



HAL
open science

Comparaison de l'émergence sonore et du niveau de pression acoustique comme prédicteurs de la gêne causée par le bruit des éoliennes

Guillaume Dutilleux, Jean Fosset

► To cite this version:

Guillaume Dutilleux, Jean Fosset. Comparaison de l'émergence sonore et du niveau de pression acoustique comme prédicteurs de la gêne causée par le bruit des éoliennes. 2020. hal-04375816

HAL Id: hal-04375816

<https://hal.science/hal-04375816v1>

Submitted on 5 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

1 Comparaison de l'émergence sonore et du niveau de pression 2 acoustique comme prédicteurs de la gêne causée par le bruit 3 des éoliennes¹

4 Guillaume Dutilleux (guillaume.dutilleux@ntnu.no)

5 Jean Fosset

6
7 Jun 4, 2020

8 **Abstract.** Alors que la plupart des pays du monde s'appuient sur des valeurs limites fondées
9 sur le niveau de pression acoustique pour réglementer le développement de l'énergie éolienne,
10 l'émergence sonore telle que définie dans la norme ISO 1996-1 est utilisée dans quelques législations
11 nationales mais aussi dans des directives internationales. Il n'y a cependant aucune preuve publiée
12 que l'émergence sonore soit un descripteur pertinent pour ce type de source de bruit, à savoir
13 qu'il existe une corrélation entre cette métrique et la perception ou la gêne. Un test d'écoute a
14 été réalisé afin d'évaluer les mérites relatifs du niveau de pression acoustique et de l'émergence
15 sonore comme prédicteurs de la gêne occasionnée par le bruit des éoliennes. Les stimuli étaient
16 constitués de 45 sons d'éoliennes de 30 s à trois niveaux de pression acoustique pondérés A
17 différents et à cinq rapports signal/bruit différents. Trente-deux personnes ont évalué les stimuli
18 selon l'échelle standard ISO 15666 dans une salle peu réverbérante équipée de haut-parleurs.
19 Les résultats indiquent que la gêne à court terme est mieux prédite par le niveau de pression
20 acoustique pondéré A que par l'émergence sonore. Il est également observé que l'émergence sonore
21 est un mauvais prédicteur de l'audibilité des sons d'éoliennes.

22 1 Introduction

23 Au cours des dernières décennies, l'énergie éolienne a connu une croissance soutenue dans le
24 monde entier. 54,2 GW de capacité éolienne terrestre ont été installés dans le monde en 2019, ce
25 qui porte la capacité éolienne terrestre cumulée à plus de 600 GW [1]. En Europe, la puissance
26 installée était de 205 GW à la fin de 2019 [2]. Avec un taux de croissance supérieur à 10 % par

1. Cet document est la traduction française, par les mêmes auteurs, de *Dutilleux, G. and Fosset, J. (2020). Comparing sound emergence and sound pressure level as predictors of short-term annoyance from wind turbine noise. Acta Acustica, 4(3) :9..*

27 an entre 2009 et 2019, l'énergie éolienne est sur le point de devenir la source d'énergie la plus
28 importante en Europe. Étant donné que l'énergie éolienne est identifiée comme l'un des principaux
29 outils dans la transition vers un mix énergétique sans carbone, la pression pour augmenter la
30 puissance installée ne devrait pas diminuer dans un avenir proche.

31 Alors qu'il est bien connu que le bruit n'explique qu'une petite partie de la variance de la gêne
32 due aux activités génératrices de bruit en général [3] et de l'énergie éolienne en particulier [4],
33 l'acoustique est un facteur clé dans l'acceptation de l'énergie éolienne par les riverains. Il est bien
34 établi empiriquement que le bruit des éoliennes peut être une source de gêne [4, 5, 6, 7]. En raison
35 de la pression exercée pour augmenter la capacité installée, au fil du temps on peut s'attendre à
36 ce que la densité des parcs éoliens par unité de surface augmente et que les nouveaux projets
37 de parcs éoliens soient situés plus près des populations. Le risque de plaintes de riverains sera
38 alors accru. Il est donc utile de s'interroger sur la pertinence de la métrique utilisée pour fixer les
39 limites réglementaires de bruit.

40 Dans le contexte particulier du contrôle du bruit des éoliennes, la plupart des pays s'appuient sur
41 diverses évaluations fondées soit (1) sur le bruit total uniquement, soit (2) sur le bruit particulier
42 - autrement dit le bruit attribuable à la source - et le bruit résiduel, c'est-à-dire le bruit résiduel
43 sans aucune composante attribuable à la source de bruit particulier [8]. Mais certaines législations
44 et directives préfèrent se fonder sur (3) l'émergence sonore.

45 A notre connaissance, seuls deux pays dans le monde, à savoir l'Italie [9, 10, 11] et la France
46 [12], spécifient des valeurs limites d'émergence sonore. Le concept d'émergence sonore apparaît
47 également implicitement dans les directives publiées par la Banque mondiale [13, 14] qui spécifient
48 une augmentation maximale des "niveaux de bruit de fond de 3 dB au niveau du récepteur le
49 plus proche". Cette valeur indicative est toujours combinée à des valeurs limites exprimées en L_{eq}
50 et s'applique au-delà des limites de propriété des installations bruyantes. Le critère de conformité
51 actuel est que l'émergence doit être inférieure à 3 dB la nuit et à 5 dB le jour en Italie et en
52 France [10, 12]. L'évaluation de la conformité d'un parc éolien vis-à-vis de valeurs limites aussi
53 basses n'est pas dénuée de difficultés [15]. Le principal problème, cependant, est le fondement
54 psychoacoustique de l'émergence sonore en tant que descripteur du bruit.

55 Alors que des courbes dose-réponse ont été développées pour les niveaux de pression acoustique
56 pondérés A [5, 7] et que les mérites des niveaux de pression acoustique pondérés C par rapport
57 aux niveaux pondérés A ont également été évalués [16], il semble qu'il n'existe pas de travaux
58 scientifiques publiés qui soutiennent l'utilisation de l'émergence sonore [15] comme alternative au
59 niveau de pression acoustique dans le contexte de la gêne due au bruit des éoliennes. La seule
60 référence que nous avons trouvée [17] traite d'un test d'écoute fondé sur 24 sons synthétiques
61 construits à partir de trois sons résiduels différents (calme à 34 dB(A), milieu naturel à 40 dB(A)
62 et trafic routier à 50 dB(A)) et de quatre bruits particuliers industriels différents, dont un son
63 d'éolienne à deux émergences sonores ($e = 3$ dB et $e = 5$ dB). Cette étude conclut que le degré de
64 gêne à court terme dépend de la source à e constant, et que $e = 0$ dB n'implique pas que le bruit
65 particulier ne soit pas détectable. Dans [17], la conception du test d'écoute empêche d'évaluer

66 la gêne à divers niveaux sonores *ceteris paribus* parce que le type de bruit résiduel utilisé est
67 dépendant du niveau de pression acoustique.

