

Les résultats obtenus montrent un léger accroissement de niveau avec la fréquence, indiquant une sensibilité plus forte aux fréquences basses (typiquement inférieures à 20 Hz) par rapport aux fréquences plus élevées. Sur cette figure est également représentée la courbe de pondération fréquentielle normalisée (ISO 2631-2). Cette pondération représente une sensibilité constante entre 4 et 8 Hz, puis très fortement décroissante avec la fréquence. Il est clair que ceci ne représente pas la réalité au niveau de référence utilisé.

Plus récemment, Morioka et Griffin [8] ont proposé un faisceau de courbes plus riche, obtenu par une méthode indirecte (estimation de grandeur de la sensation, voir ci-dessous). Notons aussi que la sensation évaluée était le confort, et non le niveau. Les courbes obtenues pour la direction verticale sont représentées en figure 6. Chaque courbe correspond à une amplitude constante de la sensation de confort. Sont également représentés les résultats de Bellmann (courbe en tirets) et la pondération fréquentielle de la norme ISO 2631-2.

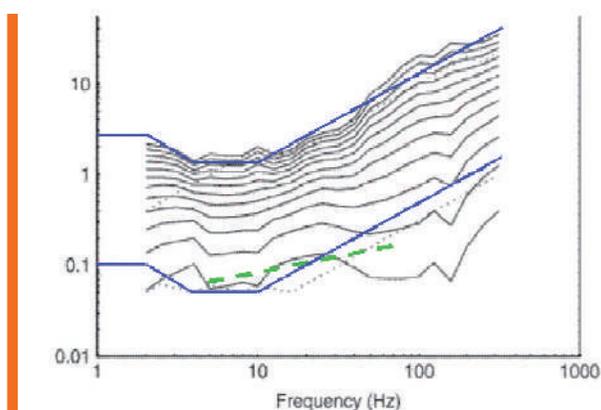


Fig. 6 : Courbes d'iso-confort pour des vibrations verticales [13]

Comme pour la figure précédente, cette figure montre que la pondération normalisée représente mal la perception aux amplitudes basses. En revanche, l'accord est meilleur pour les amplitudes élevées. La pondération a été mise au point pour évaluer les risques pour la santé de personnes exposées à de forts niveaux vibratoires (par exemple, conducteurs d'engin de chantier). On peut donc comprendre qu'elle ne soit pas adaptée pour des niveaux plus faibles rencontrés lorsqu'on s'intéresse à des questions de confort (dans des bâtiments, des automobiles par exemple). L'utilisation des pondérations normalisées pour de telles applications peut donc conduire à des résultats erronés.

Relation entre intensité physique et intensité perçue

Pour un très grand nombre de types de stimuli, l'intensité perçue par un sujet est proportionnelle à une fonction puissance de l'intensité physique du stimulus. C'est la loi de Stevens, qui avait proposé, dans le domaine sonore, la relation bien connue $S = k.I^{0,3}$, où I est l'intensité acoustique. Cette relation n'étant pas valable pour des niveaux faibles, la relation est plutôt sous la forme $S = k.(I - I_{ref})^{0,3}$. Dans le domaine vibratoire, de nombreuses études ont été menées, dont les résultats étaient très contradictoires, au

contraire de l'acoustique. Un tableau de l'ouvrage de référence de Griffin [9, page 50] résume les résultats obtenus. Pour une même fréquence (5 Hz) et dans la direction verticale, le coefficient de la loi de puissance proposé par différents auteurs peut varier de 0,46 à 1,4 !

Nous avons déterminé ce coefficient à la fréquence de 10 Hz, en utilisant le dispositif expérimental montré en figure 1 (mais le sujet étant assis sur une chaise rigide). Nous avons utilisé deux méthodes : pour la première, un stimulus de référence ayant une amplitude égale à 0,1962 m/s² et représentant une valeur de sensation fixée à 100, des stimuli tests (même fréquence mais intensités différentes) sont présentés. La tâche du sujet est d'estimer le rapport de sensation entre chaque stimulus test et celui de référence (tâche d'estimation de grandeur). La seconde méthode est réciproque : pour un même stimulus de référence, on demande au sujet d'ajuster lui-même l'amplitude du signal test de sorte que le rapport de sensation soit égal à une valeur imposée. L'utilisation conjointe de ces deux procédures peut permettre d'éliminer des biais liés aux stratégies de réponse des sujets. En utilisant 20 sujets, nous avons obtenu des résultats présentés sur la figure 7 [14]. Les résultats expérimentaux (étoiles) sont approximés de façon très raisonnable par la relation $S = k.(g - 0,017)^{1,3}$, g étant l'amplitude du signal (en valeur rms).

