



**HAL**  
open science

# L'émergence sonore standardisée comme prédicteur de la gêne à court terme causée par le bruit des éoliennes

Guillaume Dutilleux, Elise Ruaud

## ► To cite this version:

Guillaume Dutilleux, Elise Ruaud. L'émergence sonore standardisée comme prédicteur de la gêne à court terme causée par le bruit des éoliennes. 2024. hal-04437654

**HAL Id: hal-04437654**

**<https://hal.science/hal-04437654v1>**

Submitted on 4 Feb 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 - NoDerivatives 4.0 International License

# L'émergence sonore standardisée comme prédicteur de la gêne à court terme causée par le bruit des éoliennes

Guillaume Dutilleux and Elise Ruaud

Groupe Acoustique, Département des systèmes électroniques, NTNU, Trondheim, 7491, Norvège <sup>a)</sup>

Alors que l'émergence sonore est utilisée dans plusieurs pays pour encadrer le développement de l'énergie éolienne, à ce jour il n'existe aucune preuve publiée de la pertinence de ce descripteur pour évaluer la gêne causée par le bruit éolien. Dans le présent travail, nous avons effectué deux tests d'écoute afin d'évaluer les mérites de l'émergence sonore. Trois définitions de l'émergence sonore ont été considérées : celle de la norme ISO 1996-1, l'émergence sonore *sous condition d'audibilité*  $e_{UAC}$ , et l'émergence *spectrale*  $e_{SP}$ . Nous avons également étudié le rapport bruit spécifique sur bruit résiduel et la sonie. Le corpus de stimuli sonores était constitué de 48 stimuli à 3 niveaux de pression acoustique pondérés A {30, 40, 50} dB et de 4 rapports spécifique/résiduel {-10, -5, 0, +5} dB. Les résultats permettent de conclure que la gêne à court terme est mieux prédite par le niveau de pression sonore total que par l'émergence sonore, quelle que soit la définition considérée pour l'émergence. La gêne à court terme est légèrement mieux prédite par  $e_{UAC}$  que par  $e$ , tandis que  $e$  est un meilleur prédicteur que  $e_{SP}$ . Le niveau de pression acoustique total et la sonie ont donné des résultats similaires. En outre, les résultats tendent à montrer que l'émergence sonore est un mauvais prédicteur de l'audibilité des éoliennes.

[<https://doi.org/DOI number>]

[XYZ]

Pages: 1–18

Cet article est la traduction française validée par les auteurs de Ruaud, E. and Dutilleux, G. (2023). *Sound emergence as a predictor of short-term annoyance from wind turbine noise*. Journal of the Acoustical Society of America, 153(2):925–939, <https://doi.org/10.1121/10.0017112>.

## I. INTRODUCTION

Plusieurs auteurs ont fourni des preuves empiriques montrant que le bruit des éoliennes peut être source de gêne (Janssen *et al.*, 2011; Michaud *et al.*, 2016b; Pedersen *et al.*, 2009; Pedersen and Waye, 2004; Pohl *et al.*, 2018; Schäffer *et al.*, 2016), même s'il est bien connu que le bruit n'explique qu'une petite partie de la variance de la gêne due aux activités bruyantes en général (Stallen, 1999) et à l'énergie éolienne en particulier (Haac *et al.*, 2019; Pohl *et al.*, 2018). Des études récentes affirment même que le niveau de pression acoustique n'est pas le prédicteur dominant de la gêne sonore, et mettent en évidence le rôle de la participation au projet ainsi que celui des nuisances visuelles dans la gêne sonore, parmi un certain nombre d'autres facteurs (Haac *et al.*, 2019). Néanmoins, l'acoustique reste un facteur clé dans l'acceptation de l'énergie éolienne par les riverains. Par conséquent, il convient d'examiner la pertinence de la métrique utilisée pour fixer les seuils réglementaires de

bruit. Certains auteurs ont également constaté que vivre dans une zone où l'on s'attend subjectivement à un faible niveau de bruit de fond est positivement associé à la gêne occasionnée par le bruit des éoliennes (Pedersen and Persson Waye, 2007). En outre, il a été observé que les sons naturels jugés agréables peuvent masquer les sons des éoliennes dans une certaine mesure, ce qui peut entraîner une réduction de la gêne (Bolin *et al.*, 2012). Cela conduit cette dernière recherche à suggérer de fixer des valeurs limites "en termes de niveaux relatifs au bruit de fond".