68 L'objectif de notre article est de rendre compte d'un test d'écoute effectué en laboratoire
69 concernant les mérites relatifs de l'émergence sonore et de la pression acoustique totale comme
70 estimateurs du désagrément (gêne à court terme) dû au bruit des éoliennes. Un deuxième objectif
71 est d'évaluer la capacité de l'émergence sonore à prédire l'audibilité des sons d'éoliennes.

72 Cet article est organisé comme suit. La section 2 fournit la définition de l'émergence sonore.
73 La section 3 présente les méthodes. Elle se concentre sur la collecte d'échantillons de bruits
74 particuliers et de bruits résiduels pour générer des stimuli dont le niveau de pression sonore total
75 et le rapport signal/bruit sont contrôlés, et sur la préparation d'un test d'écoute. La section 4
76 décrit les résultats obtenus, la section 5 traite (1) de la corrélation entre le désagrément et les deux
77 métriques quantitatives considérées, (2) de la relation entre l'audibilité du bruit particulier et
78 l'émergence sonore, et (3) de plusieurs aspects méthodologiques. La section 6 conclut cet article.

79 2 Définitions

80 Dans la suite de cet article, l'émergence sonore e est définie comme suit :

$$e = L_{tot} - L_{res}. \quad (1)$$

81 où L_{tot} est le niveau de pression acoustique total et L_{res} le niveau de pression acoustique du
82 bruit résiduel. Il est utile d'introduire en outre L_{part} pour le bruit particulier, c'est-à-dire le
83 niveau de pression acoustique attribuable à la source étudiée. Ici, ces quatre concepts d'émergence
84 sonore, de bruit total, de bruit particulier et de bruit résiduel sont utilisés tels qu'ils sont définis
85 dans la norme ISO 1996-1 actuelle [15, 18].

86 Si le bruit résiduel et le bruit particulier ne sont pas corrélés il est facile d'établir la relation
87 suivante entre e et le rapport signal/bruit (RSB) [15] :

$$e = 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{RSB}{10}} \right). \quad (2)$$

88 3 Méthodes

89 3.1 Matériel et procédure d'enregistrement

90 L'objectif étant de générer des stimuli acoustiques avec un rapport signal/bruit contrôlé (RSB) où
91 le signal est un son d'éolienne, deux types d'enregistrements ont été collectés ou occasionnellement
92 réutilisés à partir de travaux antérieurs. Le premier regroupe des sons d'éolienne dans une situation
93 de rapport signal/bruit élevé. Le second contient des sons résiduels où aucun son d'éolienne n'est
94 présent mais d'autres sons typiques d'un environnement rural.

95 Tous les enregistrements ont été réalisés avec un microphone à condensateur 1/2" 200V de
96 classe 1 (Brüel and Kjør type 4190) connecté à un préamplificateur (Norsonic type 336) avec
97 un filtre passe-haut réglé à 20 Hz. Le préamplificateur servait de frontal à un enregistreur audio
98 numérique (Sound Devices type 722). Les enregistrements ont été réalisés avec une fréquence
99 d'échantillonnage de 48 kHz et une résolution de 24 bits. Avant et après chaque série de mesures,
100 la chaîne d'enregistrement a été calibrée avec un calibre de classe 1 (Brüel and Kjør type 4231).
101 La vitesse du vent a été mesurée à 2 m de hauteur avec un anémomètre portatif (Windmate type
102 WM-200).

103 Les échantillons de sons résiduels ont été enregistrés à travers un écran anti-vent sphérique
104 de 9 cm de diamètre. Le microphone était placé sur un trépied. Les sons des éoliennes utilisés
105 dans cette étude ont été enregistrés en se référant à la norme IEC 6140011 :2018 pour la mesure
106 de la puissance acoustique des éoliennes [19]. Les irrégularités du terrain ont cependant rendu
107 impossible le respect des exigences relatives à la distance entre le microphone et l'éolienne. Selon
108 [19], le microphone était posé à plat sur une plaque circulaire rigide placée sur le sol. Une boule
109 anti-vent standard de 9 cm de diamètre coupé en deux a été utilisée comme écran anti-vent
110 primaire. Un écran anti-vent secondaire a été utilisé (fait main ou Microtech Gefell type GFM
111 920).

112 3.2 Collecte de sons

113 Les sons d'éoliennes utilisés proviennent soit d'une campagne de mesure précédente au parc
114 éolien de Smøla, Møre og Romsdal, en Norvège, en avril 2018 [20], soit des sons enregistrés en mai
115 2019 au parc éolien de Skomakerfjellet, Roan, Trøndelag, Norvège. Les deux sites sont éloignés
116 de toute infrastructure génératrice de bruit. Smøla peut être caractérisé comme un patchwork
117 de landes, de sols rocheux dénudés et de sol recouvert d'une végétation basse comme l'herbe ou
118 la bruyère. Skomakerfjellet peut être décrit comme un terrain vallonné, avec principalement des
119 sols rocheux dénudés, de la mousse et de l'herbe. Des données concernant ces parcs éoliens sont
120 fournies au tableau 1. Au parc éolien de Smøla les enregistrements ont été effectués à différents
121 endroits à proximité d'une éolienne de type Bonus B76/2000. Six enregistrements de 5 min ont
122 été collectés à des distances comprises entre 236 et 360 mètres. A Skomakerfjellet, le microphone a
123 été placé à 150 m de l'éolienne la plus proche. Cinq enregistrements de 5 minutes ont été effectués
124 à différentes orientations par rapport au plan des pales de l'éolienne la plus proche.

125 Des échantillons de sons résiduels ont été enregistrés en mai 2019 à Rotvoll, dans les environs
126 de Trondheim, Trøndelag, Norvège, à proximité de la côte. L'endroit peut être décrit comme
127 un environnement semi-rural avec des forêts et des parcelles cultivées, de l'habitat diffus, des
128 bâtiments industriels, des routes secondaires dans un rayon de 100 m et une ligne ferroviaire à
129 200 m de distance. Trois enregistrements de 10 min ont été effectués en plusieurs points.

Parc éolien	Smøla	Skomakerfjellet
<i>Description</i>		
Année de mise en service	2002 (2005)	2016
Nombre de turbines	68	4
Fabricant des turbines	Bonus (Siemens)	Vestas
Type de turbine	B76/2000 (SWT-2.3-82)	V112/3300
Puissance électrique nominale (MW) (MW)	2.0 (2.3)	3.3
Hauteur du moyeu (m)	70 (70)	94
Diamètre du rotor (m)	76 (82.4)	112
<i>Campagnes d'enregistrement</i>		
Vitesse du vent pendant les enregistrements (m/s) à 2 m de hauteur	4.0	4.2

Enregistrements sélectionnés pour le test d'écoute

TABLE 1 – Informations sur (1) les deux parcs éoliens où des enregistrements audio ont été effectués et (2) les campagnes d'enregistrement correspondantes.

