

Étude bibliographique sur la gêne sonore due au bruit basse fréquence dans le bâtiment

Étienne Gourlay,
Cédric Foy,
Guillaume Dutilleux
Groupe Acoustique
PCI Acoustique et Vibrations
Cerema
Direction Territoriale Est
Laboratoire Régional de Strasbourg
11, rue Jean Mentelin
BP 9
67035 Strasbourg CEDEX 02
E-mail :
etienne.gourlay@cerema.fr
cedric.foy@cerema.fr
guillaume.dutilleux@cerema.fr

Résumé

Le bruit basse fréquence est omniprésent dans l'environnement et possède des caractéristiques que ne partagent pas les bruits plus aigus. En particulier, il est perçu comme plus gênant (en laboratoire et dans les études in situ). Une synthèse bibliographique sur la gêne sonore due au bruit basse fréquence a donc été effectuée afin d'améliorer sa prise en compte au sein des bâtiments. Les différentes études réalisées montrent notamment que la composition spectrale d'un bruit basse fréquence a un impact fort sur son audibilité. En outre, plus la fréquence d'un son pur est basse, plus son niveau sonore doit être élevé pour qu'il puisse être audible mais, dès qu'il le devient, la gêne augmente très rapidement. Par ailleurs, il a été établi que la pondération A sous-estime fortement la gêne causée par les composantes basses fréquences et que de fortes variations de niveau de bruit sur des durées courtes sont perçues comme très gênantes. Enfin, il s'avère que les vibrations produites par le bruit basse fréquence sont à l'origine d'un sentiment de gêne important qu'aucune mesure couramment utilisée pour caractériser le bruit dans l'environnement ne permet de décrire convenablement.

Abstract

The low frequency noise is omnipresent in the environment and has features not shared by more high-pitched noises. In particular, it is perceived as more annoying (in laboratory and field studies). A literature review on low frequency noise annoyance was therefore carried out to improve its consideration in the buildings. The different studies performed show especially that the spectral composition of a low frequency noise has a strong impact on its audibility. Furthermore, the lower the frequency of a pure tone, the higher the noise level must be to be audible, but as soon as it becomes audible, the annoyance increases very quickly. Moreover, it was established that the A-weighting greatly underestimates the annoyance caused by the low frequency components and that high variations in noise level over short periods are perceived as very annoying. Finally, it appears that the vibrations produced by the low frequency noise cause a significant annoyance that no measure commonly used to characterize the environmental noise allows to properly describe.



Le bruit basse fréquence est une composante essentielle du bruit de fond en milieu urbain et peut provenir de différentes sources artificielles : véhicules routiers et ferroviaires, avions, machines industrielles, tirs de mines, éoliennes, compresseurs, unités de ventilation ou de climatisation, etc. Les effets du bruit basse fréquence méritent une certaine attention compte tenu :

- de la multiplicité des sources dont le spectre tend à se déplacer vers le bas avec la tendance au gigantisme des machines ;
- de la faible atténuation des basses fréquences dans l'environnement extérieur ;
- de la faible aptitude de l'enveloppe d'un bâtiment à atténuer le bruit basse fréquence par rapport aux fréquences plus élevées,
- et des effets d'amplification possibles par l'excitation de modes propres en espace clos [1,2].

L'exposition chronique à des niveaux élevés de bruits basse fréquence est à l'origine d'impacts forts sur la santé clairement identifiés à l'heure actuelle (insuffisance respiratoire, douleur auditive, syndrome vibro-acoustique). Sauf exception, de telles expositions ne se rencontrent pas dans l'environnement mais seulement sur certains lieux de travail. Bien que les effets de plus faibles intensités de bruit basse fréquence soient plus difficiles à établir pour des raisons méthodologiques, il semble néanmoins qu'un certain nombre d'effets négatifs du bruit en général résultent de l'exposition aux basses fréquences. En effet, l'intensité sonore et la gêne sont parfois perçues comme plus importantes pour un bruit basse fréquence que pour d'autres bruits de niveaux de pression acoustique égaux. En outre, dans certains cas, la gêne ressentie apparaît exacerbée par le bourdonnement ou les vibrations induites par un bruit basse fréquence.

Par conséquent, une étude bibliographique sur la gêne sonore due au bruit basse fréquence a été menée en vue d'améliorer sa prise en compte au sein des bâtiments.