Dans le contexte particulier de la gestion du bruit des éoliennes, la plupart des pays s'appuient sur divers règlements fondés soit (1) sur le son *total* uniquement, soit (2) sur le son *spécifique* - ou son attribuable à la source - et le son *résiduel*, c'est-à-dire le son restant en l'absence du son attribuable à la source (Davy *et al.*, 2018; Hathaway and Kaliski, 2006). Mais certaines législations et directives préfèrent se fier à (3) l'*émergence sonore*  $e$ .

À notre connaissance, seuls deux pays dans le monde, à savoir l'Italie (Ministero dell'Ambiente e. della Tutela del Territorio, 2004; Presidente del consiglio dei ministri, 1991, 1997) et la France (Ministre de la Transition Ecologique et Solidaire, 2020; Premier ministre, 2011) spécifient des valeurs limites d'émergence sonore. Cependant, le concept d'émergence sonore apparaît implicitement dans les directives publiées par la Banque mondiale (World Bank, 2007, 2015) également. Par conséquent, l'émergence sonore est susceptible d'être utilisée dans de nombreux pays où les projets de parcs éoliens reçoivent

<sup>a)</sup>; [guillaume.dutilleux@ntnu.no](mailto:guillaume.dutilleux@ntnu.no)

des financements de la Banque mondiale. Ces directives spécifient une augmentation maximale des "niveaux de bruit de fond de 3 dB à l'emplacement du récepteur le plus proche". La valeur de 3 dB est toujours combinée à des valeurs limites exprimées en  $L_{eq}$  et s'applique au-delà des limites de propriété des installations bruyantes. Le critère de conformité actuel est que l'émergence doit être inférieure à 3 dB pour la nuit et à 5 dB pour le jour en Italie et en France (Ministre de la Transition Ecologique et Solidaire, 2020; Premier ministre, 2011; Presidente del consiglio dei ministri, 1997). L'évaluation sur le terrain de la conformité d'un parc éolien vis-à-vis de valeurs limites aussi basses n'est pas dénuée de difficultés (Dutilleux *et al.*, 2019). Cependant, le principal enjeu est le fondement psycho-acoustique de l'émergence sonore comme descripteur du bruit et comme prédicteur de la gêne sonore, s'il s'agit de protéger les riverains de la gêne due au bruit des éoliennes.

Dans le cadre de l'étude de la gêne due aux bruits des éoliennes, des courbes dose-réponse ont été développées pour les niveaux de pression acoustique pondérés A (Hongisto *et al.*, 2017; Janssen *et al.*, 2011; Pedersen and Wayne, 2004) et les avantages des niveaux de pression acoustique pondérés C par rapport aux niveaux de pression acoustique pondérés A ont également été évalués (Bolin *et al.*, 2014). Pourtant, il semble qu'il n'existe aucune preuve publiée qui justifie l'utilisation de l'émergence sonore normalisée comme alternative au niveau de pression acoustique dans le contexte de la gêne due aux sons des éoliennes (Dutilleux *et al.*, 2019).

Un premier article (Viollon *et al.*, 2004) traite d'un test d'écoute basé sur 24 sons synthétiques construits à partir de trois sons résiduels différents (calme à  $L_{Aeq} = 34$  dB, naturel à 40 dB et trafic routier à 50 dB) et de quatre sons industriels spécifiques différents dont une éolienne à deux émergences sonores ( $e = 3$  et  $e = 5$  dB). Les auteurs concluent que le degré de gêne à court terme est dépendant de la source à  $e$  constante et que  $e = 0$  dB n'implique pas que le son spécifique soit indétectable. En outre, ces auteurs déclarent que "... dans notre expérience, le critère légal français [émergence sonore] pour l'évaluation de l'impact sonore des sources industrielles n'était pas approprié et ne caractérisait pas la gêne sonore perçue". Dans (Viollon *et al.*, 2004), la conception du test d'écoute empêche d'évaluer la gêne à différents niveaux sonores *ceteris paribus* car le type de son résiduel utilisé est dépendant du niveau de pression acoustique.