130 3.3 Prétraitement des sons particuliers

131 **Suppression de la tonalité.** Considérant que la tonalité dans les sons d'éoliennes à des distances
132 typiques pour des habitations relèvent soit d'une mauvaise conception soit d'un mauvais entretien
133 [21], les enregistrements effectués ont été analysés en vue de détecter les éventuelles composantes
134 tonales en utilisant à la fois l'écoute et un programme Python [22] qui met en œuvre la procédure
135 normalisée ISO PAS 20065 pour la détection de la tonalité [23].

136 Lorsqu'une tonalité a été détectée dans un enregistrement, elle a été filtrée dans le domaine
137 fréquentiel à l'aide d'estimations locales de deux caractéristiques. La première est la moyenne de
138 la densité spectrale de puissance (DSP) et la seconde la DSP maximale. Les deux estimations
139 ont été obtenues à partir de la DSP aux fréquences adjacentes à la gamme de fréquences où les
140 composantes tonales apparaissaient. Dans l'intervalle de fréquences avec composantes tonales, la
141 DSP a ensuite été remplacée par tirage aléatoire selon une variable aléatoire gaussienne définie
142 par l'interpolation de la DSP moyennes et de la DSP maximale à gauche et à droite de l'intervalle
143 de fréquence où les composantes tonales apparaissaient.

144 **Prise en compte de l'atténuation atmosphérique.** Comme l'objectif était de collecter les sons
145 des éoliennes avec un rapport signal/bruit aussi élevé que possible, la distance à l'éolienne était

146 faible par rapport à la distance typique la plus courte entre une éolienne et une habitation. Alors
147 qu'il serait pertinent d'évaluer la gêne occasionnée par les éoliennes en extérieur, par exemple
148 parce que les environs d'un parc éolien sont susceptibles d'être utilisés pour des activités de
149 plein air, nous nous sommes concentrés sur l'impact sur les zones habitées. Par conséquent,
150 l'atténuation atmosphérique à 500 m a été calculée selon la norme ISO 9613-1 [24] en supposant
151 une température de 20 °C, une humidité de 70. % Le choix de 500 m correspond à la distance
152 minimale autorisée entre une éolienne à l'habitation la plus proche dans la loi française [25]. Le
153 filtre correspondant a été appliqué dans le domaine fréquentiel en utilisant des bandes étroites.

154 **3.4 Sons résiduels et particuliers sélectionnés**

155 Trois enregistrements de 30 s de sons d'éoliennes ont été sélectionnés pour être utilisés comme
156 bruits particuliers S0, S1 et S2 dans la génération de stimuli avec L_{tot} et e contrôlés. Un aperçu de
157 leurs caractéristiques temporelles ou fréquentielles avant correction de la tonalité et de l'atténuation
158 atmosphérique est donné à la figure 1. S0 (Smøla) est un extrait d'un enregistrement pris à 360 m
159 de l'éolienne la plus proche avec une vitesse de vent de 4 m/s à 2 m de hauteur. L'enregistrement
160 original est dépourvu de tonalité. S1 et S2 ont été enregistrés à Skomakerfjellet (voir le tableau
161 1). S1 provient d'un enregistrement effectué sous le vent à 60° de la projection horizontale de
162 l'axe de rotation, S2 d'un enregistrement effectué sous le vent le long de la projection horizontale
163 de l'axe de rotation (voir le tableau 1). Dans les deux cas, la vitesse moyenne du vent était de 4.2
164 m/s à 2 m de hauteur.

165 Les enregistrements effectués à Skomakerfjellet contenaient une série de quatre composantes
166 tonales entre 3750 Hz et 4250 Hz (voir Fig. 1 en haut à droite). Contrairement à l'hypothèse
167 habituelle selon laquelle la tonalité provient des boîtes de vitesses [21], les composantes tonales
168 ici sont probablement attribuables aux onduleurs, un mécanisme de génération de bruit peu
169 documenté dans le contexte de l'éolien [26]. En outre, une nette fluctuation ou "swish" peut être
170 entendue dans S1 (voir Fig. 1 en bas à gauche), tandis que S0 et S2 peuvent être décrits comme
171 des sons stationnaires.

172 L'enregistrement de 30 s sélectionné pour le bruit résiduel R0 contient un mélange de sons
173 à basse fréquence provenant de trafic urbain et de vocalisations de quatre espèces d'oiseaux, le
174 pouillot véloce (*Phylloscopus collybita*), le pinson des arbres (*Fringilla coelebs*), le merle noir
175 (*Turdus merula*) et le pouillot fitis (*Phylloscopus trochilus*). Il s'agit d'espèces répandues dans
176 toute l'Europe. Par conséquent, le paysage sonore ne présente aucune caractéristique typiquement
177 norvégienne et il aurait pu être enregistré dans de nombreux autres endroits en Europe. La DSP
178 des signaux et des spectrogrammes sont présentés à la figure 1.

179 **3.5 Combinaison des sons résiduels et spécifiques**

180 Comme expliqué dans la section 3.3, les sons des éoliennes ont été nettoyés de toute composante
181 tonale occasionnelle et leur spectre de fréquence a été extrapolé à une distance de 500 m. Cela