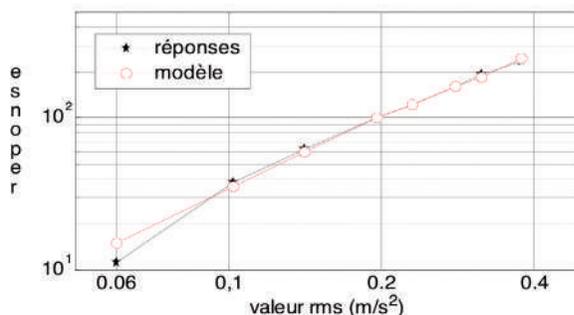


Fig. 7 : Variation de la sensation de niveau en fonction de l'amplitude du signal (10 Hz, référence : 0,1962 m/s²)

Effets sur l'homme

Pour de fortes amplitudes et des durées d'exposition suffisamment longues, la santé des personnes peut être affectée. On l'a vu, c'est le cas pour de nombreuses professions, ce qui a justifié toutes les études ayant permis la mise au point d'indicateurs réglementaires d'exposition. Dans des bâtiments, les amplitudes sont heureusement plus faibles de sorte que ces effets ne sont pas à craindre.

De même, des vibrations de forts niveaux peuvent amoindrir la capacité d'une personne à accomplir diverses tâches : écrire dans un train ou revenir de la voiture bar en portant une tasse de café peuvent être des expériences difficiles. Ici encore, dans un bâtiment, les niveaux semblent être suffisamment faibles pour que ceci ne se produise pas, sauf dans certaines situations très épisodiques (par exemple, vibrations latérales dans des tours de grande hauteur soumises à des vents très forts lors d'épisodes cycloniques [15]).

On s'intéressera donc dans la suite aux effets sur le confort.

Vibrations seules

Pour des vibrations du corps entier (sujet assis), il semble que, là encore, l'usage des courbes de pondérations fréquentielles normalisées ne soit pas utile. Ainsi, par exemple, Maeda et al. [16] ont utilisé des signaux large bande (1-100 Hz) avec trois gabarits fréquentiels : densité spectrale de puissance constante, ou croissante (augmentation régulière de 20 dB entre 1 et 100 Hz) ou décroissante dans les mêmes proportions. Les signaux ont ensuite été ajustés en niveau de sorte que leur amplitude pondérée respecte certaines valeurs fixées. Les 15 stimuli ainsi obtenus ont été évalués par des sujets dans une procédure de jugement catégoriel. Les résultats montrent que, à même valeur globale pondérée, les trois gabarits spectraux peuvent conduire à des évaluations très différentes (figure 8).

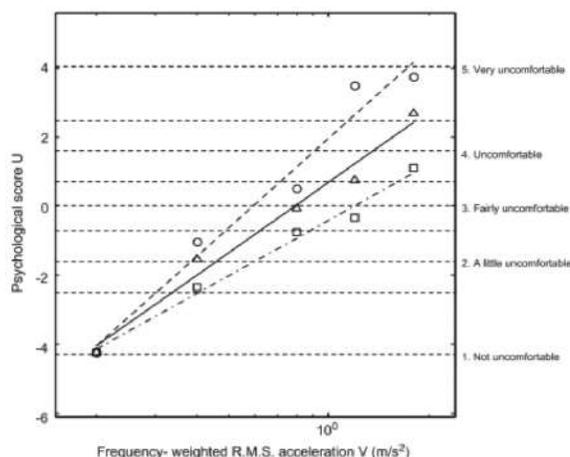


Fig. 8 : Évaluations de confort obtenus par Maeda et al. [16]. Chaque symbole représente l'un des trois gabarits spectraux utilisés. Triangle : densité spectrale uniforme; Rond : croissante avec la fréquence; Carré : décroissante.