Une autre recherche déjà mentionnée a étudié la réduction de la gêne - ou masquage de la gêne - et le masquage de l'intensité sonore des sons provenant de deux éoliennes différentes lorsqu'ils étaient mélangés à des sons naturels jugés agréables (Bolin *et al.*, 2012). Les quatre sons naturels considérés sont (1) des chants d'oiseaux, (2) des sons de végétation à feuilles caduques, (3) le bruit d'un ruisseau et (4) le bruit des vagues. Le niveau de pression sonore pondéré A des stimuli était compris entre 26 et 59 dB et les rapports signal/bruit entre -15 et +5 dB. Cette étude en laboratoire ne por-

taut pas explicitement sur l'émergence sonore normalisée, mais elle a mis en relation la gêne avec le rapport signal/bruit. Les auteurs rapportent des effets de masquage évidents lorsque le rapport signal/bruit est négatif et que le son masquant présente de faibles variations temporelles. De notre point de vue, les deux limites de cette étude sont, premièrement, l'utilisation de stimuli très courts (4 secondes) et, deuxièmement, l'accent mis sur les sons jugés agréables. L'utilisation de sons jugés agréables semble une perspective intéressante. Cependant, en général, le bruit de fond n'est pas sous notre contrôle et celui-ci peut contenir des composantes indésirables. De plus, dans la pratique, des variations temporelles sont susceptibles de se produire et cela peut compromettre les effets de masquage.

Plus récemment, un test d'écoute nommé  $T0$  pour référence ultérieure a été réalisé pour évaluer les mérites relatifs du niveau de pression acoustique et de l'émergence sonore comme prédicteurs de la gêne occasionnée par le bruit des éoliennes (Dutilleux and Fosset, 2020). Le deuxième auteur du présent article est un co-auteur de (Dutilleux and Fosset, 2020). Trois sons d'éoliennes, ou sons spécifiques,  $\{S0, S1, S2\}$  et un son résiduel  $R0$  ont été collectés et mélangés pour préparer un ensemble de paysages sonores synthétiques. La bibliothèque de stimuli était composée de 45 échantillons sonores de 30 secondes à trois niveaux de pression acoustique différents pondérés A  $\{35, 40, 50\}$  dB et de cinq rapports spécifique/résiduel  $\{-10, -5, 0, +5\}$  dB. Les échantillons de test étaient corrigés de l'atténuation atmosphérique sur 500 m mais n'incluaient pas d'effet de sol. Trente deux personnes ont évalué les échantillons d'essai dans une pièce à faible temps de réverbération équipée de haut-parleurs pour la restitution sonore. L'analyse statistique a mis en évidence que la gêne à court terme était mieux prédite par le niveau de pression acoustique pondéré A que par l'émergence sonore. Il a également été observé que l'émergence sonore ne permettait pas de prédire de manière fiable l'audibilité des sons d'éoliennes, étant donné qu'une partie significative des sujets pouvait détecter les sons d'éoliennes même lorsque l'émergence sonore était proche de 0 dB. Mais la nécessité de maintenir le test d'écoute en dessous d'une durée raisonnable a empêché de considérer plus d'un son résiduel et plus de trois sons d'éoliennes différents dans les échantillons de test, de sorte qu'il était souhaitable de prolonger l'étude. De plus, ces résultats ont été obtenus sur un nombre assez limité de sujets.

Compte tenu des limites de (Dutilleux and Fosset, 2020), le présent article rend compte de deux tests d'écoute réalisés en laboratoire. Son objectif est d'évaluer si l'émergence sonore est un meilleur prédicteur de la gêne à court terme - ou *désagrément* - que le niveau de pression acoustique total dans le cas particulier du bruit des éoliennes. Ces tests d'écoute supplémentaires ont permis de prendre en compte deux autres sons résiduels et trois autres sons spécifiques recueillis spécialement pour l'étude. Les tests ont également permis d'introduire l'effet de sol dans la simulation de la propagation

sonore. Outre la définition normalisée de l'émergence sonore, deux définitions alternatives ont été étudiées dans l'analyse statistique. Un deuxième objectif était d'évaluer la capacité de l'émergence sonore à prédire l'audibilité des sons des éoliennes. Bien que le présent article traite d'un indicateur de bruit qui dépend du son résiduel, il ne s'agit pas d'une étude approfondie du rôle du son résiduel dans la gêne due aux sons des éoliennes. En outre, la conception de prédicteurs alternatifs de la gêne à court terme sort du cadre de cet article.

