Emissions sonores des grandes éoliennes et distance aux habitations

J-B. Jeanneret, Dr.Sc. Phys.*

15 Août 2023

Abstract

La dimension grandissante des machines éoliennes augmente leurs émissions sonores plus rapidement que leur puissance électrique et déplace leur spectre d'émission sonore vers les basses fréquences. Dans certaines conditions, il s'y conjugue une décroissance du niveau sonore avec la distance plus faible que celle retenue habituellement. Ces effets sont discutés et l'impact sur le niveau des immissions est quantifié. Il est montré que le respect des valeurs limites d'immission implique des distances aux habitations plus élevées que le standard indicatif toujours actuel d'environs 300 m en Suisse.

1 Résumé et conclusions

Le but du présent rapport est d'assembler les connaissances et les données sur les phénomènes qui régissent la propagation du son produit par les parcs éoliens. Il en est déduit des distances minimales indicatives à respecter entre éoliennes et habitations qui satisfont aux normes de l'Ordonnance fédérale sur la protection contre le bruit (OPB) [1].

Les normes et recommandations utilisées jusqu'à aujourd'hui pour le traitement des nuisances sonores éoliennes ne sont pas très bien adaptées à l'augmentation de taille et de puissance des éoliennes. Un document de l'EMPA [2] traite spécifiquement des éoliennes. Publié en 2010, ses exemples traitent de rotors de 50 m de diamètre ou moins, et de hauteurs maximales de 100 m. Les basses fréquences sont brièvement discutées comme une source éventuelle de nuisance (p.35). La norme générale ISO-9613-2 [3] date de 1996 et traite d'émissions sonores de machines et d'usines, donc moins hautes que des éoliennes. Cette dernière norme est présentement mise à jour et publiée dans une version préliminaire [4]. Elle présente une annexe spécifique à l'éolien (annexe D). Elle modifie en particulier un paramètre lié à l'effet de sol, à intégrer à la paramétrisation en section 7.3 de [4]. D'autres points impliquent aussi des changements à prendre en considération. Ils sont discutés plus bas dans les sections spécifiques.

Aujourd'hui les projets de parc éolien envisagent l'installation de machines hautes de 200 à 250 m, avec des axes de rotor à 150 m ou plus. Les conséquences sont multiples et convergent vers un potentiel de nuisance augmenté en lien en particulier avec les basses fréquences.

- La puissance sonore totale d'une machine augmente un plus vite que sa puissance électrique.
- La vitesse de rotation des éoliennes est limitée par la vitesse de déplacement de l'extrémité des pales. Un plus grand diamètre de rotor implique alors une réduction proportionnelle de la vitesse de rotation. Le spectre sonore subit donc un déplacement vers les basses fréquences.
- Il en résulte par exemple une augmentation de 5 dB du niveau sonore dans le bas du spectre pour une puissance éolienne qui change de 2.5 MW à 5 MW, voir Fig 6.
- L'absorption atmosphérique de la puissance sonore est très faible aux basses fréquences (Sect. 4.9). La persistance élevée de ces fréquences à plus grande distance accentue le décalage du spectre sonore vers les basses fréquences aux lieux d'immission.
- La plus grande hauteur des machines les met en visibilité directe des habitations sur de plus grandes surfaces. L'atténuation de l'impact sonore par le relief diminue.

Un phénomène, connu et documenté depuis longtemps, est systématiquement ignoré, tout au moins en Suisse. À cause de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur au sol, la vitesse effective du son par rapport au sol augmente avec la hauteur. Dans certaines conditions le son est rabattu vers le sol et la décroissance du niveau sonore avec la distance est modifiée. Ce phénomène est décrit et référencé dans la Sect. 4.8.

- La décroissance du niveau sonore avec l'inverse du carré de la distance est alors modifiée.
- La loi de décroissance avec la distance varie selon l'état de l'atmosphère (variations de température avec la hauteur, turbulences).
- A proximité de l'axe du vent et du côté 'sous le vent', la décroissance du niveau sonore avec la distance est souvent plus lente. Elle peut donc gêner plus loin.
- Il n'est donc pas possible de définir une simple et unique loi de décroissance du niveau sonore avec la distance. Il n'est possible de définir qu'une plage de distances limites à respecter, dont la limite supérieure ne peut être précisée que dans la cadre d'une l'étude

*jbernard.jeanneret@icloud.com

de projet concret pour chaque machine.

Un dernier facteur doit être considéré:

- L'isolation phonique des habitations diminue aux basses fréquences, voir Fig. 4.
- En lien avec l'augmentation de la puissance sonore aux basses fréquences des grandes machines récentes, la valeur limite d'immission (extérieure) de l'OPB [1] pourrait perdre de sa pertinence pour l'intérieur des habitations de construction pas très récente. Une discussion détaillée et chiffrée se trouve en Section 3.4.

Aucun des points listés ci-dessus n'est nouveau. Il sont cependant rarement tous mentionnés dans les études de nuisances sonores d'un parc éolien, et parfois certains sont à l'évidence ignorés. Ici, tous ces effets sont intégrés et traités simultanément, en restant au plus près des normes et spécifications, et sans faire de simplifications de calcul qui peuvent occulter par exemple des corrélations entre deux effets.

Tous ces aspects sont décrits et quantifiés plus bas. Ils permettent de calculer les distances nécessaires pour respecter les valeurs limites d'immission de nuit, VLI = 50 dBA en DSIII et VLI = 45 dBA en DSII selon OPB [1], voir Sects. 3.2, 3.3 et Table 1. Les indications de distances minimales aux habitations sont données ici pour une éolienne isolée et pour un parc générique de 7 machines distantes les unes des autres de 700 m, et pour deux puissances de machines:

Norme sonore OPB, limite nocturne de planification :
Zone DSIII : VLI = 50 dBA
Zone DSII : VLI = 45 dBA

Puissance	P = 3.2 MW	P = 4.2 MW
DSIII	*Machine isolée*	
Hors axe des vents	550 ±50 m*	640 ±60 m
Dans l'axe des vents	550-640 m	640-780 m
DSII	*Machine isolée*	
Hors axe des vents	890 m	1050 m
Dans l'axe des vents	890-1200 m	1050-1400 m
DSIII	*Parc de 7 machines*	
Hors axe des vents	870 ±120 m	1080 ±150 m
Dans l'axe des vents	870-1100 m	1080-1380 m
DSII	*Parc de 7 machines*	
Hors axe des vents	1600 m	1900 m
Dans l'axe des vents	1600-2050 m	1900-2500 m

* distance et sensibilité à ±1 dB

Les distances limites à respecter pour un parc de plusieurs machines ne peuvent ni être fixées pour un cas général ni évaluées avec une précision de quelques mètres. Une simulation doit être faite pour chaque projet de parc. A défaut, des marges suffisamment larges devraient être prises. Les chiffres proposés ci-dessus approchent les larges marges de distance imposées dans plusieurs pays.

2 Introduction

Les émissions sonores produites par les parcs éoliens induisent des nuisances dont se plaignent les riverains à des distances auxquelles, selon les partisans de cette forme de production électrique, il ne peut pas y avoir de gêne.

Les infrasons sont fréquemment mis en cause par les riverains et les opposants aux éoliennes. Ondes sonores identiques aux sons audibles courants mais de très basses fréquences, inférieures à 20 Hz, ils sont émis à de trop faibles puissances par les éoliennes pour être à l'origine de la gêne ressentie. Le sujet est discuté et référencé dans la Sect. 5.

Les gênes ressenties par certains riverains ne peuvent cependant pas être ignorées. L'impact du domaine des basses fréquences est rarement considéré en dépit d'une présence solide dans la littérature scientifique en ce qui concerne l'éolien. Les basses fréquences sont définies par la bande de fréquence comprise entre la limite supérieure des infrasons, 20 Hz, et 200 Hz.

Dans une revue extensive publiée en 2020 par l'office fédéral suisse de l'environnement (OFEV), Van Kamp et van den Berg [5] abordent la contribution des sons de basse fréquence à la gêne sonore un peu marginalement et ne sont pas quantitatifs. Dans leur synthèse (p.3) ils écrivent : *L'étude bibliographique a clairement montré que la gêne est une conséquence du son: plus le son des éoliennes est fort (en dB), plus la réaction de gêne est forte. La littérature ne montre pas que ce que l'on appelle les "sons de basse fréquence" (sons graves) entraînent une gêne supplémentaire par rapport aux sons "normaux".* Même si elle est correcte sur la nature du son, cette conclusion occulte ce qui apparait plus loin dans le résumé, p.13 de [5]: *Les sons et les infrasons acoustiques de basse fréquence diffèrent des sons de haute fréquence: en raison de la faible atténuation* [atmosphérique], *les sons de basse fréquence gagnent relativement en importance à grande distance et à l'intérieur des habitations*. Et encore p.56: *Lorsqu'on est exposé à des infrasons ou à des sons de très basse fréquence, on ressent une vibration dans le corps ou la tête à des niveaux sonores proches ou supérieurs au seuil d'audition. À des niveaux similaires ou supérieurs, le son est jugé moins agréable, soit en raison de son intensité, soit en raison de la vibration supplémentaire, soit les deux. Il a également été constaté qu'un son de basse fréquence était moins agréable lorsque le son à une oreille différait quelque peu du son à l'autre oreille. Pour les sons de basse fréquence, ce phénomène est plus susceptible de se produire à l'intérieur qu'à l'extérieur.*

Ces deux derniers extraits imposent de chercher des informations plus complètes et plus quantitatives.

Moller and Pedersen [6] ont publié en 2011 une étude exhaustive de l'émission sonore et de sa propagation sur tout le spectre de fréquence audible des éoliennes, basée sur une large campagne de mesures faites sur le terrain par un bureau spécialisé sur commande de l'état danois. Cette étude, qui s'appuie sur une abondante bibliographie (84 références) présente une analyse chiffrée et une méthode assez complète pour permettre de l'adapter à un contexte moins général. Elle montre que le niveau sonore audible (dBA) émis par une éolienne augmente plus rapidement que la puissance électrique des machines. De plus cette augmentation apparait essentiellement aux basses fréquences. Ce fait est confirmé en particulier par van den Berg [7]. Les origines de cette augmentation sont présentées dans la section 4, en particulier Sect. 4.3, et ses conséquences dans la section 3.