Le concept de gêne sonore

La **gêne sonore** est un concept complexe, recouvrant essentiellement une réaction immédiate face aux effets du bruit provoquant une perturbation du comportement ou de l'activité, et une évaluation du bruit telle que de la nuisance, ou un caractère désagréable [3]. Guski *et al.* définissent la gêne sonore (*noise annoyance*) comme étant un concept psychologique qui décrit une relation entre une situation acoustique et une personne forcée par le bruit à faire quelque chose qu'elle ne veut pas faire, et qui cognitivement et émotionnellement évalue cette situation et se sent partiellement démunie (« *Noise annoyance is a psychological concept which describes a relation between an acoustic situation and a person who is forced by noise to do things she/he does not want to do, who cognitively and emotionally evaluates this situation and feels partly helpless* »). Il nous semble néanmoins que dans de nombreux cas il serait préférable d'utiliser dans la définition précédente le terme « empêchée » en lieu et place du mot « forcée » (« personne empêchée par le bruit de faire quelque chose qu'elle veut faire »).

En complément de cette définition générale du concept de gêne sonore, deux types de gêne peuvent être distingués : la gêne sonore à court terme et la gêne sonore à long terme.

La gêne sonore à court terme est généralement évaluée en laboratoire, où l'on propose une mise en situation (une contextualisation). Il est demandé au sujet, s'imaginant dans cette situation, d'évaluer la gêne ressentie. La mise en situation proposée peut être complètement imaginaire, ou partiellement aidée par un environnement simulé.

La gêne sonore à long terme est généralement évaluée lors d'enquêtes *in situ*, où les personnes sondées se trouvent chez elles. En général, il leur est demandé de faire un jugement rétrospectif sur une période passée dans leur habitation (par exemple chez elles au cours des 12 derniers mois). La gêne sonore à long terme est communément modélisée par des relations dose/effet issues de la mesure du niveau sonore sur de longues périodes et du pourcentage de personnes « très gênées ».

Définition de la notion de bruit basse fréquence

La gamme de l'audition humaine est généralement considérée comme étant comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz pour les individus jeunes, la limite supérieure diminuant progressivement avec l'âge tandis que la limite inférieure reste stable [4].

Cet intervalle de fréquences est conventionnel. Le sens commun découpe les fréquences des ondes acoustiques en trois bandes : les **infrasons**, les **sons** et les **ultrasons**. Les ultrasons ne nous concernent pas ici. [1] et [2] introduisent des distinctions intermédiaires en dessous de 100/250 Hz (Figure 1).

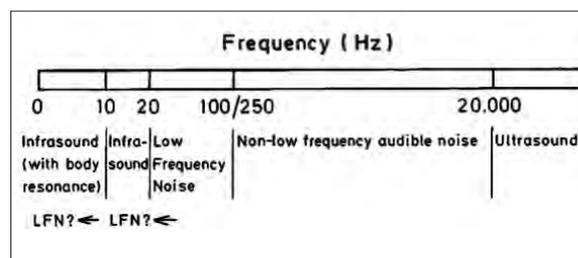


Fig. 1 : Spectre de fréquence du son et nomenclature associée [1]
Frequency spectrum of sound and associated nomenclature [1]

Les infrasons seraient donc de fréquence inférieure à 20 Hz et non perceptibles par l'oreille humaine. La norme ISO 7196:1995 [5] correspond à ce découpage, puisqu'elle distingue le **son à fréquence audible** (« son ou bruit dont le spectre comporte principalement des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz ») de l'**infrason** (« son ou bruit dont le spectre comporte principalement des fréquences comprises entre 1 Hz et 20 Hz »). Or, à condition de pouvoir produire des stimuli acoustiques d'amplitude suffisamment élevée, il est possible de tracer un audiogramme pour des fréquences supérieures à 1 Hz et pas seulement supérieures à 20 Hz (Figure 2).

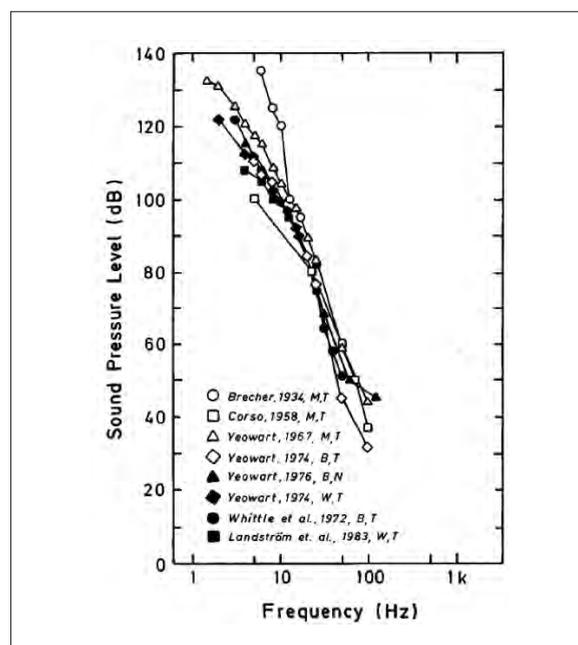


Fig. 2 : Seuils d'audition en fonction de la fréquence du signal dans diverses études [1]
Hearing thresholds as a function of signal frequency in various studies [1]