Cet article est organisé comme suit. La section II fournit les définitions des différents paramètres dont la corrélation avec la gêne à court terme sera étudiée. La section III présente les méthodes. Elle se concentre sur la collecte d'échantillons de sons spécifiques et résiduels sur le terrain qui a été réalisée afin de fabriquer des stimuli avec un niveau de pression sonore total et un rapport spécifique/résiduel contrôlés, ainsi que sur la préparation des tests d'écoute. La section IV décrit les résultats obtenus. La section V discute (1) de la corrélation entre la gêne à court terme et les différentes mesures quantitatives considérées, (2) de la relation entre l'audibilité du son spécifique et l'émergence sonore et (3) de plusieurs aspects méthodologiques. La section VI conclut cet article.

## II. DÉFINITIONS

Dans la suite de cet article, un premier type d'émergence sonore  $e$  est défini comme :

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

Où  $L_{\text{tot}}$  est le niveau de pression acoustique de son total et  $L_{\text{res}}$  le niveau de pression acoustique de son résiduel. Il est utile d'introduire en outre  $L_{\text{spec}}$  pour le son spécifique, c'est-à-dire le niveau de pression acoustique attribuable à la source étudiée. Ici, ces quatre concepts d'émergence sonore, de son total, spécifique et résiduel sont utilisés tels que définis dans la norme actuelle ISO 1996-1 (Dutilleux et al., 2019; ISO, 2016b). Néanmoins, deux variantes de l'émergence sonore présentant un intérêt pratique sont introduites. La première est l'émergence dite *sous condition d'audibilité* qui est nulle lorsque le son spécifique est inaudible pour l'auditeur à l'emplacement du récepteur :

$$e_{\text{UAC}} = \begin{cases} e & \text{si le son spécifique est audible} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

Une telle définition constitue une interprétation commune de l'émergence sonore dans la norme française de mesure applicable aux bruits de voisinage (AFNOR, 1996).

Dans la suite, nous considérerons aussi l'émergence spectrale  $e_{\text{SP}}$  qui repose sur les niveaux de pression acoustique en bandes d'octave. Elle est définie par :

$$e_{\text{SP}} = \max \{L_{\text{tot,octf}} - L_{\text{res,octf}}\}, \quad (3)$$

$$f \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\} \text{ Hz}$$

En France, l' $e_{\text{SP}}$  était un critère de conformité pour les parcs éoliens avant qu'une nouvelle législation n'entre en vigueur en 2011. Avant cette date, la conformité des parcs éoliens était évaluée par rapport à la législation sur le voisinage (Premier ministre, 2006). A la connaissance des auteurs, il n'y a pas eu d'investigation systématique de l'impact de la suppression de  $e_{\text{SP}}$  de la liste des critères d'évaluation.

Si le son résiduel et le son spécifique ne sont pas corrélés, il est facile d'établir la relation suivante entre  $e$  et le rapport spécifique sur résiduel (SRR) (Dutilleux et al., 2019):

$$e = 10 \log_{10} \left( 1 + 10^{\frac{\text{SRR}}{10}} \right). \quad (4)$$

où

$$\text{SRR} = L_{\text{spec}} - L_{\text{res}} \quad (5)$$

Le SRR est utilisé dans la législation sur le bruit des éoliennes dans un certain nombre de pays (Davy et al., 2018; Hathaway and Kaliski, 2006), où le  $L_{AF90}$  sert souvent à estimer  $L_{\text{spec}}$  et  $L_{\text{res}}$ .

Le sonie  $L_N$  et ses variantes  $L_{N_5}$  et  $L_{N_{max}}$  telles que définies par Zwicker (Fastl and Zwicker, 2007; ISO, 2017b) ont aussi été évaluées en tant qu'alternatives possibles au  $L_{\text{tot}}$ , puisqu'il était attendu que des métriques fondées sur la sonie présentent une meilleure corrélation avec la gêne.