Dans le cas de vibrations intérieures d'automobile, une étude menée au laboratoire [17] a consisté à faire comparer par paires des signaux vibratoires verticaux enregistrés sur la glissière de sièges de différents modèles, en utilisant le dispositif de la figure 1. Dans ce cas également, l'utilisation des accélérations globales pondérées n'a pas permis de décrire les résultats subjectifs d'une façon satisfaisante. En revanche, un modèle convenable a pu être construit à partir des accélérations non pondérées.

Vibrations et bruit

En général, les occupants d'un bâtiment exposé à des sources vibratoires sont soumis à des stimuli vibratoires et acoustiques. La présence des vibrations est ici un facteur aggravant de l'inconfort, comme le montre l'étude *in situ* de Ohrström [18]. Cette étude a consisté à interroger des riverains de voies ferrées, classés en deux groupes : ceux chez qui les vibrations étaient faibles (<1 mm/s, correspondant au niveau maximum non pondéré enregistré au passage d'un train) et ceux chez qui ces vibrations étaient fortes (> 2 mm/s). Dans ces deux groupes, les niveaux d'expositions au bruit étaient variables (compris

entre 70 et 95 dB(A), exprimé comme le niveau maximum au passage d'un train). Parmi les questions de l'enquête, l'une portait sur la gêne du bruit des trains; la figure 9 montre la proportion cumulée des réponses «plutôt gêné» et «très gêné» parmi les deux groupes, en fonction des niveaux d'exposition au bruit, séparés en 5 niveaux, par pas de 5 dB(A). Sans surprise, on voit que, parmi les riverains soumis également aux vibrations, la proportion de personnes gênées par le bruit augmente beaucoup plus rapidement que parmi l'autre groupe, ce qui montre l'effet aggravant du facteur représenté par l'exposition aux vibrations. Cependant, il est possible que, comme nous l'avons dit au début de ce document, les vibrations transmises au bâtiment aient été sources de bruit à l'intérieur des logements, augmentant ainsi la gêne du bruit transmis par voie aérienne.

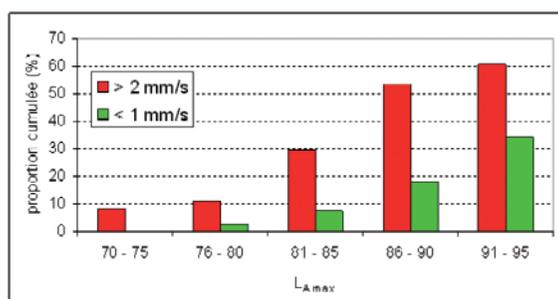


Fig. 9 : Proportion cumulée de riverains gênés par le bruit des trains, en fonction du niveau de bruit et pour les deux groupes (vibrations faibles et fortes) [18]

Au cours d'expériences en laboratoire, qui permettent de contrôler les stimuli, des critères permettant d'évaluer le confort de sujets soumis à des stimuli acoustiques et vibratoires ont pu être proposés dans différents cas. Même si certaines études proposent des modèles complexes faisant intervenir des interactions entre bruit et vibration, la plupart conduisent à des modèles simples faisant intervenir une fonction linéaire d'indicateurs représentant chaque facteur. C'est le cas des études de Howarth et Griffin [19] (qui ont reproduit des situations de riverains de lignes ferroviaires), Paulsen et Kastka [20] (riverains de lignes de tramway), ou Amari et al. [21] (passagers d'automobile).