L'étude [6] cite aussi plusieurs auteurs qui ont analysé des données ou produit des approches théoriques qui montrent que, dans certaines conditions, la décroissance géométrique du niveau sonore avec la distance est plus faible que la dépendance à l'inverse du carré de la distance habituellement seule considérée. Ce fait combiné avec la plus faible absorption atmosphérique du son aux basses fréquences permet à cette fraction du spectre de se propager loin à des niveaux sonores élevés. Hubbard et Shepperd ont publié un résumé très clair du phénomène dans [8] p.431-436, de même que l'EMPA [2]. Le phénomène apparait aussi, un peu marginalement mais explicitement, dans la spécification ISO/DIS-9613-2 [4]. Le sujet est discuté plus en détail dans la Sect. 4.8.

Finalement, le coefficient d'isolation des habitations est moindre aux basses fréquences [5, 6]. Ce coefficient est prescrit en Suisse par la norme SIA pour les nouvelles constructions [9]. Il est montré qu'il ne correspond pas nécessairement à l'état d'isolation des bâtiments de construction ancienne (Sects. 3.4 et 4.10). Et donc que la norme OPB de protection contre le bruit [1] peut être trop optimiste pour protéger l'intérieur des bâtiments en zone rurale, là ou sont projetés la majorité des parcs éoliens.

But du rapport Le but du présent rapport est de quantifier l'impact des faits et des observations énumérées ci-dessus en terme de distances minimales à respecter entre éoliennes et habitations pour satisfaire aux normes de l'OPB.

Structure du texte Un résumé et les conclusions sont présentés dans la section 1. Dans l'espoir de simplifier la lecture, tous les aspects techniques sont présentés dans la section 4: normes légales et spécifications (Sects. 4.1 et 4.4), puissance sonore (Sect. 4.2) et puissance spectrale de référence (Sect. 4.3), niveau sonore en fonction de la distance (Sects. 4.6 et 4.7), décroissance et absorption atmosphérique du niveau sonore (Sects. 4.8 et 4.9) et finalement niveau sonore dans les habitations (Sect. 4.10).

Les données de la section 4 sont utilisées dans la section 3 pour calculer les distances minimales entre éoliennes et habitations qui sont nécessaires pour respecter les normes de protection contre le bruit. Un résumé des plages de distances à respecter est exposé dans la section 3.5 pour une machine isolée et pour un parc générique de taille moyenne.

3 Respect des limites de nuisance et distance aux habitations

Pour un parc éolien dont le modèle de machine est choisi, la seule possibilité de respecter les limites d'immission sonore est d'observer des distances adéquates aux habitations. Les calculs trop simples, faits uniquement avec une propagation du son en émission isotrope, dite émission sphérique ou 3-dimensions (3D) et une absorption atmosphérique moyenne sur le spectre de fréquence qui permet de traiter la propagation du seul du niveau sonore intégré en fréquence conduit à des résultats trop optimistes.

L'approche plus complète de Moller and Pedersen [6] est utilisée comme base de calcul. Elle est présentée dans la Sect. 4 et ses sous-sections. Pour une éolienne de puissance électrique nominale P_E et de puissance moyenne en production $P(v_{\text{moyen}} = 5.5\,\text{m/s})$ - voir Sect. 4.2 - elle consiste à utiliser le spectre d'émission en dBA des machines divisé en tiers d'octave $dL'_{\text{WA}}(f_i)$ avec f_i la fréquence de tiers d'octave (Sect 4.7).

Ensuite, chaque élément dL' est propagé séparément à des distances d croissantes. La propagation est faite avec les formules (18,19 et 20), voir Sect. 4.8 où les variantes du facteur de décroissance géométrique avec la distance $A_{\text{geom}}(d)$ sont discutées.

En résumé de la Sect. 4, voir l'Eq. (17) augmentée ici d'un facteur de marge m (voir Sect. 3.1), le niveau sonore par tiers d'octave à la distance d est donné par

$$dL(f_i, d) = dL'_{\text{WA}}(f_i) - 2 + m + K_B(f_i) - \alpha(f_i)d - A_{\text{geom}}(d)\,. \quad (1)$$

Cette formule suit la norme ISO [4]. Seuls les facteurs K de l'OPB [1] y sont ajoutés, voir Sect. 4.7. A chaque position d, le niveau sonore total pour une machine est calculé en additionnant les intensités sonores partielles correspondantes aux $dL(f_i, d)$ de l'Eq. (1) avec la formule

$$L(d) = 10\log_{10}\sum_i 10^{dL(f_i,d)/10}\,. \quad (2)$$

La distance d acceptable entre éolienne et habitation est celle à laquelle le niveau sonore résiduel $L(d)$ est égale à la valeur limite d'immission VLI, voir Sect. 4.1.

3.1 Facteur de marge

Pour le calcul de niveau sonore en fonction de la distance source-habitation, l'EMPA [2] propose un facteur de marge

$$m = (m_{\text{simul}} + m_{\text{source}})^{1/2} = 4\,\text{dB} \qquad (3)$$

qui combine quadratiquement les incertitudes liées aux hypothèses de calcul, $m_{\text{simul}} = +3\,\text{dB}$, et celle liées à la valeur d'émission de l'éolienne, m_{source}. Par soustraction quadratique: $m_{\text{source}} = (m^2 - m^2_{\text{simul}})^{1/2} = 2.65\,\text{dB}$. Une valeur proche, mesurée, de 2.8 dB est donnée par [6], voir ici Fig. 5 et Sect. 4.2. Cette dernière valeur définit une marge qui contient pratiquement toutes les valeurs mesurées.

Pour les incertitudes de simulation, le présent calcul de décroissance géométrique avec la distance sera discuté en tenant compte séparement des modes plus sévères que le mode de base "3D" (Sect. 4.8). Ces modes contribuent probablement à m_{simul} quand ils sont ignorés. L'erreur de simulation qui leur est associée est donc réduite spécifiquement pour eux à $m_{\text{simul}} = 1\,\text{dB}$. Avec l'addition quadratique

$$m = \sqrt{1 + m^2_{\text{source}}} = 3\,\text{dB}\,. \qquad (4)$$

Pour tenir compte aussi du léger doute lié au niveau sonore source plus faible proposée par Enercon que celle déduite des mesures par Moller and Pedersen [6], voir Sect. 4.2, l'annulation $m_{\text{source}} = 0$ donne $m = m_{\text{simul}} = 3\,\text{dB}$, comme ci-dessus.

Finalement, la norme ISO mise à jour spécifie elle aussi $m_{\text{simul}} = 3\,\text{dB}$ comme EMPA, voir [4]-Table 4. Il est précisé que cette marge d'erreur est minimale. Il y est aussi spécifié dans sa Sect.9 que l'erreur associée à la source n'y est pas incluse.

3.2 Niveau sonore et distance à une éolienne

Le résultat de l'application des Eqs. (1 et 2) - voir aussi Sect. 4.8 - pour une machine de puissance $P = 3.2\,\text{MW}$ pour les trois formes de décroissance géométrique $A_{\text{geom}}(d)$ est donné graphiquement dans la Fig. 1. La puissance sonore de référence à l'émission de la machine est donnée dans la Table 6. Les distances au-delà desquelles le niveau sonore est inférieur à la valeur limite d'immission nocture VLI = 50 dBA (DSIII) et 45 dBA (DSII) pour les puissances $P = 3.2$ et 4.2 MW sont données dans la Table 1.

Dans le cas dominant d'une émission sonore isotrope (3D, décroissance du niveau sonore de -6dB par doublement de d), la distance minimale à respecter est $d = 550\,\text{m}$ pour une machine de puissance $P = 3.2\,\text{MW}$ et 640 m pour $P = 4.2\,\text{MW}$ avec la marge nominale $m = 4\,\text{dB}$. Avec une marge optimiste (m=3 dB), $d = 500$ et 560 m respectivement.

Mais il faut considérer les cas moins optimistes, en particulier quand le point d'immission (habitation ou localité) est situé sous le vent (i.e. quand le vent traverse l'éolienne avant d'atteindre le point d'immission). Dans cette configuration, qui peut être fréquente si l'habitation est, typiquement, au nord-est d'une éolienne - le vent d'ouest/sud-ouest est dominant - le son est rabattu vers le sol, et la décroissance

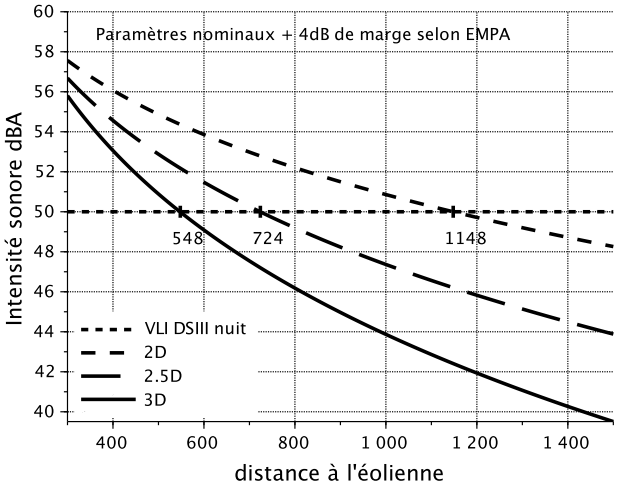

Figure 1: *Niveau sonore $L(d)$ en fonction de la distance d à une machine de puissance $P = 3.2\,MW$.*

avec la distance d est plus faible. Ce phénomène dépend principalement de la variation de vitesse du vent avec la hauteur au sol, mais les conditions n'y sont pas toujours favorables (sensibilité au taux de turbulences, au gradient thermique entre autres). Une discussion est donnée dans la Sect. 4.8 avec plusieurs références. L'installation du régime à la décroissance la plus lente régime (cylindrique - 2D, décroissance du niveau sonore de -3dB par doublement de d)) sera donc relativement rare. C'est pourquoi un cas intermédiaire noté 2.5D (décroissance du niveau sonore de -4.5dB par doublement de la distance d) est considéré ici. Il n'est pas possible de définir précisément des temps de présence relatifs de ces différents modes de propagation. A supposer qu'on puisse être précis, un calcul particulier devrait être fait pour le relief environnant d'une éolienne, et aussi pour différentes positions angulaires des habitations dans son voisinage par rapport à l'axe des vents dominants.

Pour un cas générique, il faut donc s'en tenir à des intervalles de distance acceptables, choisis ici entre les limites de VLI dans les deux modes 3D (avec $m = 4$) et 2.5D (avec $m = 3$, voir Sect. 3.1). Pour une machine de puissance $P = 3.2\,\text{MW}$, ce sera donc en DSIII une distance minimale $d = [550\,\text{m}..640\,\text{m}]$ et avec $P = 4.2\,\text{MW}$, $d = [640\,\text{m}..780\,\text{m}]$. La distance supérieure devrait être retenue pour les habitations situées à proximité de l'axe principal des vents. La distance inférieure, celle du cas 3D discutée en début de section, s'appliquerait indicativement à $\pm 45^0$ de l'axe des vents dominants (voir Spera [8] p.418-419) et au-delà. Ceci sous réserve de moments particuliers ou une propagation '2D' sera présente, et où la limite VLI sera dépassée jusqu'à 1000 m. ou plus. Dans la Table 1, les limites des intervalles de distance données ci-dessus sont les valeurs marquées d'une étoile (*).