Toutefois, la valeur 20 Hz n'est pas totalement arbitraire. Si l'on imagine un stimulus sonore dont la fréquence augmente progressivement à partir de 1 Hz jusqu'à 50 Hz, pour fixer les idées, le sujet exposé percevra d'abord des fluctuations de pression sur son tympan dont la vitesse augmente à mesure que la fréquence du stimulus augmente. Comme l'avait observé Von Békésy, à l'approche d'une fréquence comprise entre 16 Hz et 20 Hz,

la fluctuation s'accélère jusqu'à ne plus pouvoir être distinguée et laisser la place à un phénomène continu et que l'on appelle communément un son [6]. Cette transition avait été nommée par cet auteur « *Verschmelzungsgrenze* » que l'on peut traduire par « fréquence de fusion ». La norme DIN 45680:2013 [7] identifie d'ailleurs la valeur de 20 Hz comme la fréquence au-dessus de laquelle la sensation de hauteur (au sens musical du terme) existe pour l'être humain.

Néanmoins, il a été suggéré qu'à de très basses fréquences, la détection humaine se produit via l'ouïe mais pas de manière conventionnelle. La perception du bruit résulterait de non-linéarités de conduction dans les oreilles moyenne et interne qui engendrent une distorsion harmonique vers des fréquences plus élevées situées dans une gamme plus facilement audible [8]. D'autre part la perception de ces fréquences est susceptible de ne pas être strictement auditive, mais de passer par le squelette ou la mise en résonance de certains organes et cavités du corps humain, comme la cage thoracique [2].

De la discussion qui précède, il ressort que la distinction entre sons et infrasons est ambiguë. Nous préférons donc utiliser ici l'expression plus générale de « basses fréquences » avec comme limite basse la fréquence de 1 Hz qui est celle de la limite établie scientifiquement pour la perception consciente d'un stimulus acoustique par l'être humain. Pour Berglund *et al.*, les basses fréquences sont inférieures à 100/250 Hz [1]. Si l'on regarde les courbes isosoniques normales pour des niveaux sonores usuels, il semble plus judicieux de retenir la valeur haute de 250 Hz, car pour les fréquences supérieures, la sensibilité de l'oreille tend à se stabiliser.

En résumé, on considère dans le cadre de cet article que **le bruit basse fréquence s'étend sur les plages infrasonore et sonore et correspond à la plage d'environ 1 Hz à 250 Hz**. Toute la gamme de bruit basse fréquence est audible mais des niveaux élevés sont nécessaires pour dépasser les seuils d'audition aux fréquences les plus basses.

Sources de bruit basse fréquence

En dehors des phénomènes catastrophiques (éruptions volcaniques, tremblements de terres), les sources de bruit basse fréquence peuvent être d'origine naturelle (vent, tonnerre, vagues de l'océan, etc.) mais les bruits perçus comme les plus gênants sont ceux d'origine humaine, probablement en raison de l'attitude des individus vis-à-vis de la source [9].

Les sources artificielles de bruit basse fréquence et d'infrasons sont les barrages, les ouvrages d'art, les machines et toutes les formes de transport. Effectivement, parmi les sources typiques on retrouve les pompes, les compresseurs, les ventilateurs, les systèmes de haut-parleurs, les voitures, les camions, les avions et les navires. Le bruit structurel, générateur de vibrations, est également de basse fréquence tout comme le bruit de voisinage entendu à travers un mur dans la mesure où le mur bloque davantage les fréquences plus élevées que les fréquences plus basses.

Perception du bruit basse fréquence : niveau et composition spectrale

La relation entre la fréquence et le niveau de pression acoustique (*Sound Pressure Level* noté « SPL ») est telle qu'un son de 20 Hz doit dépasser un SPL d'environ 84 dB pour pouvoir être détecté. Si l'on descend en fréquence, le SPL doit être plus élevé pour que le son soit perçu. Sur la figure 2, Berglund *et al.* [1] ont rassemblé les résultats d'un certain nombre d'études ayant déterminé le seuil d'audition pour le bruit basse fréquence et d'autres types de bruits. Ces différents résultats démontrent sans ambiguïté que le bruit basse fréquence (infrasons compris) est détectable par l'appareil auditif humain. En outre, une plus grande quantité d'énergie est nécessaire à la détection des fréquences les plus basses.