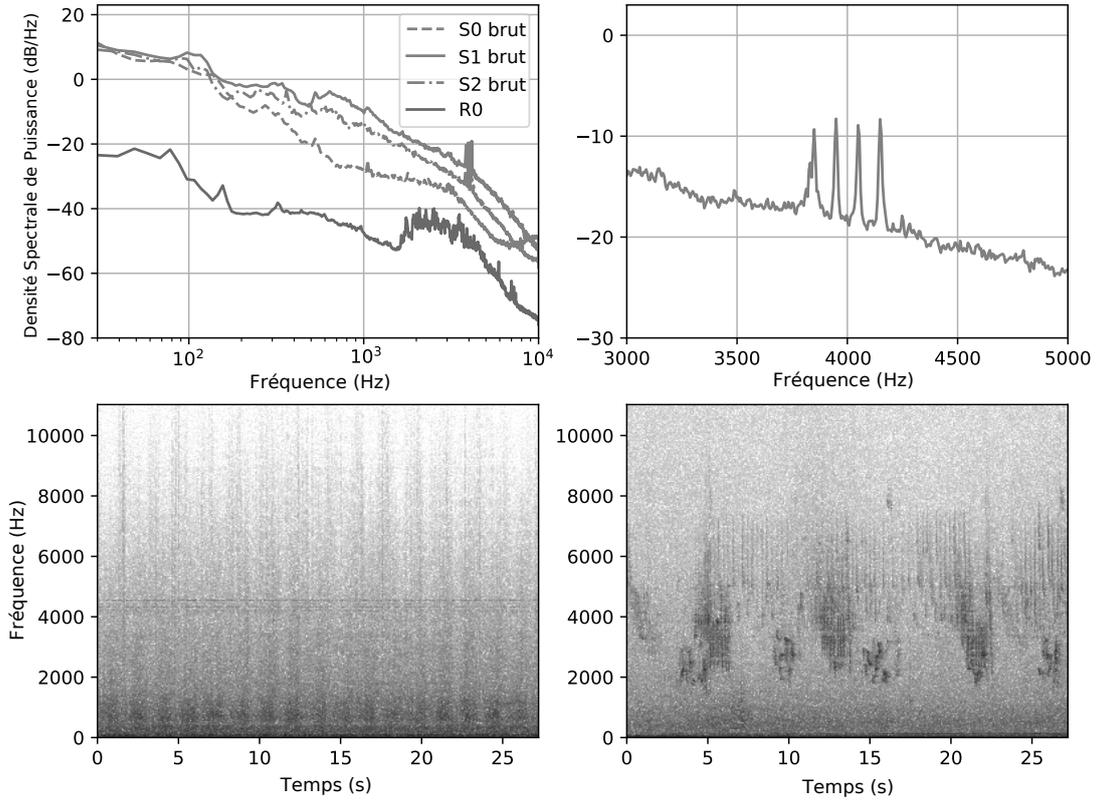


FIGURE 1 – Aperçu des signaux sélectionnés pour construire les stimuli du test d'écoute. Pour les sons spécifiques, les figures sont basées sur le signal brut, c'est-à-dire avant correction de l'atténuation atmosphérique et suppression des composantes tonales occasionnelles. Dans les figures supérieures, les amplitudes absolues sont arbitraires. Dans les figures inférieures, plus la couleur est foncée, plus l'amplitude est élevée. En haut à gauche : densité spectrale de puissance (DSP) pour les différents bruits particuliers et le bruit résiduel. En haut à droite : détail de la DSP du son brut S1 montrant les composantes tonales autour de 4 kHz. En bas à gauche : sonagramme de S1 où un "swish" clair peut être entendu. En bas à droite : sonagramme de R0 où les transitoires au-dessus de 1 kHz sont des vocalisations d'oiseaux.

182 signifie qu'il y a trois paires différentes (S0,R0), (S1,R0), et (S2,R0) de sons spécifiques et résiduels.
 183 Chaque paire a été utilisée pour générer une série de stimuli. Les sons résiduels et spécifiques ont
 184 été mélangés pour tenir compte du RSB spécifié. L'amplitude des signaux mélangés a également
 185 été ajustée pour correspondre aux valeurs de L_{tot} choisies. La série contient les 15 combinaisons
 186 possibles de $L_{tot} \in \{35, 40, 50\}$ dB(A) et $RSB \in \{10, 5, 0, +5, +10\}$ dB. Cela donne 45
 187 stimuli mono au total pour trois paires (S_i, R_0) $i \in \{0, 1, 2\}$. Les valeurs de RSB sélectionnées
 188 correspondent respectivement à $e \in \{0, 4, 1, 2, 3, 6, 2, 10, 4\}$ dB.

189 La métrique utilisée à la fois pour L_{tot} et RSB est le $L_{Aeq,30s}$. Alors que l'intention était de
 190 proposer des stimuli où L_{tot} varie par pas de 10 dB jusqu'à 50 dB(A), il fallait s'assurer que

191 le rapport signal/bruit dans la salle de test soit suffisamment élevé. En supposant que la règle
192 habituelle du RSB de 10 dB s'applique dans ce contexte, les mesures préliminaires du niveau de
193 pression acoustique ont montré que la valeur inférieure admissible pour L_{tot} était de 35 dB(A).

194 Le RSB a été jugé plus pratique que e s'agissant de préparer les stimuli car la plage de variation
195 de e est limitée à 3 dB pour un RSB négatif. Le choix des stimuli de 30 s a été dicté par l'intention
196 d'évoquer une exposition de longue durée à des éoliennes tout en maintenant le test d'écoute dans
197 des limites de temps raisonnables.

198 3.6 Protocole du test d'écoute

199 La salle utilisée pour le test d'écoute est une pièce en forme de boîte à chaussures de dimensions
200 $7.2 \times 6 \times 2.9$ m. La salle est conçue pour être visuellement neutre et acoustiquement peu réverbé-
201 rante. Elle n'a pas de fenêtre et ses murs blancs sont dépourvus de tout mobilier. De plus, les murs
202 sont entièrement recouverts soit d'absorbants acoustiques soit de diffuseurs. Un plafond suspendu
203 apporte une absorption supplémentaire. Nous avons mesuré le niveau de pression acoustique
204 équivalent pondéré A dans la salle en juin 2019 avec un sonomètre calibré de classe I (Norsonic type
205 Nor140) pendant les heures de bureau et nous avons obtenu $L_{Aeq,1s,30min} = 25.3$ dB. Le $L_{Aeq,1s}$
206 ne présentait que des fluctuations mineures. Le même sonomètre a été utilisé pour étalonner la
207 reproduction sonore.

208 Le test d'écoute s'est appuyé sur un logiciel développé par l'un des auteurs. Cette interface
209 utilisateur guide le sujet tout au long du test d'écoute. Commencant par la collecte des données
210 personnelles, elle procède à l'introduction à la tâche à réaliser, à la présentation et à la notation
211 des différents stimuli et au stockage des résultats dans un fichier texte pour un traitement
212 ultérieur. Le langage utilisé est Python et la bibliothèque Tkinter faisant le lien avec Tk pour
213 l'interface graphique. Cette interface utilisateur n'effectue aucun type de traitement sur les stimuli
214 acoustiques qui sont préparés en amont et stockés en mono au format PCM 48 kHz 24 bits, mais
215 le logiciel présente les différents stimuli dans un ordre aléatoire. L'interface utilisateur contrôle
216 le matériel audio à l'aide de la liaison Python sounddevice à la bibliothèque PortAudio tout en
217 recueillant les réponses du sujet concernant le désagrément et l'audibilité des sons des éoliennes
218 pour chaque stimulus. Le désagrément est évalué à l'aide de l'échelle standard ISO 15666 [27] qui
219 est affichée par l'interface graphique. En ce qui concerne l'audibilité, le sujet répond s'il/elle a pu
220 entendre une éolienne dans le stimulus qui vient d'être présenté.

221 Le matériel utilisé était un ordinateur portable (Dell type Latitude 5580) et sa carte son interne
222 (Realtek type ALC3246-CG). La sortie de la carte son était connectée à deux haut-parleurs
223 électrodynamiques actifs à 2 voies (Dynaudio type BM6A). Pour les besoins du test d'écoute, la
224 réponse en fréquence des haut-parleurs a été mesurée dans des conditions anéchoïques et un filtre
225 inverse a été appliqué pour égaliser la réponse en fréquence de 31,5 Hz à 10 000 Hz.

226 Pendant le test, l'auditeur était assis à une table où était placé l'ordinateur portable. Vus d'en
227 haut, les deux haut-parleurs et la tête du sujet formaient un triangle équilatéral. Les haut-parleurs
228 étaient placés sur un support de sorte que la hauteur du tweeter se trouve à peu près à la même

229 hauteur que les oreilles du sujet. Des matériaux absorbants étaient placés sur le sol afin de réduire
230 la contribution des réflexions du sol.