En zone DSII il faut ajouter 300 m (3.2 MW) et 400 m (4.2 MW) aux limites inférieures en DSIII.

Table 1: *Distances minimales pour respecter la valeur limite d'immission nocturnes VLI = 50dB en DSIII et VLI = 45dB en DSII selon OPB dans le cas d'une éolienne isolée (en haut) et d'un parc de sept machines (en bas). Voir Sect. 3.3 pour la discussion, Sect. 4.8 pour les types de propagation géométrique et Sect. 3.1 pour le facteur de marge m repris des recommendations de l'EMPA [2] et ISO [4]. Les distances marquées d'une étoile (*) sont reprises dans les conclusions, Sect. 1. Les distances pour une marge m=2, trop optimiste, sont données à titre indicatif.*

	1 machine											
	3.2 MW						4.2 MW					
	DSIII			DSII			DSIII			DSII		
Marge	3D	2.5D	2D	3D	2.5D	2D	3D	2.5D	2D	3D	2.5D	2D
m=4	550*	720	1150	890*	1320	2380	640*	880	1450	1050*	1590	2980
m=3	495	640*	980	815	1176*	2078	580	780*	1270	950	1420*	2610
m=2	450	560	830	740	1050	1800	530	690	1080	860	1270	2280
	7 machines distantes de a = 700 m entre elles											
	3.2 MW						4.2 MW					
	DSIII			DSII			DSIII			DSII		
Marge	3D	3/2.5D	3/2D	3D	3/2.5D	3/2D	3D	3/2.5D	3/2D	3D	3/2.5D	3/2D
m=4	870*	1260	2215	1610*	2300	4240	1080*	1560	2800	1920*	2770	5220
m=3	760	1100*	1920	1440	2070*	3750	950	1380*	2440	1730	2490*	4640
m=2	650	950	1650	1280	1840	3300	830	1200	2110	1550	2230	4100

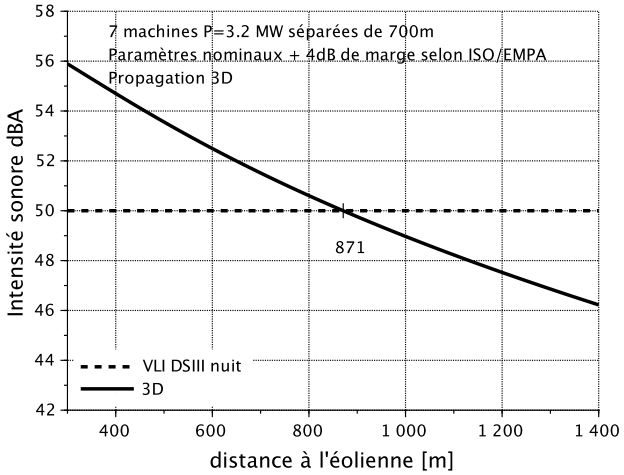

Figure 2: *Niveau sonore en fonction de la distance d à un parc de sept machines selon la Fig 3, avec la distance a = 700 m. La propagation du niveau sonore est en 3D. Voir texte Sect 3.3.*

3.3 Niveau sonore et distance à un parc de plusieurs éoliennes.

Définir un cas générique de parc éolien n'est pas possible. Entre la topographie du site d'installation, le nombre de machines et leurs positions, ainsi que la position des habitations, la variété de configurations possibles est trop étendue.

On s'en tiendra donc ici au seul cas d'un parc de taille moyenne, composé de sept machines. Le calcul de distances minimales est fait pour un point d'immission situé le long de l'axe central du parc. La Fig. 3 donne la disposition des machines et du point d'immission. Les calculs sont faits pour la distance entre machines $a = 700$ m. Trois cas sont considérés, voir Table 1:

1. l'émission des sept machines est isotrope (3D)
2. L'émission des trois machines 2, 5 et 6 est de type 2.5D, les quatre autres de type 3D (3/2.5D).
3. L'émission des trois machines 2, 5 et 6 est de type 2D, les quatre autres de type 3D (3/2D).

Le point d'immission ne peut pas être 'sous le vent' de toutes les sept machines. Seules trois d'entre elles sont donc considérés dans cette condition dans les cas 2) et 3). L'émission sonore des machines n'est pas cohérente entre elles: les machines tournent rarement à même vitesse, ni à fortiori en phase. Dans ce cas de superposition incohérente du bruit, les puissances sonores ($\sim 10^{dL/10}$) des machines s'additionnent linéairement pour chaque tiers

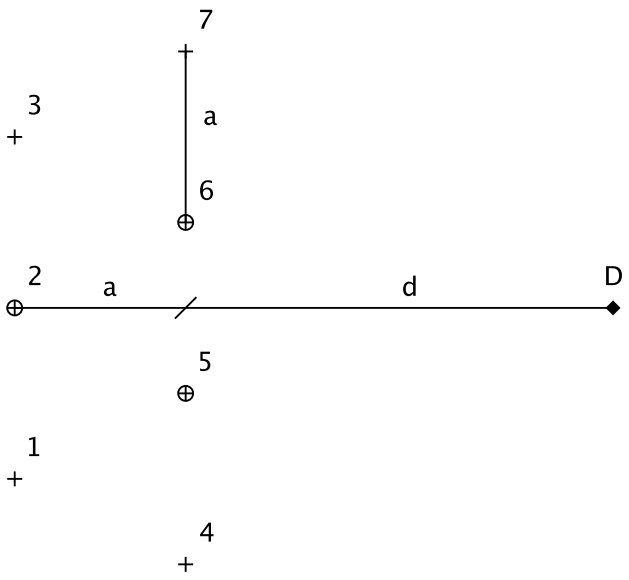

Figure 3: *Un parc de sept machines (+), numérotées de 1 à 7, et un point d'immission D à distance d de la ligne de front du parc. Les machines sont distantes de a dans une même rangée. Les rangées sont aussi distantes de a. Les trois machines 2, 5 et 6 (⊕) seront traitées différemment des autres dans certaines conditions de propagation sonores. Voir texte.*

d'octave, après propagation au point d'immission :

$$dL(f_i, d) = 10 \log_{10} \sum_{j=1}^{7} 10^{dL_j(f_i,d_j)/10} \quad (5)$$

$$L(d) = 10 \log_{10} \sum_{i} 10^{dL(f_i,d)/10} . \quad (6)$$

les $dL(f_i, d_j)$ étant calculés avec l'Eq. (1), où d_j est la distance du point D à la machine j. Les distances minimales nécessaires pour respecter une VLI = 50 dBA (DSIII) et 45 dBA (DSII) sont données dans la Table 1.

On note que la distance minimale donnée dans la Table 1 n'est pas celle à la plus proche machine, mais une valeur plus faible, qui est la plus courte distance d à la ligne de front des machines (Fig. 3). C'est un définition arbitraire sans incidence pratique, choisie pour être la plus simple. Il suffit d'être cohérent dans la définition et les calculs pour s'assurer qu'au point D on obtient VLI= 50 dBA.

Tous les points discutés dans la Sect. 3.2 s'appliquent ici aussi.

De la Table 1 et en considérant les modes de propagation 3D ($m = 4$, nominal) et mixte 2.5/3D ($m = 3$), les distances minimales loin de l'axe principal du côté sous le vent sont 870 m et 1080 m pour $P = 3.2$ MW et $P = 4.2$ MW respectivement. Elles sont de même comprises dans les marges [870 m..1100 m] et [1080 m..1380 m] dans le secteur de $\pm 45^0$ de part et d'autre de l'axe des vents, voir Sect. 3.2.

La Table 1 indique qu'avec la marge optimiste $m = 3$ dBA (voir Sect. 3.1) et dans le cas 3D, la distance minimale est diminuée de 100 m pour $P = 3.2$ MW et de 130 m pour $P = 4.2$ MW.

En zone DSII il faut ajouter 700 m (3.2 MW) et 800 m (4.2 MW) aux limites DSIII.

Un tableau récapitulatif est donné en Sect 1, voir aussi Sect 3.5.

3.4 Niveau sonore à l'intérieur des habitations.

Dans cette section, il est montré que pour certains type de bâtiments touchés par le bruit des éoliennes, le respect de la norme OPB-DSIII ne suffit pas à protéger correctement les habitants la nuit. En particulier dans le régions rurales, où les maisons anciennes sont fortement présentes, la norme DSII serait plus adéquate.

Le niveau sonore moyen à l'intérieur d'une habitation est déterminé par la différence entre le niveau sonore extérieur (dBA) et le coefficient d'isolation de l'habitation D_e en dB. Ce dernier coefficient est discuté dans la Sect. 4.10 et reproduit dans la Fig. 4 pour une valeur constante $D_e = 22$ dB en dessus de 250 Hz, mais variable aux plus basses fréquences. Les niveaux d'immission extérieur et intérieur en fonction de la fréquence sont donnés pour le parc de 7 machines de $P = 3.2$ MW à la distance $d = 870$ m où le niveau sonore extérieur est tombé à la limite VLI = 50 dBA, voir Figs. 2 et 3. La propagation du niveau sonore est en 3D.

A l'émission, la présence relative des basses fréquences émises augmente avec la puissance des machines, voir Sect. 4.3 et Fig. 6. Elle est augmentée au point d'immission à cause de leur plus faible absorption dans l'air (Sect. 4.9).

Cette prédominance est encore accentuée à l'intérieur des habitations à cause de l'affaiblissement du coefficient d'isolation aux basses fréquences (courbe rouge interrompue de la Fig. 4). Cette figure montre que la fréquence $f = 80$ Hz est ici dominante.

Les niveaux sonores intérieurs intégrés sont donnés aussi pour les parties basse (BF, $f < 200$ Hz) et haute fréquence (HF, $f > 200$ Hz) dans la Table 2, pour une fonction de propagation 3D et pour les niveaux sonores extérieurs VLI = 50 dBA (DSIII pour $D_e = 22$ dB 'SIA faible') et VLI = 45 dBA (DSII pour deux coefficients d'isolation $D_e = 22$ et 15 dB 'M&P'). Les résultats montrent une relative stabilité du niveau intérieur avec la puissance des machines (+0,5 dB pour $L_{\mathrm{Int,Tot}}$ et $L_{\mathrm{Int,BF}}$).