Par ailleurs, **la composition spectrale d'un bruit basse fréquence a un impact fort sur son seuil d'audibilité**. En effet, Ryu *et al.* [10] ont mesuré les seuils d'audition de sons basse fréquence complexes comprenant plusieurs composantes spectrales inférieures à 150 Hz. L'objectif de cette étude était de déterminer les effets de l'intensité et des différences de fréquences entre composantes spectrales et l'influence du nombre de composantes sur la détection des sons complexes. Ryu *et al.* ont tout d'abord mesuré les seuils d'audition pour des sons complexes comprenant deux composantes centrées géométriquement à 60 Hz avec des différences de fréquence de 30, 60, 90 ou 120 Hz. Ensuite, des mesures de seuils ont été conduites pour des sons complexes comprenant de deux à six composantes spectrales dans la gamme de fréquence 25-145 Hz. Les essais réalisés ont permis de montrer que :

- les sons basse fréquence complexes comprenant plusieurs composantes spectrales inférieures à 150 Hz sont détectables même lorsque le niveau de pression acoustique de chaque composante est inférieur à son niveau de seuil ;
- les niveaux de seuil pour un son complexe (en termes de niveau par composante spectrale) diminuent lorsque le nombre de composantes augmente ;
- les sons complexes avec des composantes spectrales proches (en termes de fréquence) sont plus facilement détectables que ceux avec des composantes très éloignées.

Gêne due au bruit basse fréquence

La plupart des murs de bâtiments ont un indice d'affaiblissement peu élevé dans la région des basses fréquences, si bien que les transmissions du bruit entre locaux et de l'extérieur vers l'intérieur peuvent être problématiques. En effet, l'atténuation du bruit basse fréquence nécessite un matériau épais et dense. D'ailleurs, s'agissant semble-t-il de l'absorption intérieure, Leventhall *et al.* mentionnent que la plupart des revêtements acoustiques, généralement de quelques centimètres d'épaisseur, sont inefficaces à basse fréquence [2].

On peut donc dire que la faible atténuation du bruit basse fréquence par les murs mais également son omniprésence dans l'environnement en font un facteur de gêne très important [11].

Difficultés rencontrées lors de l'évaluation de la gêne sonore

De manière générale, le niveau de gêne engendré par un bruit spécifique, indépendamment de la fréquence, est difficile à prédire avec précision pour un individu. Le même bruit peut, pour différentes personnes, entraîner des réactions totalement différentes en fonction de facteurs culturels, de l'activité réalisée au moment de l'exposition, de l'attitude vis-à-vis de la source de bruit, de la sensibilité au bruit, de la contrôlabilité du facteur de stress et d'autres différences individuelles. La prévision des réactions individuelles est également légèrement limitée par la fiabilité du jugement de gêne et des mesures de bruit [12]. Néanmoins, le degré de prévision des réactions moyennes de groupes de sujets dans le cadre d'enquêtes socio-acoustiques est relativement bon [9].

Plus spécifiquement, **les diverses études menées ont permis d'observer que la gêne engendrée par un bruit basse fréquence est plus difficile à prévoir avec précision que celle occasionnée par un bruit constitué d'un spectre de fréquences plus large**, et cela pour différentes raisons.

Tout d'abord, le problème le plus important propre aux études *in situ* évaluant la gêne provoquée par le bruit basse fréquence est que le bruit basse fréquence pur est rare. Ainsi, la plupart des études réalisées portent sur des bruits à large bande contenant une composante basse fréquence prédominante ou pour le moins relativement importante. Par conséquent, les effets du bruit basse fréquence en lui-même sont difficiles à identifier. La comparaison de diverses sources de bruit comprenant différentes composantes basse fréquence n'est qu'une solution partielle au problème. Effectivement, deux sources de bruit peuvent différer au niveau de leur composition spectrale en basse fréquence mais également en de nombreux autres points. Par exemple, les attitudes vis-à-vis de la source de bruit, le moment de la journée où le bruit est émis, la proximité ou la visibilité de la source peuvent varier et influencer la gêne ressentie.

La signification accordée par les plaignants au bruit peut également affecter fortement le jugement de gêne. En effet, la plupart des enquêtes *in situ* sur la gêne sonore ont été menées à des endroits où la source de bruit était connue, par exemple le transport aérien ou le transport routier [2]. Toutefois, il arrive fréquemment que la source de bruit basse fréquence ne puisse pas être identifiée de manière indubitable, ce qui exacerbe la gêne. Les personnes touchées souffrent alors d'une frustration extrême et peuvent juger nécessaire de présumer de la nature de la source incriminée, leur permettant ainsi de focaliser leur colère et leur ressentiment sur une cible tangible. Parmi les sources supposées, on retrouve notamment les gazoducs, les transmissions radio et les bases militaires.

