Intensité des infrasons émis par les éoliennes et sa dépendance du sous-sol et d'effets résonants dans les constructions.

J-Bernard Jeanneret*, physicien, Dr.Sc, CH 1009 Pully, Suisse.

jbernard.jeanneret@icloud.com

Septembre 2020

Table des matières

1. Résumé 2
2. Introduction 3
3. Résumé technique 4
4. Niveaux de perception humaine des infrasons. 5
4.1 Note sur les unités sonores utilisées 6
5. Transmission d'ondes infra-soniques par le sous-sol. 6
6. Les résultats des campagnes de mesures 7
6.1 Calcul de propagation dans un sous-sol calcaire 7
7. Amplification de l'intensité sonore dans un bâtiment 8
7.1. Exemple numérique de calcul de fréquence de résonance 9
7.2. Amplification de la vibration externe dans le résonateur 9
8. Niveaux infra-sonores possibles à l'intérieur d'une maison 11
8.1 Discussion des résultats avec résonance de Helmholtz 13
9. Résultats sans résonance de Helmholtz 13
10. L'étude bavaroise sur l'éolien et les infrasons 14
10.1. Sur l'étude danoise de Møller et Pedersen 15
10.2. L'étude finlandaise sur l'éolien et les infrasons 16
11. L'étude néo-zélandaise sur l'influence sanitaire des infrasons et l'effet "nocebo". 16
11.1. Sur les recommandations de l'Académie de Médecine 18
12. Conclusions 18
Remerciements 19
Références 19

1. Résumé

En mettant en lumière le phénomène de la propagation des infrasons dans le sous-sol, cette étude apporte des éléments nouveaux et décisifs au débat sur les nuisances sanitaires des éoliennes. Elle propose une analyse scientifique des origines des troubles de santé dont de nombreux riverains de parcs éoliens se plaignent et que la science et les autorités sanitaires ne sont, jusqu'à présent, pas parvenus à expliquer et légitimer. L'étude montre que le problème des infrasons est plus sérieux qu'on ne le prétend fréquemment et qu'il doit être réévalué sur de nouvelles bases. Une étude approfondie de la composition du sous-sol est déterminante dans le cadre de la planification d'un parc éolien, car c'est par ce biais que se diffusent les infrasons.

L'influence sanitaire des émissions d'infrasons par les éoliennes est un sujet de controverse ancien. Aux plaintes de certains riverains il est opposé que l'intensité mesurée des infrasons à distance des habitations est largement inférieure au niveau audible ou perceptible. Ce dernier niveau est considéré comme le seuil pour l'apparition de nuisances sanitaires.

Les études utilisées pour justifier l'absence de nuisances sanitaires résultent de mesures faites chacune sur un seul parc. Deux études souvent citées donnent, en décibels (dB) d'intensité, des niveaux de 70 et 80 dB à 5 Hertz, à comparer au niveau audible de 110 dB.

La faiblesse de ces études consiste d'abord à se baser sur la mesure d'un seul parc, puis de généraliser leur conclusions à tous les parcs éoliens. Ce qui suppose que les conditions soient identiques partout, comme si n'existait que le rotor éolien, l'atmosphère et des habitants hors-sol.

Or des mesures de vibration du sol à basse fréquence faites par des sismologues montrent des différences importantes d'intensité d'un parc éolien à un autre et aussi des différences dans l'atténuation avec la distance.

L'origine de ces fortes vibrations est à chercher dans la force variable du vent en fonction de la position haute ou basse des pales et aussi par la perturbation causée par leur passage devant le mât. Elles sont transmises à la lourde base en béton dans lequel ce dernier est arrimé.

Normalisées en dB sonores pour une éolienne de 3 mégawatt de puissance, les intensités mesurées à 500 mètres varient de 40 à 100 dB. Un pareil écart ne peut pas être expliqué par une différence de modèle de machine. Il ne peut s'expliquer que par une différence de nature du sous-sol. A une fréquence de 5 Hertz, les ondes de vibration pénètrent dans le sol et se propagent sur des kilomètres en étant souvent faiblement atténuées.

Il faut retenir l'hypothèse que ces ondes de sol sont l'effet dominant dans la propagation des infrasons. En effet, un calcul simple montre que l'émission aérienne d'infrasons liés aux mouvements d'air induits par les pales est trop faible pour expliquer les niveaux observés.

Déduite des observations ci-dessus, dans une roche calcaire relativement homogène, l'intensité sonore à 500 mètres peut s'élever à 105 dB. Ce niveau est pratiquement égal au seuil sensible à 6 Hertz et inférieur de quelques dB au seuil audible.

Dans un bâtiment, le volume d'air d'une pièce connectée au sous-sol ou à l'air extérieur par une petite ouverture peut être mis en résonance avec la vibration externe à basse fréquence (résonance de Helmholtz), ce qui induit une amplification substantielle. Pour une pièce de dimension moyenne l'intensité extérieure peut être augmentée de 10 à 30 dB suivant les paramètres de chaque cas particulier.

L'addition de l'intensité sonore entrante et du coefficient d'amplification par résonance peut s'élever à 120 dB si le sous-sol est sonore (roche formée). Pour les fréquences entre 5 et 10 Hertz, le niveau sonore est supérieur de 10 à 20 dB au seuil audible à 500 m de distance des machines.

Pour qu'une résonance de force appréciable se manifeste, elle doit être excitée à la même fréquence par l'onde de vibration du sol. L'émission infrasonore des éoliennes est faite d'une suite de fréquences propres au-dessus de 1 Hertz. La condition de résonance ne sera évidemment pas toujours réalisée. Ce fait peut expliquer que dans les parcs problématiques, une fraction seulement des habitants en souffrent et se plaignent.

Notre approche permet aussi d'expliquer pourquoi certains parcs ne génèrent pas de plaintes liées aux infrasons. Il s'agit certainement de parcs construits sur des sols sédimentaires non transformés en roche qui absorbent bien les vibrations. Ce qui explique que certains territoires semblent manifester peu de plaintes d'ordre sanitaire en dépit d'une forte présence éolienne. Le Danemark en serait un exemple.

2. Introduction

Les chiffres cités entre crochets ([1], ...) *renvoient à la bibliographie en fin de document.*

Il existe une multitude de publications qui traitent des infrasons émis par les parcs éoliens et de leur l'impact sur les habitants qui résident dans un périmètre large de parfois plus d'un kilomètre. Les articles publiés dans les milieux pro-éoliens concluent systématiquement à l'inexistence d'impacts négatifs, en opposition frontale avec les résidents du voisinage de certains parcs, mais pas de tous les parcs, ni de tous les habitants de ces parcs. Par manque de temps et de moyens techniques suffisants, les auteurs des études qui vont dans le sens des plaignants apportent des conclusions souvent fragiles. Si ces désaccords ne surprennent pas vraiment, les divergences qui apparaissent dans des articles de revues scientifiques sérieuses et en principe garantes d'objectivité laissent perplexe.

On trouvera l'expression de cette perplexité dans un document de l'Académie Nationale de Médecine française [2]. En dépit d'une bibliographie forte de 58 références, les auteurs ne peuvent pas formellement conclure à la nocivité ou non des infrasons éoliens. En substance, ils adoptent une position fréquente : le bruit infrasonique mesuré près de certains parcs est trop au-dessous du seuil audible ou sensible pour être une gêne. Mais ils insistent par ailleurs dans leurs recommandations sur la nécessité d'un durcissement des prescriptions concernant le bruit en-dessus de la plage infrasonique (voir un extrait dans la Sect. 11.1). Un paragraphe de ce document que nous jugeons discutable est présenté dans la Sect. 11.

Il est de fait que les plaintes proviennent de voisins de seulement une fraction des parcs éoliens, sans raison connue à ce jour.

Pour tenter de voir plus clair dans cette problématique, nous présentons des travaux techniques et scientifiques sur l'émission et la propagation des infrasons dans le sous-sol, et sur la comparaison de leur intensité avec les limites audibles et perceptibles de l'organisme humain dans la gamme de fréquences inférieures à 20 Hertz. La question des incidences médicales qui y sont liées n'est pas abordée ici.

Il est souvent objecté aux plaintes que les infrasons aériens émis par les pales d'éoliennes sont de trop faible intensité et sont trop rapidement atténués avec la distance pour nuire aux habitants au-delà de

200 m. Nous sommes d'accord avec cet argument. Les pales émettent principalement dans la gamme des basses fréquences audibles (entre 20 et 200 Hertz). Ces fréquences sont modulées par le passage des pales devant le mât, pour des fréquences de modulations entre approximativement 0.5 et 10 Hertz. Si le son émis est décomposé en fréquences, la bande de modulation est effectivement de faible amplitude.