Le point important est le niveau sonore intérieur attendu quand le niveau extérieur est à la limite nocturne VLI = 50 dBA en DSIII. La discussion qui suit se réfère à la Table 3. Tous les chiffres donnés dans cette section s'appliquent au parc de 7 machines décrit dans la section 3.3 et en mode de propagation géométrique 3D.

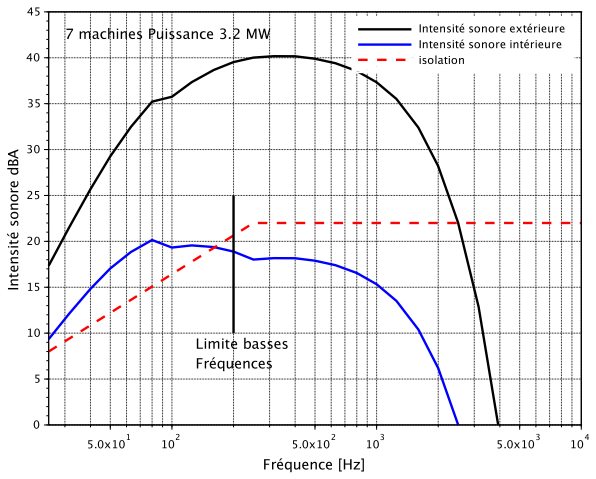

Figure 4: *Niveau sonore en fonction de la fréquence à un parc de sept machines selon la Fig 3, avec la distance entre machines $a = 700\,m$ et à la distance $d = 870\,m$ ou le niveau sonore extérieur est égal à la limite VLI = 50 dBA, voir Fig 2. Le niveau sonore intérieur (courbe inférieure bleue) est donnée par la différence entre le niveau extérieur (courbe noire) et la fonction d'absorption de l'habitation (courbe rouge interrompue). La puissance des machines est $P = 3.2\,MW$, et la propagation géométrique du son est de type 3D.*

Table 2: *Niveau sonore extérieure et intérieure des habitations à la distance d à laquelle la valeur limite d'immission VLI = 50 dBA (DSIII) et 45 dBA (DSII) est respectée pour un parc de 7 machines selon la Fig 3, avec la distance entre machines $a = 700\,m$. La propagation du niveau sonore est ici en géométrie 3D.*

	D_e [dBA]	d [m]	L_{ext} [dBA]	$L_{interieur}$ Total	BF	HF
3D , $P = 3.2$ MW						
DSIII	22	870	50	30.2	28.0	26.3
DSIII	15	870	50	36	32.5	33
DSII	22	1610	45	25.5	24.0	21.0
DSII	15	1610	45	31.0	28.1	27.9
3D , $P = 4.2$ MW						
DSIII	22	1080	50	30.5	28.6	26.1
DSIII	15	1080	50	36	33	33
DSII	22	1920	45	26.0	24.5	20.5
DSII	15	1920	45	31.2	28.6	27.6

L'OMS, et tout au moins la Suède et le Danemark recommandent ou fixent légalement des valeurs basses pour le niveau sonore physique, mais sans l'équivalent des facteurs de corrections $K_T = K_1 + K_2 + K_3 = 9$ comme dans l'OPB, voir Sect. 4.4. Pour faciliter les comparaisons, la Table 3 donne la valeur limite L_{ext} de l'OPB [1] pour la Suisse (lignes 1-10) et la valeur physique 'nue' L_0 pour les lignes a-c, additionnée de K_T pour obtenir une valeur L_{ext}.

Des données de mesures analysées, accompagnées de sondages de ressenti d'habitants, Moller and Pedersen [6] concluent que le niveau sonore acceptable de nuit pour les basses fréquences devrait être fixé à $L_{0,\text{BF}} = 20\,\text{dBA}$, soit $L_{\text{int,BF}} = 29\,\text{dBA}$ selon les normes OPB [1]. Avec les niveaux moyens d'isolation mesurés qui étaient à leur disposition, ils concluent ensuite que le niveau sonore extérieure acceptable de nuit ne devraient pas dépasser 35 dBA, valeur fixée légalement par la Suède et, pour la nuit, par le Danemark. Cette valeur est similaire aussi à la limite recommandée par l'OMS-2018 [10]. Ce document recommande un niveau $L_{\text{den}} = 45\,\text{dBA}$ défini par

$$L_{\text{den}} = 10\log_{10}\left[\frac{12}{24}\,10^{\frac{L_{\text{jour}}}{10}} + \frac{4}{24}\,10^{\frac{(L_{\text{soir}}+5)}{10}} + \frac{8}{24}\,10^{\frac{L_{\text{nuit}}+10}{10}}\right]. \quad (7)$$

Si l'on maintient 10 dB d'écart entre jour et nuit, la formule (7) implique $L_0 = L_{\text{nuit}} = 35\,\text{dBA}$.

La valeur $L_0 = 35\,\text{dBA}$ des lignes a, b et c (M&P, S+DK, OMS) de la Table 3, est une limite de niveau moyenne qui, corrigée de $K_T = 9$, fixerait la valeur limite extérieure de nuit à 44 dBA au lieu de 50 dBA selon OPB [1].

Les résultats donnés dans la Table 3 montrent qu'il faut être un peu plus nuancé. Si l'on admet que l'on ne dort pas dehors, il faut discuter les niveaux sonores intérieurs L_{int} et en particulier le niveau basse-fréquence $L_{\text{int,BF}}$ qui est plus critique pour être prédominant avec des éoliennes de puissance supérieures à $P = 2.5\,\text{MW}$, voir Table 2 et Sect. 4.3.

Les cas 1 et 2 de la Table 3 sont basés sur la valeur limite d'immission VLI = 50 dBA en DSIII et pour les deux coefficients D_e de SIA tenus constants sur tout le spectre de fréquence audible, soit $D_e = 27\,\text{dB}$ pour les pièces d'habitations (isolation 'moyenne') et $D_e = 22\,\text{dB}$ ('faible' pour les autres pièces), voir Sect. 4.10. Dans les habitations de construction récente qui respectent les normes SIA [9] les niveaux intérieurs (18 et 23 dB) satisfont le critères: $L_{\text{int,BF}} < 29\,\text{dBA}$. Un cas intermédiaire, où D_e augmente linéairement jusqu'à 250 Hz puis reste constant à $D_e = 22$ (simulation du présent travail, voir Table 2 et Fig. 4) montre que la limite intérieure de 29 dBA est marginalement respectée (lignes 3 et 5). Pour la variation de la fonction

Table 3: *Limite de niveaux sonores légaux ou acceptables pour la nuit, extérieures et intérieures. La Suisse définit des limites VLI élevées mais avec les facteurs de correction K_1, K_2 et K_3 [1]. Ce n'est pas le cas des pays scandinaves et de l'OMS-Europe[10], qui n'ont pas de tels facteurs et fixent une valeur limite nue notée ici L_0. Moller and Pedersen [6] s'intéressent surtout à la limite du niveau sonore intérieur acceptable pour la bande des basses fréquences (BF). Les valeurs L_{int} sont calculées avec les normes SIA [9] constantes en fonction de la fréquence (lignes 1 et 2), variables selon les données de la Fig. 4 (lignes 3, 5, 7, et 9) ou selon Moller and Pedersen [6] (lignes 4, 6, 8, et 10). Les valeurs données dans les trois dernières colonnes sont obtenues avec une décroissance de l'intensité sonore 3D (Eq. 18). Voir texte Sect. 3.4*

Unités : dBA	L_0	K_T	L_{ext}	D_e	L_{int}	$L_{\text{int,BF}}$	$L_{\text{int,HF}}$
a- Moller & Pedersen	35	+9	44	-15	?	**29**	?
b - Suède/Danemark	35	+9	44				
c - OMS-EU	35	+9	44				Voir texte
DSIII et P=3.2 MW							
1 - SIA modéré, D_e constant			50	-27	23	18	21
2 - SIA faible, D_e constant			50	-22	28	23	26
3 - SIA faible + D_e(BF) variable			50	-22	**30**	**28**	**26.5**
4 - Moller et Pedersen			50	-15	**36**	**32.5**	**33**
DSIII et P=4.2 MW							
5 - SIA faible + $D_e(BF)$ variable			50	-22	**30.5**	**28.5**	**26**
6 - Moller et Pedersen			50	-15	**36**	**33**	**33**
DSII et P=3.2 MW							
7 - SIA faible + D_e(BF) variable			45	-22	**25.5**	**24.0**	**21.0**
8 - Moller et Pedersen			45	-15	**31.0**	**28**	**28**
DSII et P=4.2 MW							
9 - SIA faible + D_e(BF) variable			45	-22	**26**	**24.5**	**20.5**
10 - Moller et Pedersen			45	-15	**31.2**	**28.6**	**27.6**

Table 4: *Distances minimales aux habitations pour respecter la valeur limite d'immission de nuit VLI = 50dB en DSIII et VLI = 50dB en DSII au stade de planification selon OPB dans le cas d'une éolienne isolée (haut de la table), et pour un parc générique de 7 machines distantes les unes des autres de a = 700 m (bas de la table), et pour deux puissances de machines avec la marge recommandée par l'EMPA (Sect. 3.1)*

Puissance	P = 3.2 MW	P = 4.2 MW
DSIII	*Machine isolée*	
Hors axe des vents	550 ±50 m*	640 ±60 m
Dans l'axe des vents	550-640 m	640-780 m
DSII	*Machine isolée*	
Hors axe des vents	890 m	1050 m
Dans l'axe des vents	890-1200 m	1050-1400 m
DSIII	*Parc de 7 machines*	
Hors axe des vents	870 ±120 m	1080 ±150 m
Dans l'axe des vents	870-1100 m	1080-1380 m
DSII	*Parc de 7 machines*	
Hors axe des vents	1600 m	1900 m
Dans l'axe des vents	1600-2050 m	1900-2500 m

* distance et sensibilité à ±1 dB

$D_e(f)$, voir Sect. 3.4 et Eq. (22).

Mais si l'on considère le coefficient d'isolation de [6], variable jusqu'à 250 Hz et constant à $D_e = 15$ dB au-delà (ligne 4 et 6), le niveau $L_{\text{int,BF}} = 32.5$ et 33 dBA est trop élevé.

Le niveau moyen d'isolation des habitations existantes en zone rurale en Suisse ne nous est pas connu. De plus, les écarts à la moyenne sont certainement importants, en particulier en fonction de l'époque de construction et des variations de style et de matériaux suivant la région. Un niveau d'isolation faible comme celui observé dans [6] n'y est pas exclu. Toute la plage de valeurs entre $D_e = [15..22]$ doit y exister.