231 3.7 Participants

232 Les sujets ont été recrutés parmi les membres du personnel temporaire et permanent de la
233 Faculté de technologies de l'information et de génie électrique de l'Université norvégienne des
234 sciences et de la technologie (NTNU), Trondheim, via une annonce sur une liste de diffusion et
235 en faisant du porte-à-porte. L'annonce a également été faite en utilisant les réseaux sociaux d'une
236 organisation étudiante (NTNU International Students) et de l'Alliance française de Trondheim. Il
237 n'a pas été demandé aux sujets de passer un test audiométrique mais de signaler toute déficience
238 auditive.

239 Trente-deux sujets ayant une audition normale (auto-déclaration) ont pris part au test d'écoute.
240 Il y avait 14 sujets féminins et 18 sujets masculins. L'âge des sujets allait de 20 à 49 ans avec un
241 âge médian de 29 ans. Dix-neuf sujets étaient des employés de NTNU, huit étaient des étudiants
242 et cinq n'appartenaient pas à ces catégories. Quatorze nationalités étaient représentées dans le
243 panel de sujets. Dix-huit participants sur 32 étaient des Européens. Seuls deux participants ont
244 signalé une exposition antérieure aux sons des éoliennes.

245 Dans l'ensemble, il n'y a pas eu de perturbations acoustiques pendant le test. Cependant,
246 un sujet a signalé avoir été dérangé par le bruit de survol d'un hélicoptère et un autre par le
247 claquement d'une porte. Comme l'impact de la perturbation était limité à un seul stimulus, les
248 données de ces sujets ont été utilisées dans l'analyse statistique.

249 4 Résultats

250 4.1 Désagrément

251 La figure 3 présente une analyse par régression où le désagrément est la variable dépendante et
252 où l'émergence sonore est la variable indépendante. En outre, elle donne une vue synthétique de la
253 distribution des données expérimentales en fonction de l'émergence sonore. La figure 4 présente la
254 contrepartie pour le désagrément et le niveau de pression acoustique. Les désagréments semblent
255 être beaucoup plus dispersés lorsque l'émergence sonore est utilisée qu'avec le niveau de pression
256 niveau sonore. Par exemple, la totalité de l'échelle ISO 15666 est utilisée quel que soit le niveau
257 d'émergence sonore considéré alors que ce n'est pas le cas lorsque le niveau de pression acoustique
258 est utilisé en remplacement.

259 Les régressions linéaires indiquent des coefficients de corrélation R^2 qui varient entre 0.024
260 et 0.06 entre le désagrément et l'émergence sonore pour différents groupes de données, et entre
261 0,31 et 0,34 pour le désagrément et le niveau de pression acoustique. Les résultats numériques
262 pour l'ensemble complet de données sont donnés dans le tableau 2. La pente de la régression est
263 également plus élevée pour L_p que pour e tandis que la plage de variation pour L_p est inférieure à

264 celle de e dans le test. Si l'on inclut à la fois L_{tot} et e dans une analyse de régression multilinéaire,
265 la valeur R^2 n'est que légèrement augmentée par rapport à un modèle linéaire qui ne dépend que
266 de L_{tot} .

267 En outre, une analyse en composantes principales effectuée sur l'ensemble des données indique,
268 comme le montre la figure 2, que le désagrément et L_{tot} correspondent sensiblement à la même
269 dimension de l'ensemble de données tandis que e correspond à une autre composante principale.
270 Une ANOVA à deux voies a également été conduite concernant l'influence du niveau de pression
271 acoustique et de l'émergence sonore sur le désagrément. Ses résultats sont que la variance
272 expliquée par le niveau de pression acoustique ($F = 704$) est plus importante que celle expliquée
273 par l'émergence sonore ($F = 92$), tandis que les deux paramètres ont une influence statistiquement
274 significative ($p < 0.001$).

275 Tout cela suggère que le niveau de pression acoustique représente mieux les données de
276 désagrément que l'émergence sonore. Par conséquent, si un seul paramètre devait être utilisé, L_{tot}
277 devrait avoir la priorité sur e .

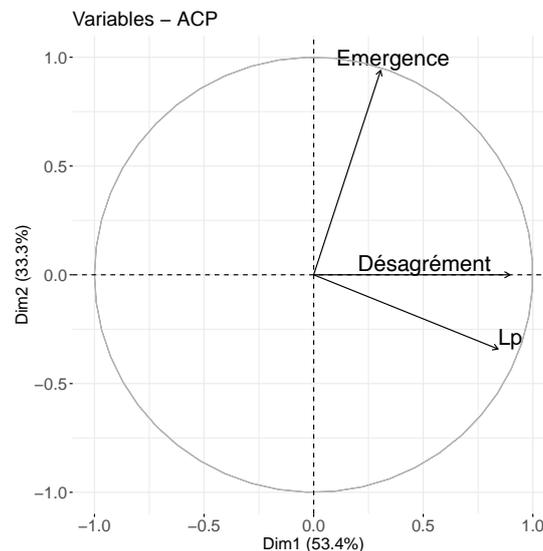


FIGURE 2 – Analyse en composantes principales pour l'ensemble des données.

278 4.2 Audibilité

279 Les réponses à la question "Avez-vous entendu une éolienne ?" permettent de calculer les taux
280 d'audibilité pour les différents stimuli proposés. Comme prévu, les sons des éoliennes sont plus
281 facilement détectables lorsque l'émergence sonore augmente. Les résultats pour les deux valeurs
282 inférieures de l'émergence sonore sont présentés à la figure 5. Il apparaît que même pour des
283 valeurs qui sont proches de 0, c'est-à-dire la valeur minimale de e par définition, le taux d'audibilité
284 le plus faible est de 28 % pour le mélange S0R0 à $L_{tot} = 35$ dB(A). A l'échelle de notre étude,

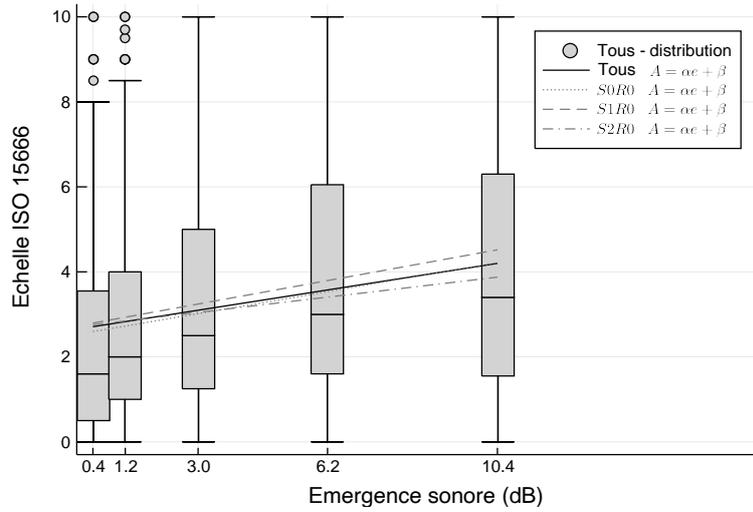


FIGURE 3 – Désagrément évalué selon l'échelle ISO 15666 en fonction de l'émergence sonore.