Ce qui pose problème ici, c'est que cet argument est souvent présenté comme réglant définitivement la question des infrasons. Les plaintes pourtant motivées sont écartées en invoquant de l'autosuggestion, de l'hypocondrie, voire des inventions malveillantes. Bien que toutes ces manifestations existent, elles ne sauraient pourtant être présentées comme une explication exclusive. Elles existent associées à beaucoup de problèmes de santé, sans qu'elles puissent être généralement et systématiquement considérées comme la cause unique de ces derniers.

Il faut donc chercher ailleurs que dans les émissions infrasonores aériennes pour expliquer les troubles avérés ressentis par certains riverains de parcs éolien.

Une réponse vraisemblable se trouve dans les vibrations de l'éolienne qui sont transmises au sous-sol par le mât et par la lourde structure en béton qui lui sert de base rigide et stable. Ces vibrations sont produites par la dépression créée entre le mât et une pale à son passage devant lui, et par l'écart de vitesse de vent entre le haut et le bas de la zone balayée par le rotor. Le mât et les pales ont des fréquences propres qui s'additionnent à celle de la rotation du rotor et de son multiple de trois (3 pales). La puissance associée à ces vibrations est très élevée par rapport à celle des émissions sonores aériennes. Une publication donnée en référence (très technique) montre la complexité et l'importance de ce phénomène, dont l'étude doit être inhérente à celle de la conception des machines éoliennes pour préserver leur intégrité [3]. De la base en béton, les vibrations rayonnent soit dans toutes les directions possibles, horizontales et verticales (ondes de volume "solidiennes"), soit sous forme d'ondes de surface (la vibration soulève la surface), ces dernières s'atténuant plus lentement avec la distance.

Ces ondes sont bien connues des géologues et des sismologues. Plusieurs études ont été dédiées à la proximité de parcs éoliens (discussion : Sects. 5 et 6). Les niveaux sonores associés dans des constructions varient considérablement d'une région à une autre à cause des différences de structure du sous-sol.

Finalement, les vibrations peuvent dans certaines conditions être amplifiés dans une pièce par un processus, la résonance de Helmholtz, qui se trouve être calculable (discussion : Sect. 7).

Mis ensemble, l'association de ces deux processus peut produire des intensités sonores qui dépassent notablement les seuil sensibles et audibles en dessous de 20 Hertz (discussion : Sect. 8).

Nous montrons que les études souvent citées [18, 21] (Sect. 10) pour conclure à l'absence de nuisance infrasonore sont faites près de parcs situés sur des sous-sols peu sonores. Les niveaux de vibration mesurés y sont nettement plus bas que les niveaux audibles. Leurs conclusions ne sont donc à strictement parler valables que pour ces sites précis et ne peuvent pas être généralisées.

3. Résumé technique

Les mesures et des analyses de propagation d'ondes dans les sous-sols ainsi que leur synthèse sont

présentées dans les sections suivantes. S'y ajoutent les résultats d'une étude mandatée par le Land de Bavière [18] et une étude finlandaise [21] souvent citées pour affirmer que l'émission infrasonique des éoliennes ne provoque ni nuisances ni troubles de santé.

Les points résumés ici sont justifiés plus bas (voir les renvois à des sections ou figures).

1. Les mesures d'ondes sonores dans le sol et en fonction de la distance à des éoliennes montrent des intensités très différentes d'un site à l'autre déjà à relative proximité des machines (200 à 300 m). Voir Sects. 5 et 6 et Fig. 2.
2. L'atténuation avec la distance est aussi variable, mais dans une moindre mesure. Les atténuations sont compatibles soit avec une propagation d'ondes dans le volume du sol, i.e. dans toutes les directions, soit selon une propagation à la surface du sol. Dans ce dernier cas, l'atténuation avec la distance est plus faible (Fig. 2).
3. A 500 m de distance d'un parc, les intensités observées, converties en dB aériens, varient de 40 à 95 dB selon le site (Fig. 2).
4. Déduite des observations ci-dessus, dans une roche calcaire dure et relativement homogène, l'intensité sonore peut s'élever à 105 dB (Sect. 9 et Fig. 8a). Ce niveau est pratiquement égal au seuil sensible à 6 Hertz et inférieur de quelques dB au seuil audible.
5. Dans un bâtiment, le volume d'air d'une pièce connectée au sous-sol par une petite ouverture (passage de conduite, fente, petite vitre dans un mur épais, conduit de ventilation ou d'évacuation d'humidité, etc.) peut être mis en résonance avec la vibration externe à basse fréquence (résonance de Helmholtz), ce qui induit une amplification substantielle. Pour une pièce de dimension moyenne, l'intensité extérieure peut être augmentée de 10 à 30 dB suivant la fréquence de résonance et le coefficient d'absorption sonore des parois à basse fréquence. Voir Sects. 7 et 7.2.
6. L'addition de l'intensité sonore entrante et du coefficient d'amplification par résonance peut donc s'élever à plus de 120 dB si le sous-sol est sonore (roche formée), voir les deux points ci-dessus. Pour les fréquences entre 5 et 10 Hertz, le niveau sonore est supérieur de 10 à 20 dB au seuil audible à 500 m de distance des machines (Fig. 5).
7. A 2000 m de distance, le dépassement reste marqué (jusqu'à 10dB à 10 Hertz) pour un sous-sol calcaire (Fig. 7).
8. L'excitation de résonances de structure de bâtiments n'est pas abordée ici. Elle peut aussi induire des nuisances additionnelles.
9. Pour qu'une résonance de force appréciable se manifeste, il faut bien sûr qu'elle soit excitée à la même fréquence par l'onde de vibration du sol. L'émission infrasonore des éoliennes est faite d'une suite de fréquences propres au-dessus de 1 Hertz. La condition de résonance ne sera évidemment pas toujours réalisée. Ce fait peut expliquer le fait que dans les parcs problématiques, une fraction seulement des habitants se plaignent, même quand la gêne explicite des bruits audibles en basse fréquence (au-dessus de 20 Hertz) n'est pas très marquée.

4. Niveaux de perception humaine des infrasons.

De basse fréquence, inférieures à 20 Hertz, les ondes infra-sonores sont inaudibles au sens habituel d'un son identifiable (par exemple au sens ou en musique une note a une hauteur), mais perceptibles et audibles, souvent sous forme de gêne à une intensité suffisamment élevée. La Figure 1, extraite

d'une étude très détaillée [4] présente la puissance sonore nécessaire pour qu'un son soit audible en fonction de la fréquence. Un niveau de 100 dB est nécessaire à 10 Hertz et de 120 dB à 1 Hertz. Il est admis que des troubles physiologiques se manifestent pour les humains déjà à quelques décibels en-dessous de ces niveaux sonores, voir [4].

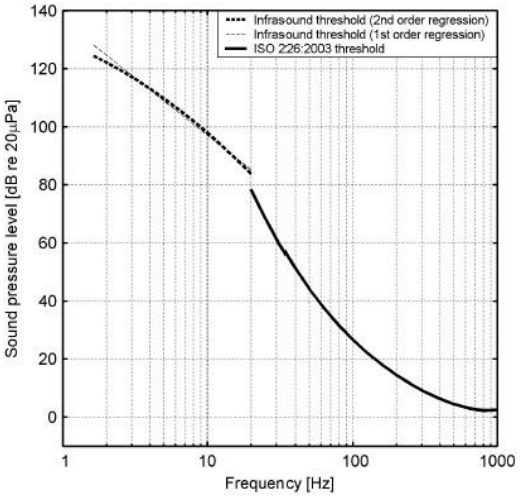


Figure 10. Standardized hearing threshold above 20 Hz (ISO 226:2003) and proposed normal hearing thresholds for frequencies below 20 Hz.

Figure 1 – Seuil d'audibilité, en dB et en fonction de la fréquence, figure extraite de [4].

4.1 Note sur les unités sonores utilisées

Pour éviter des complications de lecture, toutes les intensités (ou puissances) sonores sont données en décibels (dB) d'intensité. La notation habituelle dBSPL (pour Sound Pressure Level) prête à confusion, la pression étant une amplitude. Nous utilisons dans les figures la notation "dB réf 1pW" (W pour Watt, l'unité de puissance, p pour "pico" : 10^{-12} qui correspond à la limite d'audibilité à 1000 Hertz). Pour ne pas alourdir le texte, nous écrivons simplement "dB" pour "dB réf 1pW". Les "dB réf 1pW" et les "DBSPL réf 20μPa" sont par ailleurs strictement identiques.