Pour une zone en DSII (ligne 7-10), toutes les variantes discutées ci-dessus respectent la la limite $L_{\text{int,BF}} < 29$ dBA. Mais en particulier pour une machine de puissance $P = 4.2$ MW, la valeur calculée, 28.6 dBA, reste proche de cette limite avec $D_e = 15$ dB.

Un seul exemple de parc est exploré ici. Des calculs similaires devraient être faits pour chaque projet de parc et pour chaque habitation en 'zone de risque'.

On peut donc conclure qu'une application aveugle de la norme OPB-DSIII n'est pas toujours adéquate, suivant le type de construction des habitations touchées par le bruit des éoliennes. A ce point il faut remarquer que la norme DSII est très adéquate et proche des spécifications et recommandations des trois lignes a, b et c de Moller and Pedersen [6], de l'OMS [10], de la Suède [11] et du Danemark (voir le commentaire de [6] p.3734 et refs).

3.5 Résumé pour les distance minimales.

Les chiffres des trois sections ci-dessus indiquent clairement que l'indication souvent avancée de distance minimale entre éolienne et habitation d'environs 300 m n'a aucune pertinence. Le nombre de machines et la position de habitations par rapport à l'axe des vents principaux, ainsi que la puissance nominale des machines ont un fort impact sur les distances minimales nécessaires. Comme on le voit dans les deux sections qui précédent, les distances minimales varient fortement selon qu'une machine isolée ou un parc de machines sont considérés et selon la position des habitations par rapport à l'axe principal des vents, dans le cas où il y en a un. Un résumé est donné dans la Table 4.

4 Formules de calcul et données

Les données physiques et les formules nécessaires à la construction des fonctions de décroissance de niveau sonore avec la distance utilisées plus haut sont discutées et référencées dans cette section.

Table 5: *Valeur limites de planification au bruit des machines éoliennes selon OPB.*

	DS II	DS III	
Nuit	45	50	dBA

4.1 Valeur limites d'exposition au bruit des machines éoliennes

Les valeurs limites d'exposition au bruit des machines éoliennes sont fixées dans l'ordonnance sur la protection contre le bruit OPB 814.4 [1]. Un complément d'information est donné dans [12]. Les éoliennes sont assimilées à des installations industrielles, voir [1] annexe 6, p34. Les valeurs limites à respecter sont simples et présentées dans la Table 5: les habitations exposées aux nuisances sonores d'un parc éolien se trouvent majoritairement en zone agricole et sont souvent classées en zone de sensibilité III. Une fraction est en zone II. Le éoliennes fonctionnent aléatoirement autant la nuit que le jour (ainsi que dimanches et jours fériés), il suffit donc de considérer les valeurs limites nocturnes. Ces habitations étant présentes avant l'installation d'éoliennes, les valeurs limites de planification s'appliquent. Les valeurs à respecter selon l'OPB [1] sont données dans la Table 5.

Il faut ajouter que "les immissions de bruit dues exclusivement à l'installation en cause ne dépassent pas les valeurs de planification" [1], Art.7, al.1b. Ce qui implique aussi que l'existence de bruit indépendante de la présence d'éoliennes ne permet pas de justifier un dépassement des normes pour ces dernières.

Notons encore que l'OPB précise, en son Art.1 al.3b, qu'elle "ne régit pas la protection contre les infrasons et les ultrasons" [1]. Le domaine des basses fréquences discuté ici n'entre donc pas dans le cadre de cette restriction et doit être considéré comme partie intégrante du spectre sonore dans le calcul du respect des valeurs limites d'immission.

4.2 Niveau sonore de référence L_{WA} à l'émission

Le puissance sonore d'une éolienne dépend principalement de sa puissance électrique. Aujourd'hui, la technologie est mature et stable. Les différences entre constructeurs sont faibles à même puissance.

La figure 13 de Moller and Pedersen [6] donne le niveau sonore de référence mesuré L_{WA} d'une éolienne à une vitesse de référence du vent $v_{\text{ref}} = 8$ m/s en fonction de la puissance électrique. Cette figure est reproduite ici (Fig. 5). La puissance sonore est déduite de mesures sur une large échantillon de machines.

L'ajustement linéaire des données de mesure en fonction du logarithme de la puissance électrique de référence des machines $P_{\text{ref}} = P(v_{\text{ref}})$ est donné dans [6] par

$$L_{\text{WA}}(v_{\text{ref}}) = 11.0 \log_{10} \frac{P_{\text{ref}}}{1\text{MW}} + 101.1 \text{ [dBA]}. \quad (8)$$

Table 6: *Puissance sonore effective de référence L_{WA} pour trois puissances électriques d'éoliennes. Valeur de catalogue (2022) pour des machines Enercon, comparées aux valeurs mesurées de [6] données par l'Equ. (8).*

Machine	L_{WA} Enercon, dBA		L_{WA} Moller et Pedersen , dBA		
	max	v=8 m/s	v=8 m/s	Δ_1	L'_{WA} , $v_m = 5.5\,\mathrm{m/s}$
E115 3.2 MW	105	104.5	106.7	-3.67	103.0
E138 4.2 MW	106	105.5	108	-3.47	104.4
E160 5.5 MW	107	106.5	108.7	-3.47	105.2

Le coefficient 11.0 qui multiplie le terme logarithmique implique que la puissance acoustique augmente suivant

$$p_{\mathrm{acoustique}} = \mathrm{cste} \times P_{\mathrm{ref}}^{1.1}\,, \tag{9}$$

et donc plus rapidement que la puissance des machines.

Le niveau sonore effectif L'_{WA} doit être ajusté à la distribution de vitesse de vent moyenne attendue pour un parc donné. Ici une vitesse moyenne générique $v_{\mathrm{m}} = 5.5\,\mathrm{m/s}$ est considérée. Dans l'ignorance de la variation exacte de la puissance sonore en fonction de la puissance de l'éolienne pour une vitesse donnée (fonction un peu différente pour chaque type de machine, rarement accessible publiquement), une approximation est utilisée. La réduction à la puissance sonore moyenne P_{m} pour une distribution de vitesse de vent de moyenne v_{m} est calculée avec

$$\Delta_1 = 10 \log_{10} \frac{P_{\mathrm{m}}}{P_{\mathrm{ref}}} \tag{10}$$

avec P_{ref} la puissance de référence (voir Eq. 8). La puissance moyenne est calculée avec la distribution de Weibull $f(v; v_{\mathrm{m}}, k)$ avec $k = 1.9$. La distribution f est normalisée:

$$\int_0^\infty f(v)dv = 1\,.$$

La puissance pour la distribution moyenne est obtenue avec

$$P_{\mathrm{m}} = \int_0^\infty P(v) f(v) dv\,. \tag{11}$$

Les coefficients d'ajustement sont calculés avec Eqs 10 et 11 : $\Delta_1 = -3.67, -3.47, -3.47$ dB pour respectivement $P_E = 3.2, 4.2, 5.5$ MW.

Le calcul de L'_{WA} avec une formule de l'EMPA [2] ajustée pour $P_{\mathrm{ref}} = 4.2$ MW dans un cas particulier de machine est le même que celui donné dans la Table 6 à moins de 0.2 dB. Un autre calcul obtenu avec les valeurs du niveau sonore $L(v_{\mathrm{vent}})$ publiés par un constructeur pour une machine récente de 3.4 MW donne lui aussi un résultat égal à la même précision. On peut donc estimer qu'une erreur inférieure à 0.5 dB s'applique au cas général. Cette erreur est à comparer avec la sensibilité des distances minimales au niveau sonore, voir Table 4. On peut proposer d'expliquer la bonne précision de l'Eq. (10) en supposant que la puissance moyenne contenue dans les turbulences produites par les pales est proportionnelle à la puissance

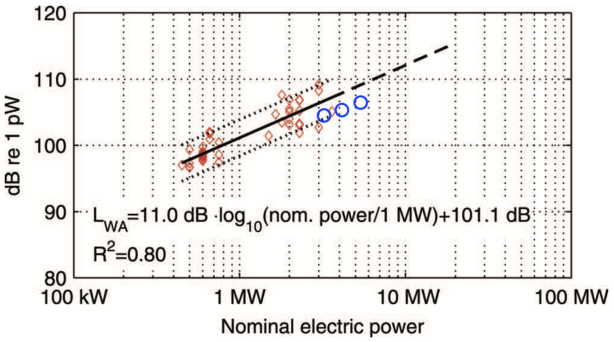

FIG. 13. (Color online) Apparent sound power level (L_{WA}) as a function of turbine size, four turbines below 450 kW excluded, wind speed 8 m/s. Linear regression line, standard error of estimates (s.e.e.) 1.64 dB. Extrapolation dashed, 90 % confidence intervals (dotted) based on s.e.e.

Figure 5: *Puissance sonore de référence L_{WA} à $v_{ref} = 8\,\mathrm{m/s}$. Les valeurs déduites des mesures sont données par les losanges rouges. Source: Moller and Pedersen [6], Fig.13. Les données liées aux trois cercles bleus y sont ajoutées et sont discutées dans le texte.*

mécanique soustraite au vent. Finalement, la puissance sonore effective de référence, à un mètre en avant de l'axe du rotor en direction du point d'immission pour la vitesse de vent moyenne $v_{\mathrm{m}} = 5.5\,\mathrm{m/s}$ est donnée par

$$L'_{\mathrm{WA}}(v_{\mathrm{m}}) = L_{\mathrm{WA}}(v_{\mathrm{ref}}) + \Delta_1\,. \tag{12}$$

Les résultats numériques sont donnés dans la Table 6.