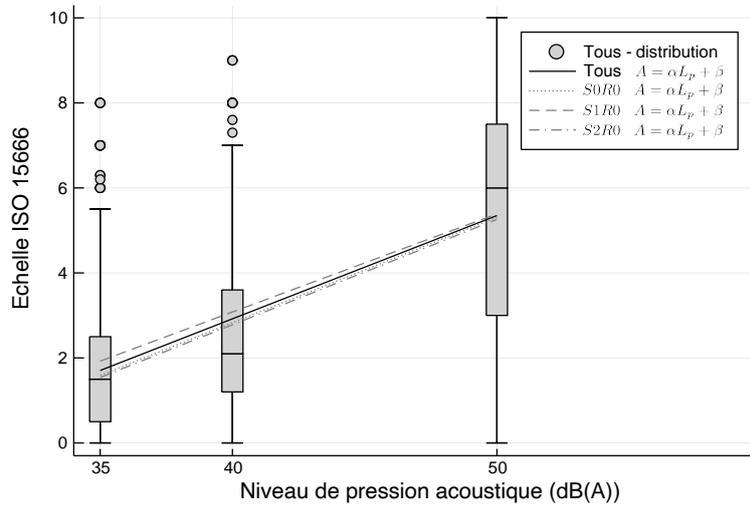


FIGURE 4 – Désagrément évalué selon l'échelle ISO 15666 en fonction du niveau de pression acoustique total.

285 *ceteris paribus*, le taux d'audibilité est dépendant du stimulus. Les stimuli basés sur S1 présentent
 286 un taux de détection plus élevé que ceux basés sur les deux autres bruits particuliers. Mais pour
 287 les trois mélanges proposés, le taux d'audibilité est une fonction croissante de L_{tot} .

	(α_i)	R^2	Déviante
$\alpha_1 L_{tot} + \beta$	(0.24)	0.32	6701
$\alpha_1 RSB + \beta$	(0.08)	0.047	9411
$\alpha_1 e + \beta$	(0.15)	0.042	9459
$\alpha_1 L_{tot} + \alpha_2 e + \beta$	(0.24, 0.15)	0.36	6281

TABLE 2 – Pour l’ensemble complet de données, modèles linéaires de désagrément en fonction de L_{tot} , RSB et e , et mesures de performance correspondantes.

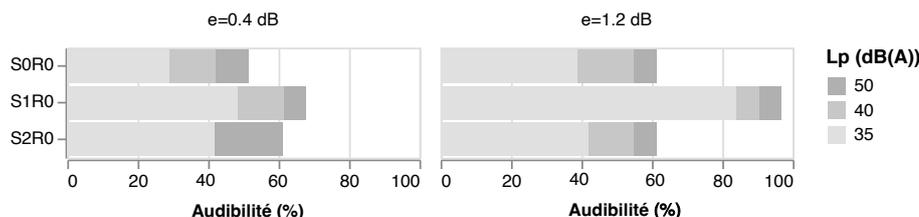


FIGURE 5 – Taux d’audibilité pour les deux valeurs inférieures de e considérées dans cette étude, en fonction du stimulus et de L_{tot} . Sur cette figure, les barres ne sont pas empilées mais superposées. En d’autres termes, le taux d’audibilité pour un L_{tot} donné peut être lu à l’extrémité droite de la zone rectangulaire correspondante.

5 Discussion

288

289 Le principal résultat de notre étude est que, pour l’ensemble des paysages sonores synthétiques
290 proposés dans ce test d’écoute et pour une définition spécifique de l’émergence sonore, le niveau
291 de pression pondérée A est un meilleur prédicteur du désagrément dû au bruit des éoliennes
292 que l’émergence sonore. Bien que la corrélation entre le désagrément et l’émergence sonore soit
293 statistiquement significative, l’émergence sonore apparaît clairement comme un descripteur de
294 second ordre. Par conséquent, si l’on doit se limiter à un seul descripteur, le niveau de pression
295 acoustique pondéré A doit être privilégié. Ici nous avons utilisé $L_{eq,30s}$ pour calculer l’émergence
296 sonore. Cette conclusion pourrait ne pas être valable si l’émergence sonore était basée sur un
297 autre descripteur comme un niveau sonore fractile par exemple. En outre, étant donné qu’une
298 grande partie des sujets ont pu entendre l’éolienne dans des situations de rapport signal/bruit
299 négatif - correspondant à une émergence sonore aussi faible que 0.4 dB - il y a de bonnes raisons
300 de remettre en question la pertinence des seuils d’émergence sonore de 3 dB ou 5 dB que l’on
301 trouve dans la législation existante qui s’appuie sur l’émergence sonore pour fixer des limites de
302 bruit.

303 L’interprétation courante est que ces seuils proviennent de l’observation que lorsque l’émergence
304 sonore est supérieure à 3 dB, le son spécifique peut être clairement détecté sans qu’il soit nécessaire
305 de se concentrer. Le test d’écoute suggère que ce seuil empirique de détectabilité devrait être plus
306 proche de 0 dB. Mais cela rendrait impossible la fixation d’une limite légale entre conformité et
307 non-conformité basée sur l’émergence sonore car l’émergence sonore est positive par définition. En

308 outre, les taux d'audibilité dérivés de notre test d'écoute sont susceptibles de sous-estimer les taux
309 d'audibilité réels dans des situations d'exposition à long terme car, à la longue, l'oreille humaine
310 peut être entraînée à détecter des sons particuliers lorsqu'elle y est exposés de manière répétée
311 dans un environnement sonore donné. L'observation que les stimuli basés sur S1 conduisent à
312 des taux d'audibilité plus élevés peut s'expliquer par les variations périodiques révélées par le
313 sonagramme de la figure 1. La capacité des sujets à détecter les sons des éoliennes lorsque le
314 rapport signal/bruit est négatif est documentée dans des recherches antérieures. Par exemple,
315 [28] a constaté que le seuil de détection du bruit des éoliennes en présence de sons naturels
316 correspondait à un RSB d'environ 8 à 12 dB.

317 Comme observé de manière générale, notre étude illustre que le niveau de pression acoustique
318 total représente un pourcentage relativement faible de la variance du désagrément. L'ajout d'une
319 deuxième variable peut aider à construire un meilleur modèle de gêne due au bruit des éoliennes.
320 Comme indiqué ci-dessus, l'inclusion de l'émergence sonore n'aurait qu'un impact mineur. Les
321 taux d'audibilité plus élevés trouvés pour S1 suggèrent qu'un paramètre propre à la source tel
322 qu'une métrique qui quantifie la fluctuation périodique du niveau de pression acoustique, souvent
323 appelée modulation d'amplitude par souci de concision, pourrait être utile. De récentes recherches
324 ont également montré que cette modulation d'amplitude apparente est une source importante de
325 plaintes [4] dans le contexte de l'énergie éolienne.