Pour finir, il arrive souvent que les basses fréquences soient incriminées à tort. Effectivement, il y a toujours du bruit basse fréquence présent au sein d'un fond ambiant « calme ». Les composantes basse fréquence proviennent souvent de sources industrielles ou de transport qui sont trop éloignées pour pouvoir être clairement identifiées. Toutefois, selon le type de local, les niveaux sonores peuvent augmenter rapidement en dessous de 50 Hz et atteindre 40-50 dB à des fréquences inférieures à 20 Hz. On pourrait être alors tenté de conclure que cette hausse des niveaux de basses fréquences est à l'origine de la gêne ressentie, négligeant ainsi que le seuil d'audition à 20 Hz est supérieur à 70 dB.

En règle générale, un bruit large bande qui est plus de 20 dB en dessous du seuil d'audibilité moyen est peu susceptible d'être une source de gêne, attendu qu'il se trouve en dessous du seuil d'audition des personnes les plus sensibles.

Utilisation de la pondération A pour caractériser la gêne sonore

Même si le filtre A est utile pour estimer de manière approximative la gêne provoquée par les moyennes et les hautes fréquences d'un bruit stationnaire, il la sous-estime fortement lorsque le bruit contient des basses fréquences. Bryan [13], par exemple, a constaté que des bruits contenant des niveaux élevés de basses fréquences et de faibles niveaux de hautes fréquences ont donné lieu à des plaintes vigoureuses alors que le niveau d'exposition n'était que d'environ 55 dB(A). Par ailleurs, Tempest [14] a étudié des bruits basse fréquence provenant de différentes sources (voiture, train diesel, chaudière à mazout, installation de ventilation) et a constaté que le nombre de plaintes enregistrées était beaucoup plus important que ce qui pouvait être prévu au vu des niveaux de pression acoustique en dB(A) des bruits considérés.

De même, Persson *et al.* [15] ont comparé un bruit centré à 250 Hz avec un bruit centré à 100 Hz ajusté au même niveau pondéré A et ont montré que la gêne causée par le bruit basse fréquence était supérieure à celle occasionnée par le bruit de fréquence supérieure au même niveau pondéré A. Ce travail a ensuite été étendu [16,17] en utilisant un large éventail de bruits centrés à 80 Hz, 250 Hz, 500 Hz et 1 000 Hz, conduisant ainsi aux conclusions suivantes :

- il existe une grande variabilité entre les sujets ;
- le dB(A) sous-estime la gêne pour les fréquences inférieures à 200 Hz environ.

Pour le bruit large bande basse fréquence, la sous-estimation était de 3 dB pour des niveaux d'environ 65 dB et de 6 dB pour des niveaux d'approximativement 70 dB. Des résultats similaires ont été obtenus lors de travaux antérieurs [18]. Deux bruits large bande ont été étudiés, l'un des deux concentrant la majorité de son énergie dans la gamme 15-50 Hz. Vingt sujets ont comparé les deux bruits dans la plage dynamique 49-86 dB(A). À même niveau pondéré A, le bruit dominé par la composante basse fréquence a été perçu comme 4 à 7 dB plus fort et 5 à 8 dB plus gênant.

Finalement, comme la pondération A sous-estime le niveau de bruit d'un son à composantes basse fréquence, Berglund *et al.* [19] suggèrent que l'utilisation de la pondération C pourrait permettre une meilleure évaluation de ses effets.

Courbes de niveau de gêne

Møller [20] a déterminé les courbes de niveau de gêne pour des sons purs dans la gamme de fréquence de 4 Hz à 31,5 Hz. Les moyennes obtenues pour dix huit sujets ayant une audition normale sont présentées en figure 3. L'échelle verticale correspond à la note de gêne donnée sur une échelle linéaire de 150 mm. **Le niveau sonore des fréquences les plus basses doit être plus élevé pour que les sons purs puissent être audibles mais, une fois qu'ils le deviennent, la gêne augmente très rapidement.**

Cet aspect est l'un des arguments en faveur d'une catégorie « basses fréquences ». Par exemple, pour le son à 4 Hz, on observe une amplitude d'environ 10 dB en niveau de pression acoustique entre les gênes minimale (audibilité) et maximale (seuil de la douleur). La gêne causée par les sons à 8 Hz et 16 Hz se situe dans une gamme de 20 dB, tandis que pour le son à 31,5 Hz, l'amplitude est de quasiment 40 dB. À titre de comparaison, pour la bande d'octave centrée à 1 000 Hz, la plage de gêne s'étend sur près de 60 dB. Soulignons que ces résultats sont valables uniquement pour des sons purs : en effet, il a été indiqué précédemment que dans le cas de sons complexes comprenant plusieurs composantes spectrales basse fréquence, le seuil d'audibilité du bruit diminue.