Les valeurs L_{WA} du catalogue des machines Enercon ajustées à $v_{\mathrm{ref}} = 8\,\mathrm{m/s}$ sont ajoutées (cercles bleus) dans la figure 13 de [6], qui est reproduite ici dans la Fig. 5. Ces valeurs sont inférieures de plus de 2 dB à celles mesurées données dans Moller and Pedersen [6]. Deux explications peuvent être considérées :

- Les machines Enercon sont des modèles récents et bénéficient d'améliorations acoustiques, alors que les mesures traitées dans [6] sont faites sur des machines construites avant 2011.
- Les valeurs de catalogue, surtout pour des modèles de machines encore peu répandus, peuvent être délibérément données à la marge inférieure des tolérances de fabrication, tel que cela apparait dans la Fig. 5. Cette hypothèse est renforcée par la discussion de la section IV.B de Moller and Pedersen [6]. Il y est affirmé

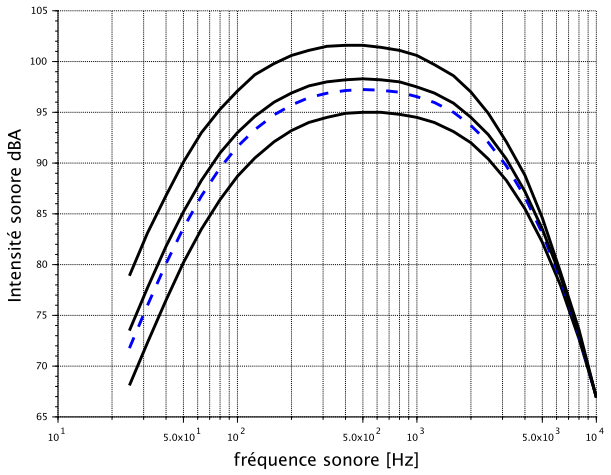

Figure 6: *Spectre de puissance sonore de référence par tiers d'octave à la vitesse de vent v_{ref} = 8 m/s. Par ordre croissant de puissance électrique des machines pour les courbes noires, 2.5 MW, 5 MW et 10 MW. Source: Table 3 de Moller and Pedersen [6], données reproduites ici dans la Table 7. Les données pour 4.2 MW (courbe bleue interrompue) sont interpolées, voir texte.*

> qu'une norme CEI impose aux fabricants de donner une valeur L_{WA} supérieure à la moyenne (+1.6 écart-type). Mais cette norme est rarement appliquée. Au contraire, il arrive souvent que la meilleure estimation (-1.6 écart-type) soit donnée.

Il ne nous est pas possible de trancher entre ces deux hypothèses, ceci même si la seconde hypothèse nous parait la plus probable. Dans son catalogue, Enercon par exemple, donne un seul chiffre pour le niveau sonore de référence et précise un peu curieusement par une note de bas page en petits caractères que cette valeur "dépend de la hauteur du mât", sans plus de détails.

Le présent travail est donc fait en retenant les valeurs de [6], mais la première hypothèse est tout de même présente dans les résultats des Sects. 3.2 et 3.3.

4.3 Spectre de puissance sonore de référence

Une paramétrisation du spectre de puissance sonore de référence à la vitesse de vent v_{ref} = 8 m/s des mesures utilisées par Moller and Pedersen [6] est discutée dans leur section G (p.3740). Les valeurs numériques de puissance sonore, $dL_{\mathrm{WA}}(f_i; P_E)$ en dBA par tiers d'octave f_i, sont données dans [6] Table III (p.3741) et reproduites ici dans la Table 7. Les spectres sont reproduits dans la Fig.6 (courbes noires) pour les puissances nominales de machines P_E = 2.5 MW, 5 MW et 10 MW. Le spectre pour une puissance électrique nominale intermédiaire P est obtenu par interpolation linéaire, ici entre 2.5 MW et 5 MW :

$$dL_{\mathrm{WA}}(f_i; P) = dL_{\mathrm{WA}}(f_i; 2.5\,\mathrm{MW}) + \left(dL_{\mathrm{WA}}(f_i; 5\,\mathrm{MW}) - dL_{\mathrm{WA}}(f_i; 2.5\,\mathrm{MW}) \right) \times \frac{P - 2.5\,\mathrm{MW}}{5\,\mathrm{MW} - 2.5\,\mathrm{MW}} \quad (13)$$

L'erreur d'interpolation est faible, $\simeq -0.2$ dB par défaut et dans la partie des basses fréquences. Le spectre pour P = 4.2 MW est donné par la courbe bleue interrompue de la Fig. 6.

Le point important ici est le glissement du spectre sonore vers les basses fréquences avec l'augmentation de puissance sonore liée à celle de la puissance des machines. Ce résultat est identique à celui obtenu par van den Berg et al. [7], voir aussi [6] Sect.IV-C.

4.4 Facteurs de correction pour la puissance sonore de référence

L'ordonnance fédérale sur la protection contre le bruit OPB [1] et une fiche de l'OFEV [12] fixent trois facteurs additifs de correction de niveau de la puissance sonore de référence, $K_1 = 5$ pour les installations industrielles, $K_2 = 0$ pour l'audibilité des composantes tonales et $K_3 = 4$ pour l'audibilité des composantes impulsives. Ces trois facteurs fixes sont assemblés plus bas sous la valeur

$$K_T = K_1 + K_2 + K_3 = 9 \quad (14)$$

4.5 Coefficient de réflexion du sol

Le coefficient K_B de réflexion du sol est partiellement redéfini dans la norme ISO/DIS 9613-2 récente [4]-Sect. 3.1. Il dépend de la fréquence sonore f. Il est fixé à $K_B(f)$ = +3 dB pour $f \leq 80$ Hz et pratiquement +1.5 dB pour $f \geq 100$ Hz pour des points d'émissions élevés. La dernière colonne de la Table 7 donne les valeurs précises de $K_B(f)$ par tiers d'octave.

4.6 Niveau sonore en fonction de la distance à une éolienne

Dans une approche simplifiée, indépendante de la fréquence, de la norme ISO [3] le niveau sonore audible (dBA) à la distance d d'une éolienne est donné par

$$L(d) = L'_{\mathrm{WA}} + K_T - 11 - \alpha d + K_B - A_{\mathrm{geom}}(d)\,, \quad (15)$$

avec ici $L'_{\mathrm{WA}} = L_{\mathrm{WA}}(v_m = 5.5\,\mathrm{m/s})$ - voir Eq. (12) et Table 6 - et $K_T = 9$ (Sect. 4.4, Eq. 14). La puissance de référence est normalisée pour un cône d'émission d'un stéradian. L'émission sonore de l'éolienne est approximativement isotrope, et diffuse (se dilue) donc dans 4π stéradians (émission sphérique). La puissance par stéradian est donc plus basse de $10 \log_{10}(1/4\pi) = -11.0$ dB [4].

Table 7: *Fréquences de tiers d'octave f, niveaux sonores par 1/3 d'octave $dL_{\mathrm{WA}}(f)$ reprises de [6] , voir Sect. 4.3 et absorption atmosphérique $\alpha(f)$ pour une température de 10°C (moyenne été/hiver), une humidité relative de 70% et une pression de 91.3 kPa correspondant à une altitude de 1000m, voir Sect. 4.9. Pour le coefficient $K_B(f)$ de réflexion du sol, voir Sect. 4.4.*

	dL_{WA} [dBA]			$\alpha \times 10^5$	K_B
f [Hz]	2.5MW	5MW	10MW	[m^{-1}]	[dB]
25	68.1	73.5	78.9	2	3
31,5	72.3	77.7	83.1	3.2	3
40	76.5	81.8	86.8	5.1	3
50	80.2	85.2	90.1	7.8	3
63	83.5	88.3	93.0	12.2	3
80	86.4	91.0	95.3	18.9	3
100	88.7	93.0	97.1	28	1.43
125	90.5	94.6	98.7	40.7	1.43
160	92.1	96.0	99.8	59.2	1.43
200	93.2	96.9	100.6	79.9	1.5
250	94.0	97.6	101.1	103	1.5
315	94.5	98.0	101.5	130	1.5
400	94.9	98.2	101.6	160	1.5
500	95.0	98.3	101.6	191	1.5
630	95.0	98.2	101.4	230	1.5
800	94.8	98.0	101.1	286	1.5
1000	94.5	97.5	100.6	361	1.5
1250	94.0	96.9	99.7	475	1.5
1600	93.1	95.9	98.6	673	1.5
2000	92.0	94.5	97.0	955	1.5
2500	90.4	92.8	94.9	1393	1.5
3150	88.3	90.4	92.1	2100	1.5
4000	85.5	87.2	88.8	3251	1.5
5000	82.2	83.5	84.6	4920	1.5
6300	78.0	78.9	79.3	7556	1.5
8000	72.7	73.2	73.6	11690	1.5
10000	67.0	66.9	66.9	17348	1.5
L_{WA}	105.5	108.8	112.1		

Le paramètre α dans Eq. (15) est l'absorption atmosphérique moyenne sur tout le spectre sonore audible, discuté dans la Sect. 4.9. Le coefficient lié à la réflexion du sol est ici tenu le plus souvent constant à la valeur $K_B = 1$. Le facteur de décroissance géométrique du niveau sonore est discuté dans la Sect. 4.8.

Cette approche indépendante de la fréquence, trop simple, reproduit mal la réalité. Le calcul dépendant de la fréquence est présentée dans la section suivante, Sect. 4.7.

4.7 Niveau sonore en fonction de la distance et de la fréquence

Dans l'Eq. (15), les facteurs K_B et α sont indépendants de la fréquence sonore, ce sont des valeurs moyennes. Mais K_B dépend de la fréquence et α en dépend fortement. L'usage de valeurs moyennes conduit à des erreurs non-négligeables dans le calcul des immissions. Ces deux facteurs deviennent donc $K_B(f_i)$ (Sect. 4.5) et $\alpha(f_i)$ (Sect. 4.9) avec f_i la fréquence, définie par la valeur centrale des bandes de fréquence de tiers d'octave (indice i) qui couvrent le spectre audible, voir Table 7. Le niveau sonore de référence pour une machine de puissance électrique P_E doit donc être défini par tiers d'octave, $dL_{\mathrm{WA}}(f_i; P_E, v_{\mathrm{ref}})$ selon l'Eq.13, Sect. 4.3 à la vitesse de référence $v_{\mathrm{ref}} = 8$ m/s.

Le niveau sonore $dL'_{\mathrm{WA}}(f_i)$ pour la vitesse moyenne $v_m = 5.5$ m/s est donné relativement au niveau sonore de référence $dL_{\mathrm{WA}}(f_i; v_{\mathrm{ref}})$, similairement à l'Eq.12 :

$$dL'_{\mathrm{WA}}(f_i) = dL_{\mathrm{WA}}(f_i; P_E, v_{\mathrm{ref}}) + \Delta_1 \,.$$

Le transport à la distance d est calculé en suivant la norme ISO [4]. Seul le facteurs K_T (Sect. 4.4) de l'OPB [1] est ajouté, voir Sect. 4.4.

$$dL(f_i, d) = dL'_{\mathrm{WA}}(f_i) + K_T - 11 + K_B(f_i) - \alpha(f_i)d - A_{\mathrm{geom}}(d) \,. \quad (16)$$

Et avec $K_T = 9$ (Eq. 14),

$$dL(f_i, d) = dL'_{\mathrm{WA}}(f_i) - 2 + K_B(f_i) - \alpha(f_i)d - A_{\mathrm{geom}}(d) \,. \quad (17)$$

Pour les autres facteurs:

- $K_B(f_i)$ est le coefficient de réflexion du son par le sol dépendant de la fréquence, Sect 4.5 et Table 7.
- $\alpha(f_i)$ est le coefficient d'absorption atmosphérique de la puissance dépendant de la fréquence, voir Sect. 4.9 et Table 7.
- $A_{\mathrm{geom}}(d)$ est un coefficient tenant compte de la décroissance géométrique du niveau sonore par tiers d'octave; dans nos calculs nous avons utilisé trois formules différentes pour $A_{\mathrm{geom}}(d)$ selon qu'il s'agisse d'une propagation 3D, 2D ou 2.5D, voir Sect. 4.8.