5. Transmission d'ondes infra-soniques par le sous-sol.

Il existe de multiples données de mesures d'intensité d'ondes infrasonores dans le voisinage de parcs éoliens. Ces données sont souvent partielles et parfois incompatibles entre elles, et ne permettent pas de tirer des conclusions claires. Un indice permet cependant de comprendre pourquoi elles peuvent être perçue à grande distance (plusieurs kilomètres d'un parc éolien) : dans certaines régions, leur intensité baisse très lentement avec la distance, ce qui suggère l'existence d'ondes sismiques de surface. L'existence d'ondes de surface est connue de longue date des géologues spécialisés en sismologie. Elles ont été prédites par Lord Rayleigh en 1885 [5], dont le nom a été donné à un de leurs modes de propagation. Une théorie détaillée est exposée dans [6].

Nous montrons ici les résultats de mesures complètes faites sur quatre parcs éoliens, l'un en Italie et les trois autres en Allemagne. Ces études sont précises, avec des mesures faites à différentes distances des parcs, ce qui permet d'analyser leur atténuation en fonction de la distance. Les articles correspondants [7, 8, 9] sont publiés dans des revues scientifiques avec relecture avant décision de publication par les éditeurs.

Une campagne de mesures a été faite à l'ouest de Pise [7], entre le détecteur d'ondes

gravitationnelles VIRGO et un parc éolien de quatre machines à 10 km de distance. L'expérience était motivée par l'inquiétude liée à un projet de construction de nouvelles éoliennes dans la région, qui risquaient de perturber VIRGO. L'étude [8] faite près de Schwarmstedt au nord de Hanovre (Basse-Saxe) était motivée par le risque de sérieuses perturbations du fonctionnement d'une station sismique liée au réseau de détection d'essais d'armes nucléaires souterraines. Finalement l'étude [9] était aussi motivée par un affaiblissement des capacités de détection de stations de détection de séismes naturels. Deux sites ont été explorés, l'un à Fraureuth-Beiersdorf en Saxe, l'autre à Heinde en Basse-Saxe [9].

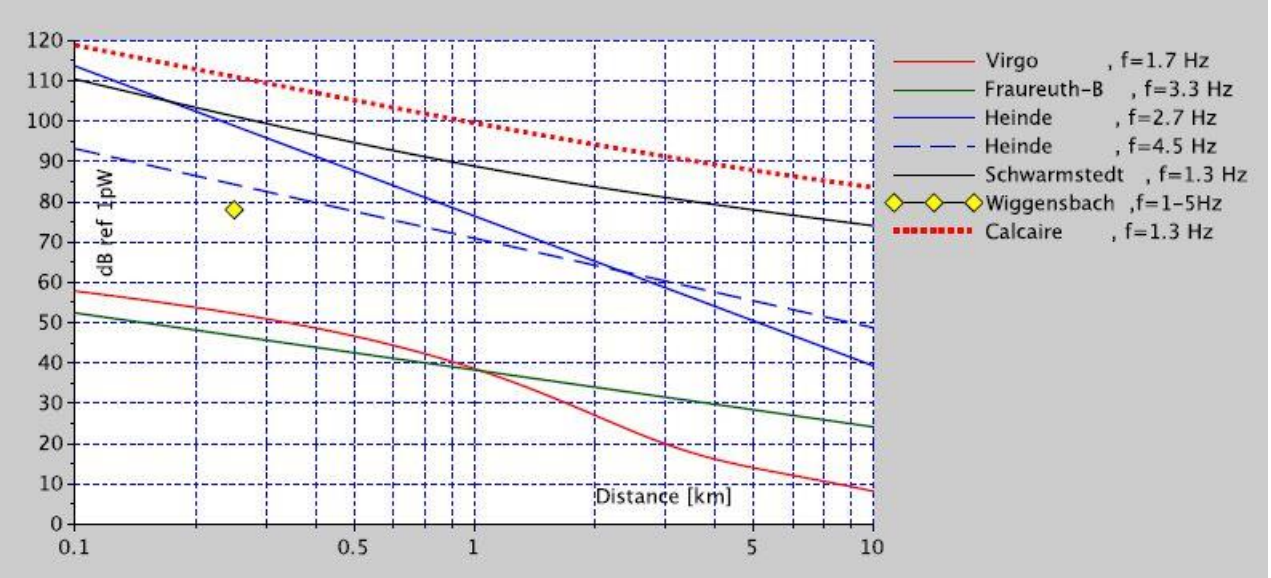


Figure 2 – Les intensités détectées dans le sol en fonction de la distance à un parc éolien pour les régions données en légende, voir texte pour les références aux études. Elles sont converties ici de manière homogène en décibels de puissance sonore dans l'air et paramétrisées pour permettre leur combinaison avec les phénomènes de résonance discutés plus bas. Les fréquences indiquées dans la légende sont celles sélectionnées par les auteurs dans les spectres mesurés. Le point "Wiggensbach" mesuré à 250 m d'une machine est tiré de l'étude bavaroise [18], voir Sect. 10.

6. Les résultats des campagnes de mesures

Les mesures rapportées dans [7, 8, 9] sont toutes du même type. Des détecteurs de vibrations de basses fréquences sont enterrés à plusieurs distances (de 100 m 10 km) de la source d'ondes sismiques - le parc éolien. Le spectre mesuré est analysé en fréquence et l'intensité des raies spectrales est corrélée à la vitesse de rotation des pales, qui varie au cours du temps, ce qui permet de les séparer d'autres éventuelles sources de vibrations. Les résultats sont présentés en puissance (dB réf 1pW, voir Sect. 4.1) [8] ou en vitesse de vibration (m/s/Hertz^0.5) [7, 9]. Les résultats paramétrisés pour une raie spectrale du spectre observé sont reproduits dans la Fig. 2, tous convertis ici en dB réf 1pW.

La Fig. 2 montre que le niveau des vibrations du sol peut varier de plus de 60 dB d'un site à un autre pour une même puissance éolienne.

6.1 Calcul de propagation dans un sous-sol calcaire

Une part importante des parcs éoliens suisses en projet ou existants sont situés en altitude, c'est à dire sur des sous-sols rocheux. Peu de sites sont ou seront localisés sur le plateau et dans des plaines alluviales. Pour compléter notre évaluation de l'éventail des types de sous-sol, une estimation de niveau infrasonore est proposée pour un sous-sol calcaire. La référence [7] est la seule qui donne des indications sur la nature du sous-sol de la région étudiée. Le sous-sol y est formé de trois couches superposées. Les deux couches supérieures sont sédimentaires. Elles reposent sur une couche calcaire à une profondeur de 800 m. Les données enregistrées en surface en un grand nombre de points permettent de calculer deux caractéristiques de chacune de ces trois couches, la vitesse de propagation et le coefficient d'absorption des ondes de vibration aux fréquences de quelques Hertz. Pour la couche de calcaire la vitesse est v = 1200 m/s et le coefficient d'absorption, exprimé comme facteur de qualité vaut Q = 120 [7]. Ces deux valeurs sont retenues pour notre évaluation, tout en notant que suivant le type de calcaire la vitesse peut être notablement plus élevée, jusqu'à plusieurs kilomètres/secondes. Notre approche ne favorise donc pas des niveaux élevés d'intensité à distance de la source (voir la formule de propagation de l'amplitude sonore ci-dessous, Eq. (1).

La décroissance de l'amplitude de vibration avec la distance s'exprime suivant la formule

$$A(f,r) = \frac{A(r=1m)}{r^n} exp^{-\frac{\pi f r}{Qv}} \quad (1)$$

avec A l'amplitude de vibration, f la fréquence et r la distance. Pour une onde de volume n = 1 et pour une onde de surface n = 1/2. En pratique, on observe une superposition des deux modes. L'intensité, ou puissance sonore I, est proportionnelle au carré de A et à $1/r^2$ ou $1/r$ suivant le mode d'onde. Un calcul simple avec l'Eq. (1) montre que jusqu'à 2 km la perte d'intensité par absorption est inférieure à 2 dB. Pour l'atténuation avec la distance l'intensité on utilisera donc

$$I(r) = \frac{I_v(r=1m)}{r^2} + \frac{I_s(r=1m)}{r} \quad (2)$$

Les intensités de normalisation $I(r = 1m)$ définies au centre virtuel d'émission du parc sont déduites de la fonction de propagation de [8] pour le site de Schwarmstedt. Ce choix est un peu arbitraire mais reste délibérément du côté des basses intensités. Une valeur déduite des mesures de Heinde [9] serait plus élevée. On obtient I_v = 147 et I_s = 110 $dB_{réf\ 1pW}$.