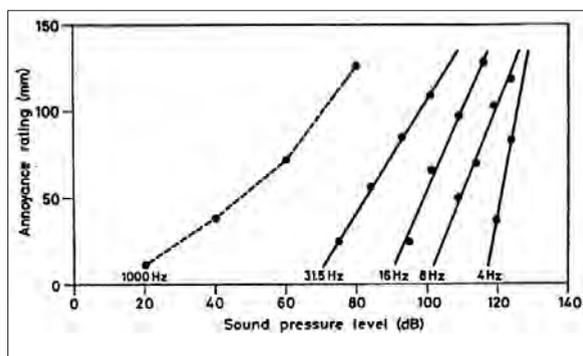


Fig. 3 : Notes de gêne [20]
Annoyance ratings [20]

Moorhouse *et al.* [21,22,23], quant à eux, ont proposé une courbe de référence pour caractériser la gêne due au bruit basse fréquence (Tableau 1 et Figure 4). En effet, selon eux, si le L_{eq} , qui est mesuré dans une pièce inoccupée à un moment où le bruit perçu comme gênant est présent d'après le plaignant, dépasse les valeurs présentées dans le tableau 1, cela indique l'existence d'une source de bruit basse fréquence potentiellement gênante.

Fréquence (Hz)	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
L_{eq} (dB)	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

Tabl. 1 : Points de la courbe de référence proposée par [21,22,23]
Points of the reference curve proposed by [21,22,23]

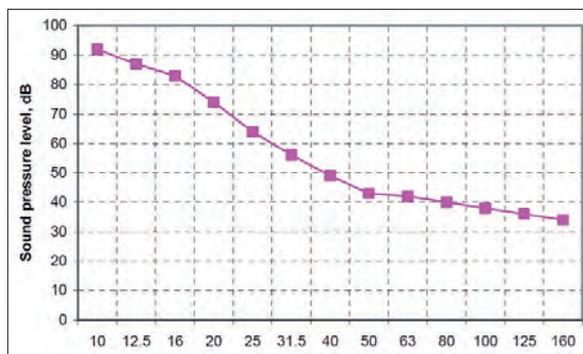


Fig. 4 : Courbe critère pour l'évaluation du bruit basse fréquence [21,22]
Criterion curve for assessment of low frequency noise [21,22]

Influence des variations de niveau de bruit

Holmberg *et al.* [24] ont étudié le bruit sur les lieux de travail en utilisant la différence entre les pondérations C et A comme indicateur. L'exposition au bruit basse fréquence a été observée au sein d'un groupe de trente-cinq individus sur un total de trois cent trente-sept personnes. Les mesures de la variation temporelle des niveaux de bruit basse fréquence, moyennés sur 0,5, 1 ou 2 secondes, ont été corrélées à la gêne. Une corrélation significative a été obtenue entre l'irrégularité des niveaux de bruit et la gêne. Ce travail démontre l'importance des fluctuations de niveau de bruit. En effet, la limite majeure de nombreux travaux de recherche visant à évaluer la gêne due au bruit basse fréquence réside dans le fait que des mesures moyennées à long terme ont été utilisées et que, par conséquent, les informations sur les variations ont été perdues.

L'importance des variations du niveau de bruit a également été évaluée dans le cadre d'études en laboratoire [25]. Les sujets ont tout d'abord écouté des bruits stationnaires large bande centrés à 31,5 Hz et ils ont ajusté leur niveau global de façon à ce que la gêne provoquée soit équivalente à celle suscitée par un spectre de référence décroissant de 5 dB/octave. Il a été constaté que plus le bruit basse fréquence est important, plus la réduction du niveau global requise est élevée. Les spectres d'essai ont alors été modulés en amplitude à des fréquences de modulation de 0,25, 0,5, 1, 2 et 4 Hz et des intensités de 10 dB et 17 dB. Les sujets ont à nouveau ajusté le niveau des bruits afin de produire la même gêne que le bruit de référence non modulé. Les atténuations nécessaires varient avec la fréquence de modulation et l'intensité de modulation. Par exemple, pour l'intensité de modulation la plus élevée à la fréquence de modulation de 2 Hz, le niveau a été réduit de 12,9 dB en moyenne sur l'ensemble des sujets. Ce travail confirme l'importance des fluctuations de niveau de bruit comme facteur de gêne et la limite des méthodes d'évaluation de la gêne sonore ne prenant pas en compte les variations de niveau.