## III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans cette étude, l'approche générale a consisté à simuler l'exposition aux sons des éoliennes en extérieur en maîtrisant précisément le  $L_{\text{tot}}$  et le SRR. Le scénario d'exposition correspondait à une distance typique entre un parc éolien et une habitation en terrain plat. Les stimuli sonores utilisés dans le test d'écoute ont été obtenus en mélangeant (1) un enregistrement d'un son spécifique, c'est-à-dire le son d'une éolienne, dans une situation de rapport signal/bruit élevé et (2) un enregistrement de son résiduel. La convention de dénomination des sons spécifiques  $Sx$  et des sons résiduels  $Rx$  est cohérente avec les labels utilisés dans (Dutilleux and Fosset, 2020) mais la numérotation a été choisie pour éviter les chevauchements, pour faciliter la discussion.

Comme les sons spécifiques ont été enregistrés près de la source, il a été nécessaire de les pré-traiter pour tenir compte des effets de propagation et des tonalités occasionnelles avant de les combiner avec un son résiduel. Les sections III A-III I détaillent les différentes étapes de la préparation des tests d'écoute, de leur réalisation et de leur analyse statistique.

Puisque les amplitudes relatives des sons résiduels et spécifiques recueillis vont être modifiées pour produire une gamme d'émergences sonores et une gamme

de niveaux sonores, le calibrage de la chaîne de mesure est surtout pertinent pour s'assurer que les signaux originaux ne vont pas subir une amplification trop importante. Cela pourrait aboutir à des niveaux sonores trop élevés pour être plausibles et à des stimuli irréalistes. Par conséquent, des ordres de grandeur d'amplitude pour le niveau de pression acoustique sont suffisants, et une procédure de calibrage non standard peut être employée.

### A. Enregistrement de sons d'éoliennes

Les sons des éoliennes ont été recueillis dans deux parcs éoliens: Storheia et Bessakerfjellet, tout deux situés dans le commune d'Åfjord, en Norvège. Par référence à la norme pour la mesure de la puissance acoustique des éoliennes (IEC, 2018), la campagne d'enregistrement a été réalisée à proximité des éoliennes afin d'assurer un rapport signal/bruit élevé. Plusieurs enregistrements ont été effectués pour différentes éoliennes et à différents angles par rapport à la direction du vent. La Table I fournit des informations sur les campagnes de mesures et les parcs éoliens.

Toutes les acquisitions ont été réalisées avec un microphone à condensateur 1/2" 200 V de classe 1 (Brüel and Kjær type 4165) connecté à un préamplificateur (Norsonic type 336) avec un filtre passe-haut à 20 Hz. Le préamplificateur servait de frontal à un enregistreur audio numérique (Sound Devices type 722). Les enregistrements ont été réalisés avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz et une résolution de 24 bits. Une calibration a été effectuée avant et après chaque session d'enregistrement avec un calibre de classe I (Norsonic type Nor1256). Le microphone était monté à fleur sur une plaque rigide circulaire de 1 m de diamètre posée sur le sol. Une boule anti-vent standard de 9 cm de diamètre coupée en deux a été utilisé comme écran anti-vent primaire et un écran anti-vent secondaire hémisphérique de 75 cm de diamètre (Microtech Gefell type GFM920) a été utilisé pour réduire davantage le bruit induit par le vent sur le microphone. Les raisons de ce choix de configuration de microphone dans le contexte de la préparation d'un test d'écoute ont été discutées ailleurs (Dutilleux and Fosset, 2020). Durant les enregistrements, la vitesse du vent a été mesurée à 1.5 m de hauteur avec un anémomètre tenu à la main (Windmate type WM-100). De plus, les exploitants des parcs éoliens ont fourni les valeurs de vitesse de vent à hauteur de moyen correspondant à l'heure à laquelle les enregistrements ont été réalisés.

Les enregistrements ont été effectués en septembre 2020 en journée. D'après la couverture nuageuse (2/8) observée sur le site, les conditions pendant les enregistrements appartenaient à la classe de stabilité 1 ((ISO, 2017a)). Dans les deux parcs éoliens, le sol était un patchwork de gravier, de rochers et de végétation rase, telle que de la mousse ou de l'herbe courte de quelques centimètres de haut. Le bruit dû à la végétation rase était négligeable et les enregistrements ont eu lieu sur des sites

très éloignés de toute autre infrastructure bruyante. Par conséquent, on peut considérer que le bruit enregistré était clairement dominé par les éoliennes.