Le résultat est donné par la courbe "Calcaire" de la Fig. 2.

7. Amplification de l'intensité sonore dans un bâtiment

L'existence d'importantes différences d'amplitude des ondes de vibrations du sol observées à distance d'un parc éolien et liées à la nature du sous-sol ont été montrées dans la Sect. 6 et la Fig. 2. Ces différences peuvent encore être amplifiées dans un bâtiment pour une même intensité de vibration du sol. Cette amplification peut être produite par le phénomène de résonance de Helmholtz, identifié par le savant allemand du même nom en 1850. On en trouve une présentation simple dans [12], qui donne plusieurs applications pratiques du phénomène. On peut voir des exemples d'instruments de musique fonctionnant sous ce principe dans [13]. Pour le problème qui nous occupe, elle a été étudiée par R. Vinokur en 2004 [11]. Curieusement sa publication ne semble pas avoir attiré beaucoup d'attention. Le principe de base est construit avec l'illustration de la Fig. 3. Une excitation

est appliquée en haut du col (longueur *L* et surface *A*) d'un récipient. Elle fait vibrer le contenu d'air du col. Ce mouvement d'air dilué dans le volume *V* largement plus grand du corps du récipient y produit une légère variation de pression, ce qui en fait une force de rappel faible dans le col. La fréquence propre de l'assemblage est donc plus faible que celle du même récipient fermé.

La formule permettant le calcul de la fréquence propre est donnée dans [11, 12] , avec la vitesse du son c = 340 m/s :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi}\left(\frac{A}{VL}\right)^{1/2}$$	(3)

1. Exemple numérique de calcul de fréquence de résonance

Une pièce fermée de dimensions et volume 5 x 5 x 2 =50 m3 aura une fréquence propre $f_p = c/($ 2 x 5*m*) =34 Hertz dans sa grande dimension. Ouverte et excitée de l'extérieur par un col de surface et longueur *A* = 0.2 m2 et *L* = 0.1 m, la fréquence de Helmholtz (Eq. 3) sera f_0 = 5 Hertz, soit 7 fois plus petite que f_p.

Une cave de cette dimension, et qui possède une petite ouverture (passage de conduite, ouïe d'évacuation d'humidité) vers le sous-sol qui vibre à la fréquence f_0 sera excitée par résonance. De même, une pièce d'habitation de même volume connectée par un conduit d'aération à l'air extérieur qui vibre à la fréquence du sol comme ci-dessus, produira la même résonance. En faisant varier légèrement les dimensions du conduit ou de la pièce, on change la valeur de f_0. Tout la plage de fréquence infra-sonore entre 1 et 20 Hertz peut être couverte de multiples manières dans un bâtiment.

Il reste à estimer le facteur d'amplification de la vibration externe par la résonance.

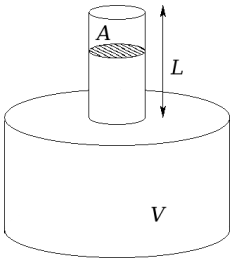


Figure 3 – Résonateur de Helmholtz élémentaire. C'est une structure creuse constituée d'un grand volume d'air *V* et d'un col de petite section et de faible volume. Une bouteille vide en est un exemple simple.

2. Amplification de la vibration externe dans le résonateur

Quand un résonateur est excité en continu à sa fréquence propre (dans notre exemple ci-dessus, la fréquence de Helmholtz f_0 = 5 Hertz) l'amplitude croit continument en l'absence de facteur amortissant. Avec un amortissement par l'absorption des ondes infra-sonores par les parois de la pièce, un équilibre s'établit. L'amortissement est paramétrisé par le temps de déclin de l'amplitude sonore, noté τ (tau) quand l'excitation est supprimée. La description mathématique est donnée par la théorie de l'oscillateur harmonique amorti associé au calcul de l'oscillation entretenue, sujet de cours de base de physique universitaire. On peut se reporter à [15], du site de cours en ligne de Sorbonne-Université

pour un développement complet.

L'amplitude à la résonance divisée par l'amplitude d'excitation est donnée par

$$\frac{A_{res}}{A_{exc}} = \frac{\omega_0^2}{\frac{2}{\tau}\left(\omega_0^2 - \frac{1}{\tau^2}\right)^{1/2}} \quad (4)$$

avec la $\omega_0 = 2\pi f_0$ et τ le temps d'amortissement défini plus haut et pour un produit $\omega_0\tau$ plus grand que 1.

Ce facteur d'amplification est converti en décibels :

$$dB_{Helmholtz} = 20log_{10}\left(\frac{A_{res}}{A_{exc}}\right) \quad (5)$$

qui s'additionneront aux $dB_{réf\ 1\ pW}$ de la Fig. 2.

Le temps d'amortissement τ qui apparaît dans Eq. (4) est estimé avec la loi empirique de Sa- bine (1898, Wallace Sabine), qui donne le temps T pour le déclin d'intensité de 60 dB (30 dB de l'amplitude sonore) d'un son dans une salle. Le temps T est donné par

$$T = \frac{0.16V}{\alpha S} \quad (6)$$

où V est le volume de la pièce, S sa surface et α (alpha) le coefficient d'absorption moyen de la surface. Cette loi est approximative, surtout à basse fréquence, et donne une indication plutôt qu'une certitude dans le résultat. Converti en temps de déclin τ , on obtient $\tau = T/6.9$, soit avec (6)

$$\tau = 0.023\frac{V}{\alpha S}. \quad (7)$$

Le coefficient d'absorption α dépend de la nature la surface de la pièce. Il doit être pondéré pour les différentes sortes de surface, et corrigé des objets contenus dans la pièce. Pour la majorité des types de parois, α diminue avec la fréquence (moindre absorption). On trouve une table assez complète de coefficients dans [16]. Cette table ne donne pas de valeurs en dessous de 125 Hertz. Pour des parois massives non couvertes de matériaux absorbants α = 0.02 à cette fréquence, et diminue avec la fréquence. Vinokur donne α = 0.01 - 0.02 pour les infrasons, qui ne sont pas absorbés par des objets (mobiliers, etc.) contenus dans la pièce mais seulement par des murs massifs [11]. Les couvertures isolantes minces n'absorbent pas non plus les infrasons. On peut considérer des valeurs de α = 0.01 − 0.02 avec une bonne sécurité.

Avec l'exemple de la Sect. 7.1, si la pièce a les dimensions V = 5 x 5 x 2 = 50 m3, la surface totale des six faces sera S = 90 m2. Les décibels additionnels sont donnés en fonction de la fréquence de résonance de Helmholtz et du temps de déclin τ dans la Fig. 4, et en fonction de α et τ aux fréquences 5 Hertz et 10 Hertz dans la Table 1.

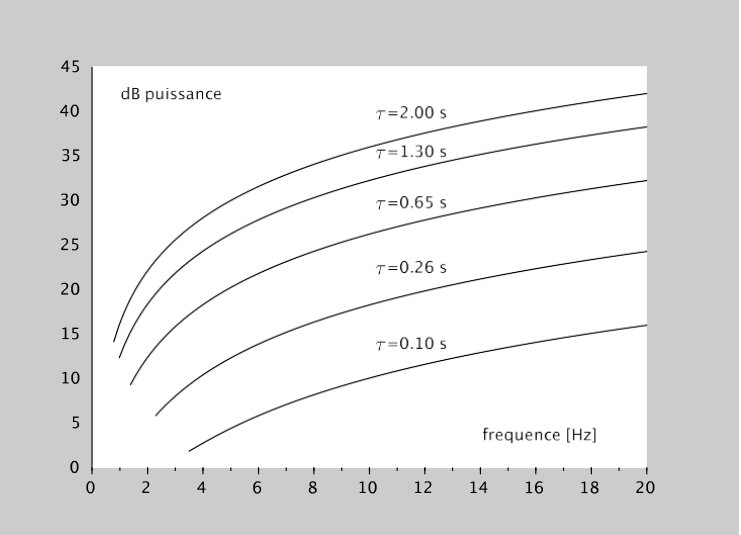


Figure 4 – dB de puissance additionnels associés à la résonance de Helmholtz en fonction de la fréquence de résonance f_0 pour différentes constantes d'amortissement τ (tau) de la pièce. Voir aussi Table 1.