326 En ce qui concerne la collecte d'échantillons sonores d'éoliennes, il est évident que le fait
327 de placer le microphone sur le sol n'est pas représentatif de la position typique d'un auditeur.
328 Cependant, lorsque l'on écoute un tel enregistrement fait au sol sans aucune information a priori,
329 il est difficile de dire où se trouvait le microphone. De plus, l'enregistrement obtenu ressemble au
330 bruit d'une éolienne. Aucun des auditeurs participant à cette étude n'a signalé que la composante
331 éolienne des paysages sonores ne semblait pas réaliste. Notre principale préoccupation ici était de
332 collecter des échantillons audio qui étaient exempts de bruit induit par le vent sur le microphone.
333 Alors que les mesures de niveau sonores peuvent tolérer une certaine quantité de bruit induit
334 par le vent sur le microphone, nous pensons que l'oreille humaine est très sensible à ces bruits
335 parasites. Le sol est une position très favorable lorsqu'il s'agit de minimiser l'écoulement du vent
336 sur le microphone.

337 On peut également se demander si les sons des éoliennes utilisés pour préparer les stimuli sont
338 vraiment exempts de tout autre son. Il est bien connu que la végétation peut générer des sons
339 lorsqu'elle est exposée au vent. Des modèles d'émission ont été développés, cependant uniquement
340 pour les arbres [29, 30, 31]. Sur les deux sites, la végétation est très basse. Les conifères ou les
341 arbres à feuilles caduques sont absents. En supposant un sol plat avec une longueur de rugosité
342 de 0,005 m pour l'herbe courte [32] et un un profil de vitesse de vent logarithmique on peut
343 extrapoler les vitesses du vent mesurées à 2 m de hauteur jusqu'à 0,5 m de hauteur. Ceci peut être
344 considéré comme la hauteur maximale de la végétation à Smøla. La végétation à Skomakerfjellet
345 était plus basse. La vitesse du vent à 0,5 m de hauteur est d'environ 3,1 m/s (11 km/h). Compte
346 tenu du type de végétation observé, une telle vitesse de vent n'est pas susceptible de générer un

347 bruit de végétation significatif. Sur le site nous n'avons pas remarqué de bruit de végétation et
348 cette impression a été confirmée en laboratoire.

349 Lors de l'extrapolation à 500 m de nos enregistrements sonores d'éoliennes à courte distance,
350 nous avons corrigé l'atténuation atmosphérique. L'enregistrement à proximité est pratique pour
351 obtenir un RSB élevé. Cette approche est similaire à [16]. Mais notre correction ne tient pas
352 compte de l'effet de sol et en particulier de la première interférence destructive (*ground dip*) [33].
353 L'effet de sol est moins prononcé pour les sources élevées comme les éoliennes que pour les sources
354 proches du sol comme les véhicules routiers. Néanmoins, l'effet de sol est susceptible de modifier
355 dans une certaine mesure la forme générale du spectre. Dans une étude ultérieure, l'effet de sol
356 pourrait être pris en compte, par exemple en calculant l'atténuation excédentaire correspondante
357 avec l'équation parabolique.

358 Le nombre de stimuli sonores proposés dans notre test d'écoute peut sembler limité. C'est
359 simplement la conséquence de la nécessité de proposer des stimuli individuels suffisamment longs
360 pour que l'auditeur puisse mieux s'imaginer être exposé à long terme au même son, et de la
361 nécessité de maintenir dans des limites raisonnables la durée totale du test d'écoute pour un sujet.
362 Néanmoins, les résultats obtenus sont cohérents avec une vaste méta-analyse réalisée sur la gêne
363 occasionnée par les sources de bruit dans l'environnement, bien que cette méta-analyse traite
364 principalement de bruits de transports et de situations où les niveaux de pression acoustique sont
365 plus élevés [34], c'est-à-dire que la gêne n'est que marginalement influencée par les niveaux de
366 pression acoustique résiduels et que le niveau de pression acoustique total est un facteur plus
367 important.

368 Notre étude s'est concentrée sur la gêne de court terme, ou désagrément. Une étude de terrain
369 serait nécessaire pour évaluer la gêne à long terme. Mais une telle étude soulèverait plusieurs
370 problèmes pratiques en raison de la difficulté de suivre les variations de l'émergence sonore sur
371 le terrain. En raison des distances typiques entre un parc éolien et la façade d'un bâtiment, le
372 rapport signal/bruit d'une mesure est susceptible d'être trop faible pour permettre une analyse
373 de l'émergence sonore. L'estimation de L_{res} de manière expérimentale impliquerait de coûteuses
374 mesures de longue durée. La procédure développée par Gallo et al. [35] pour séparer le bruit
375 résiduel du bruit particulier mériterait certainement d'être à considérée. Simuler l'émergence
376 sonore n'est pas théoriquement impossible, mais ce calcul demande beaucoup plus d'efforts que
377 de simuler la contribution acoustique d'un parc éolien car cela implique de modéliser une grande
378 variété de sources sonores présentes dans l'environnement [15].

379 **6 Conclusion**

380 A partir d'enregistrements de sons d'éoliennes et de sons résiduels, nous avons construit un
381 ensemble de paysages sonores synthétiques où les paramètres de contrôle sont le niveau de pression
382 acoustique et l'émergence sonore. Ces paysages sonores qui auraient pu être enregistrés dans de
383 nombreux endroits différents en Europe ont formé la base d'un test d'écoute. Pour une définition

384 spécifique de l'émergence sonore, les résultats du test indiquent que le désagrément causé par le
385 son des éoliennes est mieux prédit par les niveaux de pression acoustique pondérés A que par
386 l'émergence sonore. Avec les paysages sonores utilisés dans notre test d'écoute, il a également été
387 observé que l'émergence sonore était un mauvais prédicteur de l'audibilité des sons des éoliennes.

388 Bien que l'émergence sonore soit présente depuis des décennies dans un certain nombre de textes
389 juridiques et de lignes directrices en Europe et au niveau international, c'est à notre connaissance
390 la première fois qu'une évaluation systématique de cet indicateur *ceteris paribus* est réalisée. Des
391 travaux supplémentaires sont nécessaires pour confirmer nos résultats dans le contexte spécifique
392 du bruit des éoliennes. En outre, étant donné que l'émergence sonore n'est pas seulement utilisée
393 pour réglementer le bruit des éoliennes, il serait également intéressant d'étudier les mérites de cet
394 indicateur lorsqu'il est appliqué à d'autres sources de bruit de voisinage ou à des sources de bruit
395 industriel.