Génération de vibrations et de bourdonnements

Le bruit basse fréquence diffère de tout autre bruit par sa faculté de produire des vibrations au sein du corps humain ou de faire vibrer divers objets. Ceci a une forte incidence sur la gêne ressentie. Par exemple, le bruit basse fréquence extrêmement intense produit par un avion au décollage peut ébranler les portes, les fenêtres et les autres objets de la maison, provoquant un fort sentiment de gêne. Les vibrations ont même tendance à amplifier la réaction face au bruit [1]. Schomer *et Averbuch* [26] ont étudié des bruits d'hélicoptère et d'artillerie qui produisent un souffle contenant peu d'énergie aux fréquences supérieures à 200 Hz : ils ont constaté qu'aucun indicateur couramment utilisé pour caractériser le bruit dans l'environnement ne permettait alors de mesurer convenablement la gêne dans l'environnement intérieur dans les cas où le souffle engendrait des vibrations. Même si de très faibles variations à la fois des niveaux de pression acoustique pondérés A et C ont été enregistrées (moins de 1 dB), la gêne ressentie du fait des vibrations provoquées par le souffle correspondait à une augmentation du bruit ambiant de 13 dB.

Enfin, une autre particularité du bruit basse fréquence, c'est qu'il est souvent accompagné par un bourdonnement qui peut accroître le sentiment de gêne [1].

Conclusion

La définition de la notion de bruit basse fréquence varie selon les auteurs ; dans le cadre de cet article, on a considéré que le bruit basse fréquence s'étend sur les plages infrasonore et sonore et correspond à la plage d'environ 1 Hz à 250 Hz. Les sources de bruit basse fréquence peuvent être d'origine naturelle (vent, tonnerre, vagues de l'océan, éruptions volcaniques, tremblements de terre, etc.) mais les bruits perçus comme les plus gênants sont ceux d'origine artificielle (pompes, compresseurs, ventilateurs, systèmes de haut-parleurs, transports terrestres, aéronefs, ouvrages d'art, etc.).

Le bruit basse fréquence est un facteur de gêne potentiellement très important du fait de son omniprésence dans l'environnement et des mauvaises performances d'isolement acoustique de la plupart des murs de bâtiments dans la région des basses fréquences. La gêne provoquée par le bruit basse fréquence peut être évaluée dans le cadre d'enquêtes *in situ* ou lors de tests en laboratoire. Les études *in situ* sont difficiles à interpréter car le bruit basse fréquence pur est rare : la plupart portent sur des bruits à large bande contenant une composante basse fréquence importante et les effets du bruit basse fréquence en lui-même sont donc difficiles à identifier.

Les différentes études menées afin d'évaluer la gêne causée par le bruit basse fréquence mettent en évidence que :

- Le seuil d'audibilité d'un bruit basse fréquence dépend de sa composition spectrale dans la mesure où le niveau de seuil diminue quand le nombre de composantes augmente. En outre, les sons basse fréquence complexes dont les composantes spectrales sont proches (en termes de fréquence) sont plus aisément détectables par l'oreille humaine que ceux ayant des composantes très éloignées ;
- Bien que la pondération A permette d'estimer de manière satisfaisante la gêne provoquée par les moyennes et les hautes fréquences d'un bruit stationnaire, elle la sous-estime fortement lorsque le bruit contient des composantes basse fréquence (jusqu'à 8 dB pour un bruit de 86 dB(A)) ;
- Plus la fréquence d'un son pur est basse, plus son niveau sonore doit être élevé pour qu'il puisse être audible mais, une fois qu'il le devient, la gêne augmente beaucoup plus rapidement qu'aux fréquences supérieures quand le niveau sonore croît ;
- Des variations de niveau de bruit basse fréquence importantes sur des durées courtes sont perçues comme très gênantes ce qui démontre la limite des méthodes d'évaluation de la gêne sonore basées sur des mesures moyennées à long terme ;
- Les vibrations produites par le bruit basse fréquence sont à l'origine d'un fort sentiment de gêne qu'aucune mesure couramment utilisée pour caractériser le bruit dans l'environnement ne permet de décrire convenablement.

La plupart de ces études montrent également qu'il est nécessaire de poursuivre les recherches sur le sujet afin de définir de nouveaux indicateurs permettant de mieux prendre en compte la gêne due au bruit basse fréquence. L'une des pistes de recherche, proposée par [13], pourrait consister à chercher à corrélérer la gêne à la pente du spectre de bruit plutôt qu'au niveau de bruit.

En outre, il apparaît primordial, lorsqu'on est en présence de plaintes, de consigner conjointement le ressenti des plaignants et des mesures physiques normalisées de manière à accumuler les données en vue de mieux comprendre l'origine de la gêne sonore due au bruit basse fréquence.

Remerciements

Cet article est tiré d'un document produit par le PCI « Acoustique et Vibrations » (PCI AV) de la Direction Territoriale Est du Cerema, sur demande de la DGALN/DHUP dans le contexte de la révision de la norme ISO 717 portant sur le calcul des indices uniques des éléments de construction [27]. L'Allemagne proposait alors une redéfinition de ces valeurs uniques en introduisant une nouvelle gamme de fréquences ([50 Hz - 5 000 Hz]) destinée à mieux prendre en compte l'impact des basses fréquences sur la gêne sonore et un nouveau spectre de référence caractéristique de la parole [28,29].