Table 1 - Amplification de la puissance entrante pour les fréquences d'excitation de 5 et 10 Hertz et dans une pièce de 50 mètres cube. Voir texte.

V [m^3]	S [m^2]	α [-]	τ [s]	dB , f= 5Hz	dB , f=10Hz
50	90	0.01	1.3	26	32
50	90	0.02	0.65	20	26
50	90	0.05	0.26	12	18

8. Niveaux infra-sonores possibles à l'intérieur d'une maison

Le niveau sonore potentiellement atteignable dans une maison est obtenu en additionnant le nombre de décibels calculés pour une résonance de Helmholtz (Sect. 7.2) aux niveaux sonores de la Fig. 2 mesurés pour différents sous-sols. Les résultats sont donnés dans les Figs. 5, 6 et 7 aux distances de 500, 1000 et 2000 m respectivement en fonction de la fréquence entre 1 et 10 Hertz. Les mesures de la Fig.2 sont données pour des fréquences entre 1 et 4.5 Hertz. Dans cette plage, deux références [8, 18] montrent un niveau de vibration à peu près constant, même s'il diffère fortement en valeur absolue entre deux sites. Ce niveau diminue ensuite régulièrement (10 dB de moins à 10 Hertz). Une fonction quadratique moyenne est ajustée aux données de [8, 18]. En fonction de la fréquence, le niveau sonore en dB à 5 Hertz est multiplié par

$$c(f) = 0.994 + 8.5 10^{-2} f - 2.5 10^{-2} f^2. \quad (8)$$

Finalement, le niveau sonore potentiellement atteignable dans une maison, suivant la puissance de l'onde de vibration du sol (Fig.2) et la force d'une résonance de Helmholtz (Table 1 et Fig. 4) sera en décibel $dB_{réf\ 1pW}$

$$dB(f) = c(f) \times dB_{sol} + dB_{Helmholtz}(f).$$	(9)

Les mesures retenues pour la Fig. 5 sont ici réduites à cinq d'entre elles. Fraureuth-Beiersdorf présente le plus bas niveau de vibration, Wiggensbach est un cas intermédiaire et Schwarmstedt présente le niveau le plus élevé, excepté à courte distance ou Heinde domine. Le cas d'une roche calcaire épaisse et affleurante (sol pauvre à moyenne altitude) présente un cas non-mesuré mais vraisemblable car estimé sur des bases mesurées, voir Sect. 6.1. Dans les figures pour 1000 et 2000 m seuls sont donnés Schwarmstedt et calcaire. Pour Wiggensbach, les données présentées dans [18] ne permettent pas d'extrapoler à ces distances. Fraureuth-Beiersdorf est marginal dans le cadre de ce travail centré sur le cas suisse, même s'il représente le cas de beaucoup de parcs dans des régions à dominante de sol sableux, sédimentaire ou de moraines glaciaires non-durcies) en couche épaisse (plusieurs centaines de mètres). Ce dernier cas est peu présent dans les régions d'intérêt éolien en Suisse. Pour rendre visible les gros écarts de niveau infra-sonore possibles dans une maison, la résonance de Helmholtz la plus forte considérée ici (α = 0.01) est retenu pour Schwarmstedt et calcaire dans les Figs. 5,6 et 7. Et aucun facteur de résonance n'est appliquée à Fraureuth-Beiersdorf. Le point "Crichton" donne le dérisoire niveau infra-sonore appliqué à une très maladroite expérience de laboratoire, voir Sect.11.

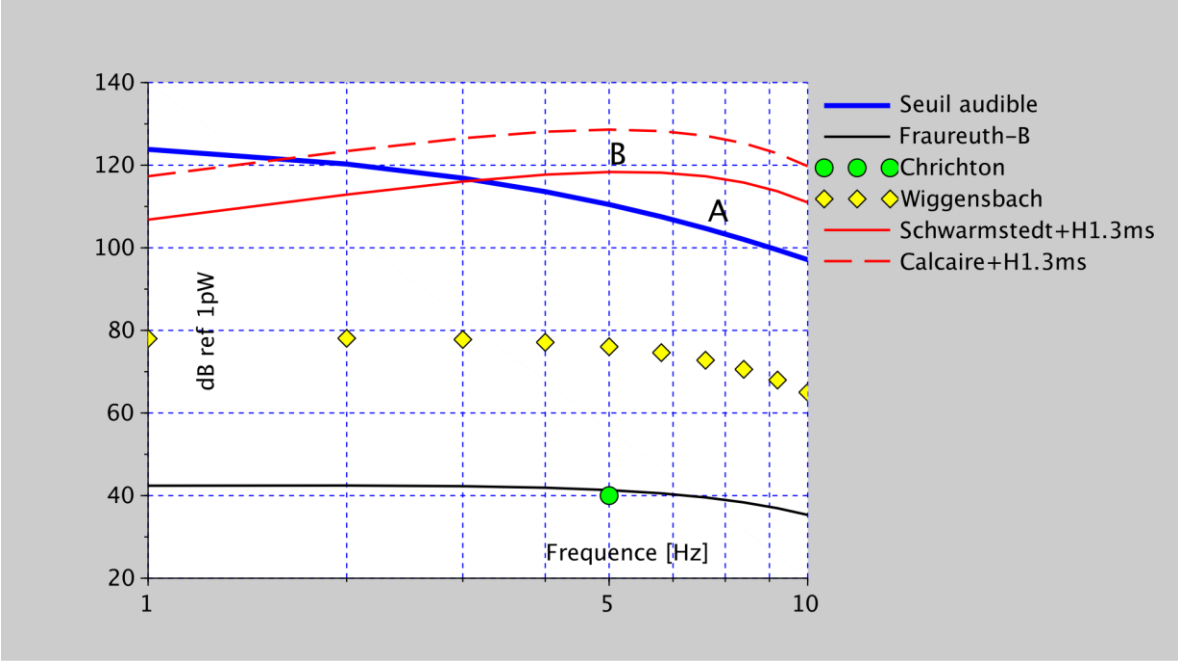


Figure 5 – Niveau de puissance acoustique sonore entre 1 et 10 Hertz produit par des vibrations du sol à 500 m de la source pour plusieurs types de sous-sol. Le niveau sonore est amplifié par une résonance de Helmholtz pour "Schwarmstedt" et "calcaire" seulement, voir texte, et comparé au seuil audible selon Møller et Pedersen [4].

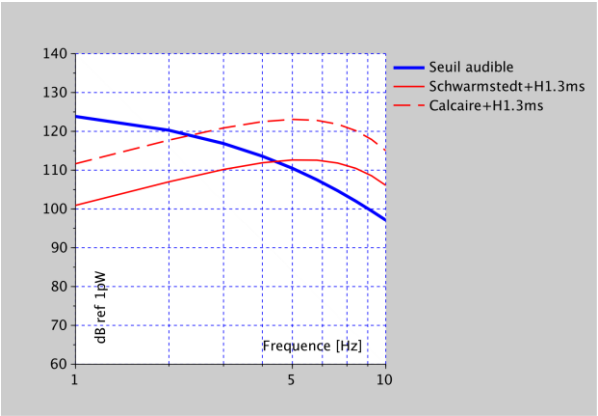


Figure 6 – Comme ci-dessus, à 1000 m.

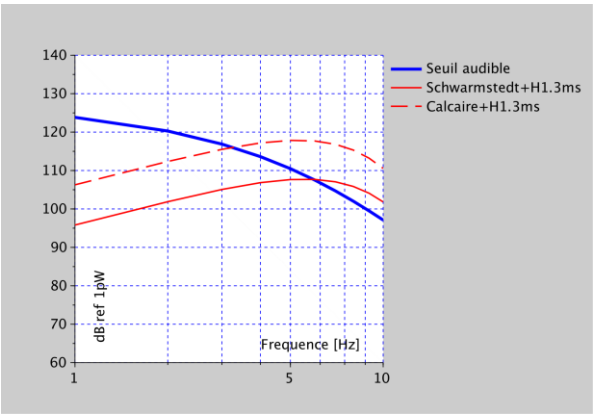


Figure 7 – Comme ci-dessus, à 2000 m.