Conclusion

Ce document a présenté une rapide revue de résultats sur la perception de vibrations exercées sur des sujets assis. On l'a vu, la complexité de la perception de stimuli vibratoires fait que beaucoup d'autres travaux seraient nécessaires pour transposer ces connaissances, essentiellement obtenues en laboratoire dans des situations très schématiques, à des problématiques réelles de confort dans le bâtiment. Citons, sans être exhaustif, les points suivants :

Quelle est la perception de phénomènes complexes (stimuli non-stationnaires de directions multiples) ? Certes, la norme ISO 2631 précise des modes de calcul d'exposition pour toute situation; mais on a vu qu'elle montre déjà des limites dans des cas très simples;

Comment décrire l'exposition de riverains ? Pour le bruit, il existe une mesure standard (niveau de bruit en façade); pour les vibrations, quelle est la variabilité des niveaux vibratoires relevés dans un logement ? Si cette variabilité est forte, comment décrire la situation d'une façon synthétique mais représentative ?

Références bibliographiques

- [1] Vibrations et chocs mécaniques – Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps. Partie 1 : Spécifications générales, Norme ISO 2631-1:1997
- [2] Vibrations mécaniques – Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales, Norme ISO 5349-1:2001
- [3] Vibrations et mal de dos. Guide des bonnes pratiques en application du décret «Vibrations», document INRS ED 6018, février 2008 (disponible sur <http://www.inrs.fr/>)
- [4] Mansfield N., «Human response to vibration», CRC Press, 2005
- [5] Mansfield N.J., Griffin M.J., «Effects of posture and vibration magnitude on apparent mass and pelvis rotation during exposure to whole-body vertical vibration», *Journal of Sound and Vibration* (2002), 253, pp 93-107
- [6] Pinson G., «Influence du siege automobile sur le confort vibratoire», rapport de stage LVA-Insa Lyon / ESIM 2005
- [7] Matsumoto Y., Maeda S., Iwane Y., Iwata Y., «Factors affecting perception thresholds of vertical whole-body vibration in recumbent subjects: Gender and age of subjects, and vibration duration», *Journal of Sound and Vibration* 330 (2011), pp 1810-1828
- [8] Morioka M., Griffin M.J., «Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration», *Journal of Sound and Vibration* (2006), 298, pp 755-772
- [9] Griffin M.J., «Handbook of human vibration», (1990) Elsevier Academic Press (Londres).
- [10] Moore B.C.J., «An introduction to the psychology of hearing», 5th edition (2003), Elsevier Academic Press (London).
- [11] Bellmann M., «Perception of whole-body vibrations : from basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside cars», Ph.D. thesis, Universität Oldenburg (2002).
- [12] Morioka M., Griffin M., «Difference thresholds for intensity perception of whole-body vertical vibration: effect of frequency and magnitude», *J. Acoust. Soc. Am.* 107 (2000), pp 620-624
- [13] Hernandez-Yanez C., «Efecto de enmascaramiento en vibraciones de cuerpo entero», à présenter au congrès TecniAcustica 2011 (Caceres)
- [14] Geiger V. «Vérification de la loi de Stevens vibratoire pour un sujet assis», rapport StudienArbeit, Insa-Lyon & Karlsruher Institut für Technologie (2007)
- [15] Li Q., Xiao Y., Wu J., Fu J., Li Z. «Typhoon effects on super-tall buildings», *Journ. Sound and Vibration* 313 (2008), pp 581-602
- [16] Maeda S., Mansfield N., Shibata N. « Evaluation of subjective responses to whole-body vibration exposure: Effect of frequency content», *International Journal of Industrial Ergonomics* 38 (2008), pp 509-515
- [17] Parizet E., Amari M., Nosulenko V. «Vibro-acoustical comfort in cars at idle : human perception of simulated sounds and vibrations from 3- and 4- cylinder diesel engines», *Int. J. Vehicle Noise and Vibration* 3 (2007), 143-156.
- [18] Ohrström E. «Effects of exposure to railway noise – a comparison between areas with and without vibration», *Journ. Sound and Vibration* 205 (1997), 555-560.
- [19] Howarth H., Griffin M. «The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways», *J. Acoust. Soc. Am.* 89 (1991), 2317-2323.
- [20] Paulsen R., Kastka J. «Effects of combined noise and vibration on annoyance», *Journ. Sound and Vibration* 181 (1995), 295-314.
- [21] Amari M., Roussarie V., Parizet E. «Contribution of sound and vibration level to comfort in cars», *Proc. Euronoise 2009, Edinburgh* (2009).