Références bibliographiques

- [1] B. Berglund, P. Hassmén et R. F. S. Job. Sources and effects of low-frequency noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, n°5, p. 2985-3002, 1996.
- [2] G. Leventhall, P. Pelmear et S. Benton. A review of published research on low frequency noise and its effects. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2003.
- [3] R. Guski, U. Felscher-Suhr et R. Schuemer. The concept of noise annoyance : how international experts see it. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 223, n°4, p. 513-527, 1999.
- [4] K. H. Wietlake. Beurteilung und Minderung tieffrequenter Geräusche. LIS Berichte Nr 38, Bundesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Essen, Allemagne, 1983.
- [5] ISO 7196:1995. Acoustique – Pondération fréquentielle pour le mesurage des infrasons. Norme internationale, ISO, mars 1995.
- [6] G. von Békésy. Über die Hörschwelle und Fühlgrenze langsamer sinusförmiger Luftdruckschwankungen. *Annalen der Physik*, vol. 26, n°5, p. 554-566, 1936.
- [7] DIN 45680:2013. Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen. Norme allemande (projet), DIN, septembre 2013.
- [8] H. E. von Gierke et C. W. Nixon. Effects of intense infrasound on man. In *Infrasound and Low Frequency Vibration*, p. 115-150. Academic Press London, 1976.
- [9] R. F. S. Job. Community response to noise : A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, n°3, p. 991-1001, 1988.
- [10] J. Ryu, H. Sato, K. Kurakata et Y. Inukai. Hearing thresholds for low-frequency complex tones of less than 150 Hz. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 30, n°1, p. 21-30, 2011.
- [11] H. Møller. Physiological and psychological effects of infrasound on humans. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 3, p. 1-17, 1984.
- [12] R. F. S. Job. Reliability and stability of noise reaction scales. *Transportation Research Record*, vol. 1312, p. 101-108, 1991.
- [13] M. E. Bryan. Low frequency noise annoyance. In *Infrasound and Low Frequency Vibration*, p. 65-96. Academic Press London, 1976.
- [14] W. Tempest. Loudness and annoyance due to low frequency sound. *Acustica*, vol. 29, n°4, p. 205-209, 1973.
- [15] K. Persson, M. Björkman et R. Rylander. An experimental evaluation of annoyance due to low frequency noise. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 4, n°4, p. 145-153, 1985.
- [16] K. Persson et M. Björkman. Annoyance due to low frequency noise and the use of the dB(A) scale. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 127, n°3, p. 491-497, 1988.
- [17] K. Persson, M. Björkman et R. Rylander. Loudness, annoyance and dBA in evaluating low frequency sounds. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 9, n°1, p. 32-45, 1990.

- [18] A. Kjellberg, M. Goldstein et F. Gamberale. An assessment of dB(A) for predicting loudness and annoyance of noise containing low frequency components. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 3, n°3, p. 10-16, 1984.
- [19] B. Berglund, T. Lindvall et D. H. Schwela. Guidelines for community noise. Genève, Organisation Mondiale de la Santé, 1999.
- [20] H. Møller. Annoyance of audible infrasound. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 6, p. 1-17, 1987.
- [21] A. Moorhouse, D. Waddington et M. Adams. Procedure for the assessment of low frequency noise complaints. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2005.
- [22] M. Gosset et G. Dutilleux. Procédure d'évaluation des plaintes relatives aux basses fréquences (traduction de la référence [22]). CETE de l'Est, PCI Acoustique et Vibrations, 2013.
- [23] A. Moorhouse, D. Waddington et M. Adams. Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2005.
- [24] K. Holmberg, U. Landström et A. Kjellberg. Low frequency noise level variations and annoyance in working environments. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, vol. 16, n°2, p. 81-88, 1997.
- [25] J. S. Bradley. Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sounds containing rumble. *Noise Control Engineering Journal*, vol. 42, n°6, p. 203-208, 1994.
- [26] P. D. Schomer et A. Averbuch. Indoor human response to blast sounds that generate rattles. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, n°2, p. 665-673, 1989.
- [27] E. Gourlay, C. Foy et G. Dutilleux. Étude bibliographique sur la gêne sonore due au bruit basse fréquence dans le bâtiment. Cerema, Direction Territoriale Est, PCI Acoustique et Vibrations, 2014.
- [28] W. Scholl. Revision of ISO 717: Why Not Use Impact Sound Reduction Indices Instead of Impact Sound Pressure Levels ? *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 97, n°3, p. 503-508, 2011.
- [29] W. Scholl, J. Lang et V. Wittstock. Rating of Sound Insulation at Present and in Future. The Revision of ISO 717. *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 97, n°4, p. 686-698, 2011.