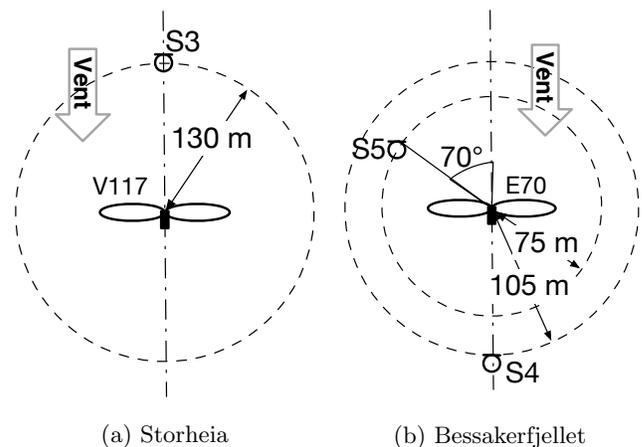


FIG. 1. Positions de microphone retenues pour les enregistrements utilisés lors des tests d'écoute.

### B. Prétraitement des sons des éoliennes

Les sons des éoliennes ont été recueillis à proximité des turbines afin de maximiser le rapport signal/bruit. Cependant l'objectif était d'obtenir des stimuli dont le contenu spectral soit proche de ce que l'on peut ressentir à une distance plus réaliste du parc dans un scénario typique sous le vent, où le parc éolien est en vue directe des éoliennes. La distance entre le parc éolien et l'habitation supposée a été fixée à 1000 m. Par conséquent, les sons bruts des éoliennes ont été prétraités pour tenir compte des altérations spectrales causées par la propagation sonore. Considérant que la gêne sonore engendrée par les tonalités sort du cadre de ce travail, les tonalités ont également été supprimées des enregistrements lors du prétraitement. Aucune correction n'a été appliquée pour compenser les pertes causées par le second écran anti-vent.

L'atténuation atmosphérique à 1000 m a été calculée selon la norme ISO 9613-1 ((ISO, 1993)). Le filtre correspondant a été appliqué dans le domaine fréquentiel. Afin de prendre en compte l'influence de la réfraction vers le bas et de l'effet de sol, un filtre a été créé en utilisant une adaptation du logiciel de tracé de rayons Bellhop (Porter and Bucker, 1987) à la propagation sonore dans l'atmosphère (Hussain and Dutilleux, 2020). Pour les besoins de la simulation, les hypothèses supplémentaires suivantes ont été faites : au-dessus d'un sol plat, la hauteur de la source considérée était celle de l'éolienne enregistrée à Storheia (Table I) et le récepteur a été placé à 2 m de hauteur. Un profil de vitesse du son indépendant de la distance a été calculé en utilisant la théorie de similitude de Monin-Obukhov pour le cas W3S4 (ISO, 2017a). Un modèle d'impédance de sol à porosité variable a été

| Parc éolien   | Storheia             | Bessakerfjellet             |
|---|----------------------|-----------------------------|
| <i>Description</i>  |                      |                             |
| Année de mise en service  | 2019                 | 2008                        |
| Nombre de turbines  | 80                   | 25                          |
| Fabricant de turbines   | Vestas               | Enercon                     |
| Type de turbine   | V117                 | E70/2300                    |
| Puissance électrique nominale (MW)                                      | 3.6                  | 2.3                         |
| Hauteur du moyeu (m)  | 87                   | 64.5                        |
| Diamètre du rotor (m)   | 117                  | 71                          |
| <i>Campagnes d'enregistrement</i>                                       |                      |                             |
| Vitesse de vent à la hauteur de moyeu pendant les enregistrements (m/s) | 9.7-10.7             | 7.0-8.0                     |
| Enregistrements sélectionnés pour les tests d'écoute                    | Figure 1(a) Storheia | Figure 1(b) Bessakerfjellet |

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

supposé, avec des valeurs correspondant à un terrain de type lande (Attenborough *et al.*, 2011).

Les composantes tonales occasionnelles ont d'abord été détectées en utilisant à la fois l'écoute et un programme Python (Glé and Dutilleux, 2016) qui met en œuvre une procédure standardisée pour la détection de tonalité (ISO, 2016a). Les tonalités ont ensuite été filtrées dans le domaine fréquentiel en utilisant une procédure décrite ailleurs (Dutilleux and Fosset, 2020).