8.1 Discussion des résultats avec résonance de Helmholtz

En présence de résonance de Helmholtz, sur le site de Schwarmstedt le seuil audible d'infrasons peut être atteint dès 3 Hertz et le dépasse de 15 dB de 7 à 10 Hertz à 500m (Fig. 5, zone A).

Si l'on considère une région au sous-sol calcaire, les dépassements de seuil audible sont très élevés, de plus de 20 dB entre 5 et 10 Hertz à 500 m de distance, et encore de 10 dB à 2000 m (Fig. 5, zone A et Fig. 7). Rappelons que toutes ces valeurs sont données pour une machine éolienne de 3 MW. Les niveaux infra- sonores augmentent

— au moins linéairement et proportionnellement avec la puissance de la machine. L'étude [23] montre que la croissance est plus rapide pour la bande de fréquence 10-160 Hertz.

— avec en moyenne la racine carrée du nombre de machines. Pour 4 machines la puissance de vibration double, il faut ajouter 3dB au niveau infra-sonore, et donc au dépassement du seuil audible. Pour 16 machines, il faut ajouter 6dB.

On peut encore noter que le seuil audible varie d'une personne à l'autre dans un intervalle de plus ou moins 5 dB (r.m.s et donc 60% des cas dans cette fourchette, et 40% à l'extérieur.),voir [4]. Et que le seuil sensible est inférieur de 3 dB au seuil audible. Ajoutons à ces variations auditives le fait que tous nos calculs sont relativement simples et donc entachés d'incertitudes auxquelles s'ajoutent celles des mesures sur lesquelles ils sont adossés.

9. Résultats sans résonance de Helmholtz

Les niveaux de vibrations atteignables sans résonance de Helmholtz sont présentés dans la Fig. 8a en regard de la Figure 5 extraite du rapport bavarois [18] (Fig. 8b).

Les mesures de Wiggensbach discutées dans l'étude bavaroise [18] montrent que le seuil audible est atteint vers 40 Hertz, malgré le faible niveau infra-sonore et sans résonance aggravante, voir Fig. 8b.

En suivant les remarques de la Sect. 8.1, et avec des parcs rarement prévus pour une seule ma- chine, des personnes sensibles peuvent percevoir des vibrations entre 10 et 20 Hertz dans la bande intermédiaire entre le cas mesuré du sous-sol de Schwarmstedt et un sous-sol calcaire même sans résonance de Helmholtz. En effet, la Fig. 8b montre qu'au-dessus de 12 Hertz la baisse d'intensité sonore amorcée à 5 Hertz se stabilise. De manière approximative, la courbe "Schwarmstedt" (Fig. 8a) croise le seuil de sensibilité (ou de perception) vers 15 Hertz. Pour la courbe "Calcaire" se sera près de 12 Hertz. Ceci est indicatif et mériterait plus de mesures. En particulier, il n'est pas possible de dire précisément ici en-dessous de quelle distance et au-dessus de quelle fréquence les vibrations dues à la transmission par le sol, dominantes à basse fréquence, sont relayées par les vibrations aériennes. Seules des mesures plus complètes permettraient de clarifier ces points, et demanderaient une connaissance adéquate du sous-sol.

10. L'étude bavaroise sur l'éolien et les infrasons

Suisse-Eole se réfère fréquemment à une étude bavaroise pour affirmer sans nuance que l'émission infrasonique des éoliennes ne provoque ni nuisances ni troubles de santé [18].

L'Office d'État bavarois pour la santé et la sécurité alimentaire a publié un rapport en 2014 conjointement avec L'Office d'État bavarois pour l'environnement. Il est traduit par l'office franco-allemand pour les énergies renouvelables en 2015 avec le titre "*Éoliennes : les infrasons portent-ils atteinte à notre santé ?* " [18]. La réponse est sans surprise rassurante : les infrasons des éoliennes ne sont ni perceptibles ni nocifs.

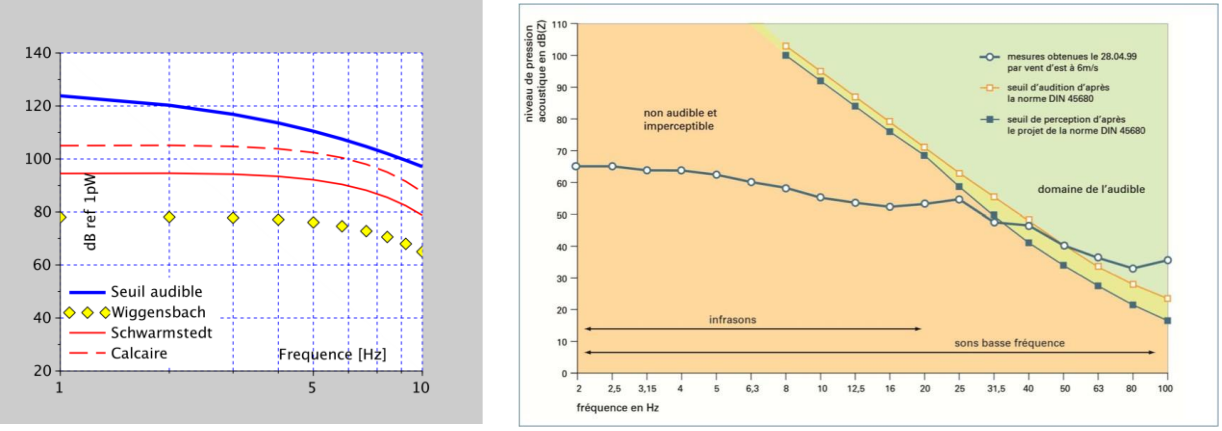


Figure 8 – a) A gauche : Intensité de vibration sonore à 500 m sans amplification par résonance. Les losanges jaunes "Wiggensbach" sont ceux de l'étude bavaroise pris dans la Figure de droite. Les courbes "Schwarmstedt" et surtout "Calcaire" extrapolées au-delà de 10 Hertz croiseront la courbe de seuil audible en dessous de la limite infrasonique de 20 Hertz, voir figure de droite et Sect. 9. b) A droite : Fig. 5 extraite du rapport bavarois [18]. Noter les différentes échelles verticales entre a) et b) et l'inhabituelle échelle horizontale de b).

Ces conclusions rassurantes se basent principalement sur des mesures faites à Wiggensbach près d'une petite éolienne Nordex54 (puissance de 1 MW, diamètre du rotor 54 m et hauteur du mât, non spécifiée ici, maximum 70 m). Pour une vitesse de vent 6m/s elle ne produit que 0.14/,MW pour un niveau d'infrasons de 65 dB(Z) (Z : non-pondéré, donc identique au dB utilisé ici) au- dessous de 5

Hertz à 250 m de la machine (voir la Figure 5 de ce rapport, reproduite ici dans la Fig. 8).

65 dB, c'est une intensité inférieure de plus de 40 dB à la limite audible. Ce parc ne peut évidemment pas perturber les habitants voisins avec une si petite puissance. Aucune indication sur la nature du sous-sol n'est donnée. On ne peut donc en rien généraliser une conclusion valable localement à d'autres parcs comme le fait le rapport bavarois [18].

Extrapolé linéairement à la puissance moyenne de production d'une machine de 3 MW (le standard minimum actuel des projets suisses), le niveau doit être augmenté de 13 dB, soit 78 dB. Cette valeur est reportée dans la Fig. 2 sous le nom "Wiggensbach". Elle apparaît aussi dans la Fig. 5.

1. Sur l'étude danoise de Møller et Pedersen

Le rapport bavarois [18] s'appuie aussi sur une publication danoise d'experts acousticiens, H. Møller et C.S. Pedersen, qui présentent une large étude sur le "Bruit à basse fréquence des grandes éoliennes" [23]. Mais il ne cite qu'un petit paragraphe des conclusions de la très bonne étude [23], le second des deux reproduits ci-dessous en italique (et qui se suivent dans le texte original - notre traduction, les passages soulignés en gras sont de notre fait) :

Le bruit à basse fréquence dans les maisons varie en fonction de l'éolienne, de l'isolation acoustique de la pièce et de la position dans la pièce. ***Si le bruit des grandes éoliennes faisant l'objet de l'enquête a un niveau de pression acoustique extérieur pondéré A de 44 dB, le maximum autorisé par la réglementation danoise sur le bruit des éoliennes, il y a un risque qu'une proportion considérable des résidents soit affectée par le bruit à basse fréquence, même à l'intérieur de la maison****. Le seuil soir/nuit danois de 20 DB pour le*

son pondéré A dans la gamme de fréquences 10-160 Hertz, qui s'applique au bruit industriel (mais pas aux éoliennes), sera dépassé dans de nombreux salons des bâtiments résidentiels adjacents, qui sont proches de la limite de 44 dB. ***Les problèmes sont considérablement réduits avec un seuil extérieur de 35 dB****.*

Les WTG (Wind Turbine Generator) émettent certes des infrasons (son inférieur à 20 Hertz), mais les niveaux sont faibles, compte tenu de la sensibilité des humains à ces fréquences. Même à proximité des éoliennes, le niveau de pression acoustique est bien inférieur au seuil d'audition normal, et les infrasons ne sont donc pas considérés comme un problème pour les éoliennes de même conception et de même taille que celles qui font l'objet de l'enquête.