4.8 Décroissance géométrique du niveau sonore

En moyenne, dans une atmosphère homogène en température et avec un gradient de vitesse de vent faible en fonction de la hauteur, le son produit par l'éolienne se propage dans toutes les directions, horizontalement et verticalement. Dans ces conditions, la puissance sonore décroit avec le carré de la distance d. L'émission est dite 'sphérique' dans un espace à 3 dimensions (3D). Le niveau sonore baisse de -6 dB par doublement de la distance :

$$A_{\mathrm{geom,3D}}(d) = 20 \log_{10}(d/1m) \,. \quad (18)$$

Cette dépendance est celle qui est presque exclusivement utilisée. Mais, même si cette forme de propagation décrit

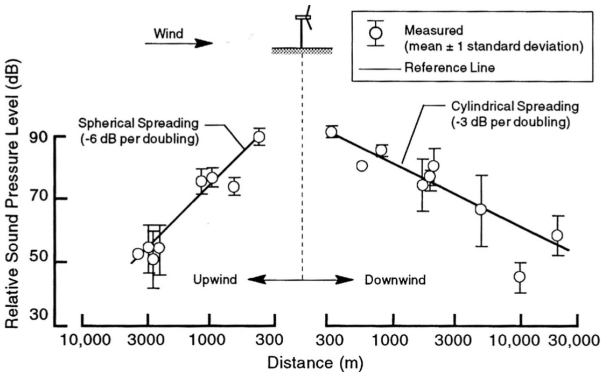

Figure 7-23. Measured effect of wind on the propagation of low-frequency rotational harmonic noise from a large-scale HAWT. (Harmonics with frequencies from 8 to 16 Hz, rotor diameter = 78.2 m) [Willshire and Zorumski 1987]

Figure 7: *Mesure de décroissance du niveau sonore à basse fréquence, en fonction de la distance. Emission d'une éolienne de 78 m de diamètre. A gauche: côté 'dans la vent'. A droite : côté 'sous le vent'. Noter la différence d'échelle horizontale entre les deux côtés. Source: Hubbard et Shepperd in [8], p.431, Figure 7-23.*

une large fraction du phénomène, elle n'est pas suffisante à elle seule. Moller and Pedersen [6] - Sect. H, p.3740, se réfèrent à plusieurs publications qui montrent que l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur, combinée ou non avec des variations de température avec la hauteur, confinent le son dans une couche d'air de hauteur en moyenne assez uniforme jusqu'à des distances importantes (de l'ordre du kilomètre) du côté 'sous le vent', i.e. quand le vent vient de l'éolienne en direction du point de mesure.

Hubbard et Shepperd exposent le phénomène de manière claire dans [8] - p.431. Une de leurs figures est reproduite ici (Fig. 7). Sous le vent, la propagation est approximativement de type 'cylindrique', elle se propage dans un espace à deux dimensions (2D, baisse du niveau sonore de -3dB par doublement de la distance). La mesure décrite dans Hubbard et Shepperd [8] est faite en terrain plat, ce qui est certainement une condition indispensable pour observer une régime de propagation 2D pur. Dans cette configuration, [6] indique une propagation sphérique jusqu'à 200m de la machine, et cylindrique au-delà quand l'atmosphère est à nouveau stratifiée après la zone perturbée:

$$A_{\text{geom,2D}}(d) = 20\log_{10}(200m/1m) + 10\log_{10}(200m/d)\,. \quad (19)$$

Le phénomène ci-dessus est explicitement décrit dans un rapport de l'EMPA [2], p.19 et suivantes, qui présente des résultats de simulation. La vitesse du son v_{son} est une caractéristique propre à l'atmosphère. Quand celle-ci se déplace à la vitesse v_{vent} par rapport au sol, la vitesse du son par rapport au sol est la somme des deux vitesses $v = v_{\text{son}} + v_{\text{vent}}$. A cause de l'augmentation de v_{vent} avec

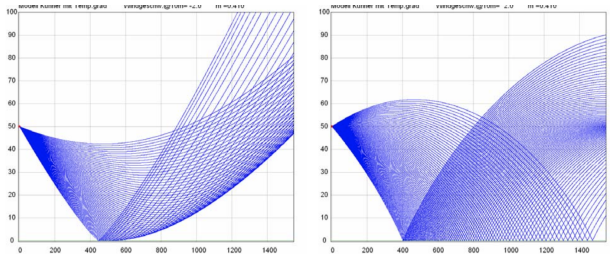

Abbildung 11: ray tracing Simulationen für die Situation nachts bei wolkenlosem Himmel und einer Windgeschwindigkeit von 2.0 m/s. Die linke Spalte zeigt den Gegenwindfall, die rechte Spalte den Mitwindfall.

Figure 8: *Trajectoires courbée du son. Simulation pour une vitesse de vent de 2.0 m/s à 10m de hauteur et une hauteur de rotor de 50m. Rugosité du sol non spécifiée. A gauche: côté 'dans la vent'. A droite : côté 'sous le vent'. Source: EMPA [2], Figure 10.*

la hauteur au sol, le front d'onde prend une trajectoire courbée en direction du sol du côté 'sous le vent'. L'effet inverse se produit du côté 'au vent'. Le phénomène est illustré par un résultat de simulation dans la Fig. 8 reprise de [2]. Du côté sous le vent (à droite de Fig. 8), le son est rabattu vers le sol sur une distance comprise entre indicativement 400 et 1400m. La fraction qui se perd en altitude est marginale. A l'inverse, du côté 'dans la vent' le son est envoyé en altitude, et atteint faiblement le sol. La vitesse du son est dépendante de la température, cette dernière variant souvent avec la hauteur au sol, en augmentation ou en diminution. Les deux effets, vent et température, doivent être additionnés. Parfois ils se renforcent, parfois ils se compensent.

Une publication de K. Bolin et al. [13] présente en détail une expérience très complète accompagnée d'un traitement théorique de propagation tenant compte des conditions atmosphériques en mer Baltique et sur une côte peu élevée. Il est montré qu'il est possible d'obtenir des résultats fiables et relativement précis avec des conditions atmosphériques compliquées et en présence de turbulences. La présence d'un régime de propagation cylindrique 2D y est explicitement observé.

La norme ISO/DIS-9613-2 [4] mentionne dans une note en p.10 la décroissance géométrique modifiée de -6dB à -3dB par doublement de distance au-dessus de l'eau (sans mentionner la même observation faite sur terre). Mais il est ajouté que par sa complexité, le phénomène est hors du champ d'application du document.

Le phénomène y est tout de même présent, sans lien explicite à cette note, dans la Fig.A1 p.29 où apparait un courbure des trajectoires sonores vers le bas, avec un rayon de courbure de 5000 m. Cette même courbure de 5000 m apparaît aussi dans l'annexe B1 p.34 avec le calcul de l'impact du bruit de cheminées industrielles élevées. Elle est utilisée pour calculer une correction à l'immission en fonction de la distance. Une corrélation à la vitesse du vent est indirectement présente dans la légende de la Table B1 p.35 avec l'indication $v \sim 3$ m/s. Cet effet n'est

autre que celui discuté plus haut ([8] - p.431, [2], [13]), d'autant qu'une dépendance à la condition sous le vent y est mentionnée.

Ce cas de propagation 2D ne permet pas un calcul d'impact direct et simple comme le cas 3D, à cause de sa directionnalité et de son intermittence en fonction du gradient de température et des autres conditions atmosphériques. De plus, en fonction du relief, le gradient vertical de vitesse de vent n'a pas toujours la régularité qui permet l'installation d'un régime 2D strict. Mais le gradient vertical de vitesse est plus élevé dans une région au sol accidenté, ce qui augmente l'effet et compense la dilution dues aux turbulences. Il doit donc être pris en compte avec précaution. Il devrait certainement être simulé de manière aussi exhaustive que possible de cas en cas. Sinon des hypothèses conservatoires doivent être considérées.

Pour tenir compte des conditions aléatoire de formation de la propagation 2D, nous emploierons une décroissance géométrique pragmatique de profil intermédiaire, 2.5D plus rapide que 2D, considérée comme limite supérieure de la réalité moyenne, qui devrait donc se situer entre les deux types de propagation 3D et 2.5D. Le cas 3D 'habituel' s'applique aux habitations situées hors de l'axe des vents principaux par rapport aux éoliennes. Dans, ou proche, de l'axe des vents, le cas de propagation 2.5D sera probable, et ne peut être ignoré. La propagation 2.5D prend la forme

$$A_{\text{geom,2.5D}}(d) = 20\log_{10}(200m/1m) + 15\log_{10}(200m/d)\,. \quad (20)$$

4.9 Absorption atmosphérique de la puissance sonore

La puissance sonore d'une onde sonore décroît avec la distance par dissipation d'énergie dans l'air, indépendamment et en sus de sa décroissance géométrique. Ce phénomène dépend fortement de la fréquence. Très faible à basse fréquence, la dissipation s'accroît rapidement avec l'augmentation de la fréquence. Elle dépend en outre de la température, de l'humidité et de la pression. Une formule complète de l'impact sur le niveau sonore est donnée dans la specification ISO 9613-1 [14]. Cet effet apparait dans l'Eq. (16) sous la forme $-\alpha(f)d$, précise pour toutes les distances considérées ici. Nos calculs sont faits avec un coefficient d'absorption $\alpha(f)$ pour une température de 10°C (moyenne été/hiver), une humidité relative de 70% et une pression de 91.3 kPa correspondant à une altitude de 1000m (valeur moyenne entre la plateau et les crêtes du Jura. Le rapport EMPA [2], section 5.6.3 montre que les variations de température et d'humidité annuelles, entre nuit et jour et à différentes altitudes en Suisse ne modifient que peu l'effet du coefficient $\alpha(f)$ autour de la valeur moyenne globale de la température et de l'humidité.