396 Références

- 397 [1] Joyce Lee and Feng Zhao. GWEC global wind report 2019. Technical report, Global Wind
398 Energy Council, Brussels, BE, mar 2020.
- 399 [2] Ivan Komusanac, Daniel Fraile, and Guy Brindley. Wind energy in europe in 2018. Technical
400 report, Wind Europe, feb 2019.
- 401 [3] P. J. Stallen. A theoretical framework for environmental noise annoyance. *Noise & Health*,
402 1(3) :69–80, 1999.
- 403 [4] Johannes Pohl, Joachim Gabriel, and Gundula Hübner. Understanding stress effects of wind
404 turbine noise - the integrated approach. *Energy Policy*, 112 :119 – 128, 2018.
- 405 [5] Eja Pedersen and Kerstin Persson Waye. Perception and annoyance due to wind turbine noise
406 - a dose-response relationship. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6) :3460–3470,
407 dec 2004.
- 408 [6] Eja Pedersen, Frits van den Berg, Roel Bakker, and Jeite Bouma. Response to noise from
409 modern wind farms in The Netherlands. *Journal of the Acoustical Society of America*,
410 126(2) :634–643, aug 2009.
- 411 [7] Sabine A. Janssen, Henrik Vos, Arno R. Eisses, and Eja Pedersen. A comparison between
412 exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other
413 noise sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(6) :3746–3753, dec 2011.
- 414 [8] John L. Davy, Kym Burgemeister, and David Hillman. Wind turbine sound limits : Current
415 status and recommendations based on mitigating noise annoyance. *Applied Acoustics*,
416 140 :288–295, 2018.
- 417 [9] Presidente del consiglio dei ministri. Decreto, limiti massimi di esposizione al rumore negli
418 ambienti abitativi e nell'ambiente esterno. *Gazzetta Ufficiale*, (57), mar 1991.

- 419 [10] Presidente del consiglio dei ministri. Decreto, determinazione dei valori limite delle sorgenti
420 sonore. *Gazzetta Ufficiale*, 280(1), dec 1997.
- 421 [11] Ministero dell’Ambiente e. della Tutela del Territorio. Circolare 6 settembre 2004 - interpre-
422 tazione in materia di inquinamento acustico : Criterio differenziale e applicabilità dei valori
423 limite differenziali. *Gazzetta Ufficiale*, 217, sep 2004.
- 424 [12] Premier ministre. Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d’électricité
425 utilisant l’énergie mécanique du vent au sein d’une installation soumise à autorisation au
426 titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de
427 l’environnement. *Journal Officiel de la République Française*, 202(14) :14539, sep 2011.
- 428 [13] World Bank. *Environmental, Health, and Safety General Guidelines (English)*. Number
429 112110. International Finance Corporation E&S - World Bank Group, Washington, D.C.,
430 apr 2007.
- 431 [14] World Bank. *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Wind Energy*. Number
432 110346. International Finance Corporation E&S - World Bank Group, Washington, D.C.,
433 apr 2015.
- 434 [15] Guillaume Dutilleux, Truls Gjestland, and Gaetano Licitra. Challenges of the use of sound
435 emergence for setting legal noise limits. *International Journal of Environmental Research
436 and Public Health*, 16(4517) :14, nov 2019.
- 437 [16] Karl Bolin, Gösta Bluhm, and Mats E. Nilsson. Listening test comparing A-weighted and
438 C-weighted sound pressure level as indicator of wind turbine noise annoyance. *Acta Acustica
439 united with Acustica*, 100(5) :842–847, sept 2014.
- 440 [17] Stéphanie Viollon, Catherine Marquis-Favre, Fabrice Junker, and Clément Baumann. Envi-
441 ronmental assessment of industrial noises annoyance with the criterion "sound emergence".
442 In *Proc ICA*, 2004.
- 443 [18] ISO. Acoustics, Description, measurement and assessment of environmental noise - Part
444 1 : Basic quantities and assessment procedures. Standard ISO 1996-1 :2016, International
445 Organization for Standardization, Geneva, CH, 2016.
- 446 [19] IEC. Wind turbines - Part 11 : Acoustic noise measurement techniques. Standard IEC
447 61400-11 Edition 3.1, International Electrotechnical Commission, Geneva, CH, jun 2018.
- 448 [20] Oda Linnea Ketilsdatter Wærås. Perception vs quantification of wind turbine noise. Master’s
449 thesis, NTNU, Trondheim, Norway, sep 2018.
- 450 [21] Erich Hau. *Windkraftanlagen - Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit (in German)*.
451 Springer, 6th edition, 2016.
- 452 [22] Philippe Glé and Guillaume Dutilleux. Détection des tonalités marquées : Implantation du
453 PAS 20065 et application (in French). Technical Report 2015-76-023, Cerema / DTerEst,
454 Strasbourg, France, jan 2016.

- 455 [23] ISO. Acoustics - Objective method for assessing the audibility of tones in noise - Engineering
 456 method. Standard ISO/PAS 20065, International Organization for Standardization, Geneva,
 457 CH, 2016.
- 458 [24] ISO. Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1 : Calculation of
 459 the absorption of sound by the atmosphere. Standard ISO 9613-1, International Organization
 460 for Standardization, Geneva, CH, 1993.
- 461 [25] Président de la République. Loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique
 462 pour la croissance verte. *Journal Officiel de la République Française*, 0189 :14263, aug 2015.
- 463 [26] Pierre Dutilleux and Joachim Gabriel. Ear training on wind turbine noise. In *Proceedings*
 464 *DEWEK*, page 5, Bremen, DE, nov 2010.
- 465 [27] ISO. Acoustics, Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys.
 466 Standard ISO/TS 15666, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2003.
- 467 [28] Karl Bolin, Mats E. Nilsson, and Shafiquzzaman Khan. The potential of natural sounds to
 468 mask wind turbine noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(1) :131–137, jan/feb 2010.
- 469 [29] Olivier Fégeant. Wind-induced vegetation noise. Part I : a prediction model. *Acta Acustica*
 470 *united with Acustica*, 85 :228–240, 1999.
- 471 [30] Olivier Fégeant. Wind-induced vegetation noise. Part II : Field measurements. *Acta Acustica*
 472 *united with Acustica*, 85 :241–249, 1999.
- 473 [31] Karl Bolin. Prediction method for wind-induced vegetation noise. *Acta Acustica united with*
 474 *Acustica*, 95 :607–619, 2009.
- 475 [32] Thomas Foken. *Micrometeorology*. Springer, 2008.
- 476 [33] Tony F. W. Embleton. Tutorial on sound propagation outdoors. *Journal of the Acoustical*
 477 *Society of America*, 100(1) :31–48, jul 1996.
- 478 [34] James M. Fields. Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential
 479 areas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(5) :2753–2763, may 1993.
- 480 [35] P. Gallo, Luca Fredianelli, D. Palazzuoli, Gaetano Licitra, and F. Fidecaro. A procedure for
 481 the assessment of wind turbine noise. *Applied Acoustics*, 114 :213–217, 2016.

482 7 Remerciements

483 Les auteurs tiennent à remercier le Pr Catherine Lavandier, laboratoire ETIS, Université de
 484 Cergy Paris, France pour ses conseils sur le test d’écoute; Tim Cato Netland, NTNU, qui a
 485 participé aux mesures de terrain et à la calibration de la chaîne de restitution; Oda Linnea
 486 Ketilsdatter Wærås et Marte Vadla qui ont effectué des les mesures à Smøla; et les volontaires
 487 qui ont participé au test d’écoute.