On doit indiquer ici que contrairement à la Suisse, le Danemark a un sous-sol pratiquement intégralement constitué d'une couche de sédiments non-consolidés épaisse de plusieurs kilomètres [19], ce qui réduit fortement la propagation des vibrations infra-soniques dans le sol, i.e. au moins aussi bas que pour les sites "Virgo" et "Fraureuth-Beiersdorf", voir Fig. 2. Ceci explique encore mieux la partie 'infrasonique' des conclusions danoises [23].

Le second paragraphe doit évidemment être lu à la lumière du premier.

La législation suisse permet un niveau de bruit éolien près des habitations de 60 dBA le jour et 50 dBA la nuit. Au Danemark, c'était 44 dBA le jour en 2010, et les auteurs estiment que cette valeur est trop haute pour éviter des nuisances à basse fréquence (10-160 Hertz : donc partiellement dans le domaine infra-sonore), voir premier paragraphe ci-dessus. **Ils préconisent un seuil extérieur de 35 dBA le jour, à comparer donc à notre limite de 60 dBA, soit 25 dBA de moins qu'actuellement en Suisse**.

Avec une réduction de 25 dBA du niveau de jour qui s'appliquerait de facto physiquement aussi aux basses fréquences et aux infrasons, les conclusions pour la Suisse pourraient évidemment être bien différentes. Utiliser le petit paragraphe ci-dessus sur les infrasons de [23] sans citer le précédent n'est ni sérieux ni très honnête.

2. L'étude finlandaise sur l'éolien et les infrasons

Suisse-Eole se réfère aussi à une étude finlandaise qui conclut que les infrasons ne produisent pas de nuisances de santé [20, 21]. Cette étude plus extensive que celle l'étude bavaroise souffre néanmoins du même problème. Des enregistrements sur une large bande de fréquence ont été faits dans deux maisons inoccupées près d'un parc éolien. L'intensité infra-sonore ne dépasse pratiquement jamais 80 dB. Ces enregistrements sont utilisés ensuite en laboratoire et soumis à des personnes sur lesquelles des mesures physiologiques diverses sont effectuées. Mais les sons des enregistrements ne sont pas amplifiés et restent donc en-dessous du niveau audible ou même sensible (i.e. supérieur à 100-120 dB). Il n'est donc pas étonnant qu'aucun effet ne soit observé.

Le reste de l'étude consistait en l'envoi d'un grand nombre de questionnaires très détaillés dans la région du parc. L'éventail des questions porte sur le ressenti ou non de divers symptômes, et sur les convictions au sujet d'effets négatifs des infrasons. Il apparaît peu de corrélations notables.

Cependant, 25% des sondés qui habitent à moins de 2.5 km du parc se plaignent de nuisances sonores, pour seulement 5% jusqu'à 20 km. Par ailleurs, une fraction de ceux qui sont perturbés disent qu'ils pensent que les infrasons en sont la cause, ce qui est supposé montrer que la sensibilité aux infrasons est subjective. Cette interprétation est évidemment erronée. Le niveau d'infrasons étant dans cette région trop faible pour nuire, ceux qui invoquent cette raison se trompent. Mais ça ne prouve en rien que des intensités infra-soniques au-dessus du seuil sensible ne provoquent pas de perturbations. Cette étude comme celle de Crichton [24] - voir Sect. suivante- n'est pas concluante sur ce point, ou dit autrement, elle n'est valable que pour ce site précis.

De plus 2.5 km étant déjà bien éloigné, il serait intéressant de connaître la proportion de plaignants en dessous de 1 km.

11. L'étude néo-zélandaise sur l'influence sanitaire des infrasons et l'effet "nocebo".

Une publication néo-zélandaise basée sur une expérience de laboratoire met en avant des informations négatives données aux habitants voisins de parcs éoliens comme source subjective de leurs malaises [24].

Cette publication est commentée dans un rapport Académie de Médecine déjà cité [2],p.11, extrait :

- L'effet « nocebo »

Il s'agit de l'inverse de l'effet placebo, consistant en l'induction psychologique d'une douleur ou d'une doléance [34]. Cet effet semble bien pouvoir s'appliquer aux infrasons. Une récente étude

néozélandaise conduite en double aveugle a comparé les effets d'une exposition de 10 minutes soit à une stimulation placebo (c'est-à-dire au silence), soit à des infrasons, sur des sujets recevant préalablement une information soulignant soit les méfaits, soit l'innocuité de ces derniers. Seuls les sujets ayant reçu les informations négatives rapportèrent des symptômes, qu'ils aient été ou non soumis à l'exposition aux infrasons ! ! ! [34,36,37]. Cette expérience souligne le rôle éventuellement négatif de certains médias et autres réseaux sociaux.

En d'autres termes, la crainte de la nuisance sonore serait plus pathogène que la nuisance elle-même.

Si cet argumentaire semble clair et irréfutable, les publications sur lequel il s'appuie montrent autre chose [24, 25]. Dans le premier papier cité, 54 étudiants ont été divisés en 2 groupes. Une vidéo exposant les doléances de personnes souffrant des éoliennes est montrée au groupe A. Une autre vidéo présentait des experts expliquant scientifiquement que les éoliennes ne produisent pas de symptômes au groupe B. Chaque groupe est soumis à deux séances d'exposition de 10 minutes à des infrasons, une réelle, l'autre puissance coupée. Un questionnaire avec une liste des symptômes potentiels est soumis et une statistique des réponses est comparée entre les deux groupes. Surprise, si le groupe A déclare plus de ressentis que B, la différence n'est pas très élevée (+40%). Et curieusement, infrasons ou pas, les résultats ne changent presque pas et ce pour les deux groupes. Ces observations, clairement visibles dans les figures de [24], sont donc totalement déformées dans l'extrait de l'Académie reproduit ci-dessus, qui laisse croire que le groupe B n'a rien ressenti du tout.

Une explication se trouve dans le matériel d'expérience. La puissance sonore utilisée est de 40dB à 5Hertz, pour un seuil audible de 110 dB à cette fréquence. Il est difficile de comprendre comment une équipe universitaire peut se montrer aussi peu sérieuse. Si les participants ont réellement entendu quelque chose, ce sont des bruits parasites à plus haute fréquence. Ajoutons que le haut-parleur utilisé à une courbe de réponse plate dans la plage audible jusqu'à 30 Hertz, puis perd rapidement du rendement avec -16 dB perdu à 10 Hertz en milieu ouvert [17]. Ce sera donc pire à 5Hertz en milieu fermé. Rien ne dit que même les faibles 40 dB revendiqués par les auteurs aient réellement été émis à ce niveau dans la pièce d'écoute. Cette expérience ne vaut donc rien en ce qui concerne l'éolien et les infrasons.

Les auteurs sont d'ailleurs peu à l'aise dans leurs conclusions, et émettent quelques doutes (notre traduction) :

Il convient de noter que les mesures des symptômes auto-rapportées étant implicitement sub- jectives, il n'est pas possible de conclure de manière décisive que les attentes en matière de symptômes conduisent à une augmentation des symptômes plutôt qu'à une simple augmentation du nombre de symptômes rapportés.

Il est également important d'ajouter que l'exposition aux infrasons dans une salle d'écoute construite spécialement pour les expériences sonores [réd. - sonore : fréquences plus grandes que 20 Hertz] *peut ne pas être directement comparable à l'exposition aux infrasons d'un parc éolien.*

Cette expérience ne fait qu'indiquer la possibilité que les attentes en matière de symptômes, créées par des informations facilement accessibles aux personnes vivant à proximité des parcs éoliens, soient une voie possible pour l'attribution de symptômes aux infrasons générés par les éoliennes.