Le coefficient d'absorption à 50 Hz s'élève à $\alpha = 8 \times 10^{-5}\,m^{-1}$ et donc pratiquement sans effet (à 1000m : 0.08 dB), alors qu'à 1000 Hz, $\alpha = 3.6 \times 10^{-3}\,m^{-1}$ (à 1000m : 3.6 dB), voir Table 7.

Les valeurs calculées avec la formule ISO - formule un peu compliquée - sont vérifiées au moyen d'un calculateur indépendant accessible par internet [15].

4.10 Niveau sonore intérieur et facteur d'isolation des habitations

Le niveau sonore intérieur d'une habitation n'est pas limité de manière explicite par la loi. L'ordonnance OPB [1] p.28 renvoie à la norme suisse de protection contre le bruit dans le bâtiment SIA [9]. Cette norme fixe des coefficients d'isolation D_e qui doivent être respecté par les constructeurs. Le niveau sonore intérieur est donc défini par la différence

$$L_{\text{interieur}} = L - D_e \quad (21)$$

avec L le niveau sonore extérieur tel qu'obtenu par les formules (1) et (2).

Selon la norme SIA [9], le coefficient d'isolation d'une habitation pour un degré de sensibilité moyen devrait s'élever à $D_e = 27$ dB. Cette valeur s'applique aux pièces d'habitations. Le degré de sensibilité faible demande $D_e = 22$ dB et s'applique aux couloirs internes ou aux cuisines non-habitables par exemple. Aucune précision n'est donnée sur une dépendance à la fréquence. On suppose donc que D_e s'applique uniformément à tout le spectre sonore audible.

Moller and Pedersen [6] déterminent le coefficient d'isolation des habitations à partir de mesures intérieures in-situ standardisées couplées à un niveau sonore extérieur calibré produit par un haut-parleur. Les résultats montrent un coefficient d'isolation moyen qui, de 8 dB à 25 Hz augmente à 15 dB à 100 Hz, puis reste stable de cette valeur jusqu'à 250 Hz. Aucune indication n'est donnée au-delà de 250 Hz.

On peut tenter d'expliquer l'écart entre les résultats de [6] et les valeurs D_e de la norme SIA [9]. Cette dernière norme s'applique aux constructions à venir. Les constructions dans le voisinage de parcs éoliens sont majoritairement des maisons relativement anciennes. Et surtout, construites dans des endroits calmes, avant l'installation d'un parc. Il est donc raisonnable de penser que l'isolation acoustique n'a pas été le paramètre le plus important dans leur conception.

Van Kamp et Van den Berg confirment l'observation des

basses fréquences plus difficiles à absorber [5].

Pour la présente analyse, nous utilisons une association entre les deux approches pour construire une courbe d'isolation. Nous retenons une pente linéaire de 8 dB à 25 Hz jusqu'à D_e à 250 Hz, et constante à la valeur D_e au-delà :

$$L_{\text{iso}} = \begin{cases} 8 + (D_e - 8)\frac{\log_{10}(f/25)}{\log_{10}(250/25)} & \text{si} f < 250\,\text{Hz} \\ D_e & \text{si} f \geq 250\,\text{Hz} \end{cases} \quad (22)$$

Cette fonction apparait en trait interrompu dans la Fig. 4. La valeur $D_e = 22$ dB du niveau de sensibilité 'faible' selon [9], est vraisemblablement le plus proche de la réalité des maisons pas très récentes, alors que la valeur $D_e = 15$ de [6] reproduit peut-être le cas de maisons anciennes. Plusieurs combinaisons sont discutées dans la Sect. 3.4.

4.11 Effets non considérés ici

Les immissions peuvent s'écarter de l'approche normative ISO utilisée ici pour différentes raisons. En particulier

1. Par l'usage de dentelures sur l'arête sortante des pales (TES). Cet effet abaisse l'immission de 2-3 dB [16]. Mais c'est efficace seulement au-dessus de 300 Hz alors qu'à l'intérieur des habitations ce sont les fréquences inférieures qui sont les moins atténuées [6] et aussi parce que l'atténuation atmosphérique des hautes-fréquences est plus élevée.
2. Les turbulences présentes avec le vent en amont du rotor augmentent les émissions [8] p.456 (impact chiffré mais difficile à déduire avec certitude de cet article). Cet effet augmente dans les reliefs compliqués, ce qui est le cas d'une majorité des régions susceptibles d'héberger des parcs éoliens.
3. Un gradient de vent notable produit aussi une augmentation des émissions selon Van den Berg [17] (effet non chiffré, mais constaté in situ par l'auteur). Ici aussi, le gradient de vent est plus marqué dans les reliefs compliqués.

L' addition de ces trois effets est probablement neutre ou aggravante pour les immissions.

5 Infrasons

Les infrasons sont fréquemment mis en cause par les riverains et les opposants aux éoliennes. Ondes sonores identiques aux sons audibles courants mais de très basses fréquences, inférieures à 20 Hz, les infrasons sont difficilement audibles à moins d'être émis à des puissances importantes. Dans une revue extensive publiée en 2020 par l'office fédéral suisse de l'environnement l'environnement (OFEV), van Kamp et van den Berg montrent que le niveau infrasonore aérien émis par les éoliennes n'est pas suffisant pour être gênant [5]. Il restait la possibilité d'un transport de vibrations aux fréquences infrasonores par le sous-sol, suggérée par une publication du bureau fédéral allemand de géologie [18]. Motivé par un rapport qui explorait cette possibilité [19], cet effet a été mesuré près du parc de St-Brais par des experts mandatés par l'OFEV. Les niveaux de vibrations mesurés sont faibles [20]. Il est apparu ensuite que la publication allemande [18] était entachée d'une erreur de conversion de données qui exagérait fortement les niveaux sonores mesurés [21]. Les données corrigée de cette dernière publication sont comparables aux résultats de mesures à St-Brais [20].

Remerciements

L'auteur a bénéficié d'une relecture amicale et aiguisée ainsi que de très bonnes suggestions de la part de Christos Alexandrou, qui est ici vivement remercié.

References

[1] Confédération Suisse. *OPB 814.41, Ordonnance sur la protection contre le bruit*. 2021.

[2] Abteilung Akustik Eidg. Materialprufungs- und Forschungsanstalt (EMPA). *Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen, rapport 452'460*. EMPA, 2010.

[3] ISO. *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, ISO 9613-2*. ISO - Organisation internationale de normalisation, 1996.

[4] ISO. *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part2, ISO/DIS 9613-2*. ISO - Organisation internationale de normalisation, 2022.

[5] I. van Kamp and G.P. van den Berg. "Health effects related to wind turbine sound: an update". In: *RIVM report 2020-0150* (2020). DOI: 10.21945/RIVM-2020-0150.

[6] H. Moller and C. J. Pedersen. "Low-frequency noise from large wind turbines". In: *J. Acoust. Soc.* 129.6 (June 2011), pp. 3727–3744. DOI: 10.1121/1.3543957.

[7] Bouma J.E. van den Berg F. Pedersen E. and Bakker R. "WINDFARMperception, Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents". In: *Final Rep. 3, University of Groningen, University of Gothenburg* (June 2008).

[8] D.A. Spera. *Wind Turbine Technology,Fundamental Concepts of Wind turbine engineering, 2nd Ed.* ASME Press, 2009.

[9] SIA. *Protection contre le bruit dans le bâtiment, SN 520181:2020 fr*. 2020.

[10] WHO-Europe. *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. World Health Organization 2018, 2018.

[11] Stockholm Naturvårdsverket. *Buller från vindkraft—Riktvärden för ljud från vindkraft (Noise from Wind Turbines—Recommended Limits For Sound From Wind Turbines*. 2009.

[12] OFEV. *Fiche d'information sur le bruit des installations éoliennes K161-0974*. Confédération Suisse, 2011.

[13] Karasalo I.K. Bolin K. Boué M. "Long range sound propagation over a sea surface". In: *J. Acoust. Soc. Am., Vol. 126, No. 5, November 2009* (Nov. 2008).

[14] ISO. *Acoustics - Attenuation of the absorption of sound by the atmosphere, ISO 9613-1*. ISO - Organisation internationale de normalisation, 1993.

[15] R. Jackett. *calculation of absorption of sound by the atmosphere*. UK National Physical Laboratory, NPL, 2018.

[16] Schäffer Beat Merino-Martínez Roberto Pieren Reto. "Holistic approach to wind turbine noise: From blade trailing-edge modifications to annoyance estimation". In: *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 148 (2021) 111285* (June 2001).

[17] Van den Berg G.P. *Do wind turbines produce significant low frequency sound levels*. 11th Int. Meeting on Low Frequency Noise Vibration and its Control, Maastricht, The Netherlands, 2004.

[18] Pilger C. et L. Ceranna. "The influence of periodic windturbine noise on infrasound array measurements". In: *Journal of Sound and Vibration* 388 (2017), pp. 188–200. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.10.027.

[19] J-B. Jeanneret. *Intensité des infrasons émis par les éoliennes et sa dépendance du sous-sol et d'effets résonnants dans les constructions*. Paysage Libre Suisse, 2020.

[20] M. Koller D. Gsell A. Egger. *Windkraftwerk St. Brais, Erschütterungsausbreitung in der Umgebung des Windkraftwerks, Bericht 3065-01*. ZC Ziegler Consultants AG, Zürich, 2022.

[21] Pilger C. et L. Ceranna. "Comment on Baumgart et al.: Infrasound of a wind turbine reanalyzed as power spectrum and power spectral density". In: *Journal of Sound and Vibration* 533 (2022), p. 116636. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116636.

Contents

1 Résumé et conclusions **1**

2 Introduction **2**
But du rapport 3
Structure du texte 3

3 Respect des limites de nuisance et distance aux habitations **3**
3.1 Facteur de marge 3
3.2 Niveau sonore et distance à une éolienne . 4
3.3 Niveau sonore et distance à un parc de plusieurs éoliennes. 5
3.4 Niveau sonore à l'intérieur des habitations. 6
3.5 Résumé pour les distance minimales. . . . 9

4 Formules de calcul et données **9**
4.1 Valeur limites d'exposition au bruit des machines éoliennes 9
4.2 Niveau sonore de référence L_{WA} à l'émission 9
4.3 Spectre de puissance sonore de référence . 11
4.4 Facteurs de correction pour la puissance sonore de référence 11
4.5 Coefficient de réflexion du sol 11
4.6 Niveau sonore en fonction de la distance à une éolienne 11
4.7 Niveau sonore en fonction de la distance et de la fréquence 12
4.8 Décroissance géométrique du niveau sonore 12
4.9 Absorption atmosphérique de la puissance sonore 14
4.10 Niveau sonore intérieur et facteur d'isolation des habitations 14
4.11 Effets non considérés ici 15

5 Infrasons **15**