On ne peut qu'être d'accord avec la première phrase : les étudiants-cobayes des deux groupes se sont montrés bons élèves. Cette expérience concerne cependant uniquement l'autosuggestion et non les éoliennes et les infrasons. Il est inutile d'ajouter que cette publication néo-zélandaise a été abondamment utilisée par les milieux éoliens.

Avec le paragraphe rapporté plus haut, un membre de la respectable Académie de Médecine ne se montre guère meilleur que les "... médias et autres réseaux sociaux qui ont un rôle éventuellement négatif" qu'il évoque dans l'extrait ci-dessus.

Ce point mis à part, il faut relever le sérieux et la prudence du rapport de l'académie.

11.1. Sur les recommandations de l'Académie de Médecine

Par ailleurs, il faut noter que dans ses conclusions, l'Académie se montre sévère pour le secteur de bruit audible (p.19) et propose:
... *-de revenir pour ce qui concerne leur bruit (et tout en laissant les éoliennes sous le régime des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) au décret du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits du voisinage (relevant du code de Santé publique et non de celui de l'Environnement),* ***ramenant le seuil de déclenchement des mesures d'émergence à 30 dB A à l'extérieur des habitations et à 25 à l'intérieur****,*

- *d'entreprendre, comme recommandé dans le précédent rapport, une étude épidémiologique prospective sur les nuisances sanitaires.*

La recommandation sur le bruit est ici la même que celle des experts danois [23], voir Sect. 10.

12. Conclusions

A. La majorité des études sur l'impact sanitaire des infrasons émis par les éoliennes ne considèrent que les émissions aériennes, et concluent qu'aucun problème sanitaire ne se pose.

B. Or, des mesures d'ondes de vibration du sol (ou ondes sismiques) faites par des géologues dans le voisinage de plusieurs parcs éoliens montrent que des intensités importantes se propagent loin des machines. Convertis en dB sonores acoustiques, les niveaux d'intensité sont très élevés dans le voisinage de certains parcs, et parfois proches du seuil sensible. D'un parc à un autre, les intensités montrent une très forte variabilité .

C. A ces niveaux de vibrations peuvent s'ajouter des effets de résonance dans les bâtiments avec pour résultat des intensités sonores supérieures au niveau de perception etauditif.

D. Dans des maisons à 500 m de distance d'une machine de 3 MW, la combinaison des deux phénomènes B et C peut induire des niveaux infrasonores entre 120 dB pour un cas mesuré et 130 dB pour un sous-sol rocheux bien formé, pour un seul audible entre 100 et 110 dB suivant la fréquence , voir Fig. 5.

E. Les niveaux sonores sont les plus élevés dans les régions caractérisées par un sous-sol dur (par ex. calcaire) avec une faible couverture meuble en surface. A notre connaissance aucune mesure n'a été faite dans de telles régions.

F. Les études existantes (Bavière, Finlande) souvent citées, et qui concluent à l'absence d'impact des infrasons, se basent chacune sur des mesures faites sur un seul parc éolien ou les intensités observées sont faibles, très loin du seuil audible ou sensible. Ces études ne valent donc que pour le site où elles ont été faites.

G. Les études que nous rapportons ici montrent une cohérence et une solidité qui font de nos conclusions plus qu'une simple hypothèse. Une mesure sur un site problématique permettra de confirmer, ou non, les présentes conclusions.

H. Il serait donc bien que des sites potentiellement identifiés pour des nuisances infrasonores fortes soient l'objet d'une campagne de mesures vibratoires dans le sol à plusieurs positions et que des mesures infrasonores et vibratoires soient faites conjointement dans des habitations problématiques. Ce travail devrait être accompagné d'une description du sous-sol régional.

I. Il nous parait aussi important que chaque projet de parc éolien soit l'objet d'une évaluation géologique, pour avoir un indice sur les impacts infrasonores possibles.

J. On note finalement qu'indépendamment de leurs conclusions sur les infrasons, l'Académie française de médecine et des experts danois [2, 23], voir les extraits dans les Sects. 11.1 et 10.1, émettent la même recommandation sur les sons de basse fréquence (10-160 Hertz selon [23], et donc partiellement dans le domaine infrasonore) : le seuil légal à ne pas dépasser de jour devrait être de 35 dB(A). En suisse, cette même limite est fixée à 60 dB(A).

K. Avec 25 dB(A) de moins sur tout le spectre sonore et infrasonore, le problème des infrasons sur les sites problématiques serait probablement résolu.

La présente étude apporte des éléments nouveaux qui nous semblent nécessiter une prise en compte par l'OFEV.

Remerciements

L'auteur tient à remercier Christine Lavanchy qui lui a signalé l'article de R. Vinokur sur la résonance de Helmholtz dans une habitation. Il a aussi bénéficié d'éclaircissements de la part du Prof. Gilberto Saccorotti (Istituto Nazionale di Geofisica Pisa) et du Dr. Hortencia Flores (Univ. Leipzig et TU Berlin) sur les techniques de mesures des vibrations sismiques et le calcul de leurs intensités.

Références

1. https://www.parlament.ch/fr/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20133113
2. Patrice Tran-Ba-Huy et coll., Nuisances sanitaires des éoliennes terrestres, Académie Natio- nale de Médecine, Paris, mai 2017.
3. S. Adikhari and S. Bhattacharya, Vibrations of wind-turbines considering soil-structure interaction, Wind and Structures, Vol 14, No.2 (2011) 85-112.
4. H. Moller and C. S. Pedersen, Hearing at Low and Infrasonic Frequencies, Noise & Health 2004, 6 ;23, 37-57.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_wave
6. L. Schoeffel et J.P. Schoeffel, Ondes de Rayleigh , Orsay. Article théorique. http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php ?ID_fiche=4760
7. G. Saccorroti et al., Seismic Noise by Wind Farms : a case study from the Virgo Gravitational Wave

Observatory,
Bull. of the Seismological Soc. of America, Vol 101, p. 568, April 2011.

8. C. Pilger and L. Ceranna, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) , Han- nover Germany, The influence of periodic windturbine noise on infrasound array measure- ments, Journal of Sound and Vibration 388(2017)188–200
9. H. Flores Estrella, M. Korn and K. Alberts, Analysis of the Influence of Wind Turbine Noise on Seismic Recordings at Two Wind Parks in Germany, Journal of Geosciences and Environment Protection, 2017, 5, 76-91.
10. H. Flores Estrella, M. Korn, E. Sondermayer and K. Schering, Windkraftanlagen und seis- mische Stationen : Eine offene Diskussion – derzeitiger Stand in Sachsen, Deutsche Geophy- sikalische Gesellschaft e.V., DGG-Mitteilungen 2/2017.
11. R. Vinokur, Infrasonic sound pressure in dwellings at the Helmholtz resonance actuated by environmental noise and vibration, Applied Acoustics 65 (2004) 143–151.
12. https://fr.wikipedia.org/wiki/Résonance_de_Helmholtz
13. https://en.wikipedia.org/wiki/Vessel_flute
14. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ocarina
15. http://www.edu.upmc.fr/uel/physique/syst_oscillants/apprendre/gpb.osc.fa.301.a2/content/access.htm
16. https ://energieplus-lesite.be/theories/acoustique10/elements-theoriques-de-base/
17. https://www.fullcompass.com/common/files/2701-HRS150Manual.pdf, p.16-17.
18. Etude Bavaroise , rechercher : suisse eole infrasons et sante
19. https ://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_Denmark
20. https ://www.suisse-eole.ch/fr/news/, article daté 20.08.2020
21. http ://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162329/VNTEAS_2020_34.pdf ?sequence=1&isAllowed=y
22. https:/www.thewindpower.net/turbine_en_306_nordex_n54-1000.php
23. H. Møller and C. S. Pedersen, Tieffrequenter Lärm von großen Winkraftanlagen, Abteilung für Akustik, Aalborg Universitet 2010,
https://unsersattelberg.files.wordpress.com/2011/06/tieffrequenter_larm_von_grossen_windkraftanlagen-1.pdf
24. F. Crichton et al., Can Expectations Produce Symptoms From Infrasound Associated With Wind Turbines ? Health Psychology, 33(4) · March 2013.
25. F. Crichton et K.J. Petrie, Health complaints and windturbines : The efficacy of explaining the nocebo response to reduce symptom reporting, Environmental Research140(2015)449–455.