### C. Enregistrement des sons résiduels

Le premier son résiduel R1 était un enregistrement monophonique de sons de végétation composée de bosquets et d'herbes hautes qui a été réalisé à Dragvoll (Trondheim, Norvège) à 1 m de hauteur lors d'une journée venteuse de septembre 2020. La vitesse du vent à cette hauteur variait entre 1,0 et 2,5 m/s. Les enregistrements ont été effectués à l'aide d'un microphone omnidirectionnel prépolarisé de 1 pouce (AKG type CK2) monté sur un préamplificateur 48 V (AKG type C460B) dans un pare-vent à cadre rigide (Rycote type Cyclone). Ici, les enregistrements n'ont pas été calibrés car l'embout de calibre approprié n'était pas disponible pour le microphone choisi. Au lieu de cela, le niveau de pression acoustique a été contrôlé à côté du point d'enregistrement avec un sonomètre de classe 1 (type Norsonic Nor150) protégé par un pare-vent standard de 9 cm. Le sonomètre a été calibré avant et après la session de mesure avec un calibre de classe 1 (Norsonic type Nor1256). Le  $L_{Aeq}$  pour R1 était de 44 dB. Le signal audio a été stocké sur un enregistreur audio numérique (Sound Devices type 722) à une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz et une résolution de 24 bits.

Le deuxième enregistrement monophonique du son résiduel R2 a été réalisé à Berg (Trondheim, Norvège) dans une zone résidentielle par une journée sans vent, en juin 2019. Le paysage sonore était dominé par la ville et la circulation sur une autoroute située à plusieurs centaines de mètres. Le matériel utilisé était un enregistreur portable (Sony type PCM D100) doté de microphones cardioïdes intégrés à une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz et une résolution de 16 bits. L'enregistrement n'a pas été étalonné pendant la collecte du second son résiduel, mais les valeurs des réglages de gain ont été conservées. Un calibrage approximatif a été effectué ultérieurement dans la chambre anéchoïque de NTNU (fréquence de coupure de 100 Hz) avec un haut-parleur (Genelec type 1029A) émettant un son de 1 kHz. Les microphones de l'enregistreur étaient situés à côté d'un sonomètre de classe 1 (Norsonic type Nor150) à 1,75 m de la source. Sur cette base, le  $L_{Aeq}$  pour R2 était égal à 53 dB environ.

### D. Échantillons de sons résiduels et spécifiques sélectionnés

Les quatre sons spécifiques  $S3$ ,  $S4$ ,  $S5$  et  $S6$  ont été sélectionnés à partir des enregistrements de sons d'éoliennes pour générer les stimuli :  $S3$  a été enregistré face au vent dans le parc éolien de Storheia,  $S4$  correspond à une position sous le vent à Bessakerfjellet et  $S5$  a été enregistré sur une autre éolienne Bessakerfjellet à  $70^\circ$  par rapport à la direction du vent (Table I). Le son spécifique  $S6$  provient du même enregistrement que  $S5$  mais a été post-traité de manière légèrement différente. Pour cet extrait sonore, la propagation a été simulée sans effet de sol afin d'évaluer l'influence de ce phénomène sur la gêne à court terme. Un aperçu des caractéristiques des

trois sons bruts d'éoliennes *avant* les corrections pour la tonalité et la propagation sonore est donné à la figure 2.

Tous les sons bruts d'éoliennes contenaient des tonalités à des fréquences allant de 130 Hz à 8 kHz. La procédure utilisée a permis de les éliminer. De plus, une claire fluctuation ou "swish" peut être entendue dans *S5* (Figure 2(f) Son spécifique *S5*) et *S6*, tandis que *S3* (Figure 2(b) Son spécifique *S3*) et *S4* (Figure 2(d) Son spécifique *S4*) peuvent être décrits comme des sons plus stables.

Le son résiduel *R1*, qui correspond au son du vent dans la végétation, avait un spectre très large et aucune tonalité. Il contenait principalement le son large bande du vent dans les feuilles et les hautes herbes, combiné aux cris sporadiques d'une pie bavarde (*Pica pica*). Dans *R2*, le bruit de la circulation pouvait être entendu dans le lointain ainsi que des cris de moineaux domestiques (*Passer domesticus*) à proximité. Deux tonalités autour de 4,0 et 10,2 kHz étaient légèrement audibles et provenaient d'une pompe à chaleur. La densité spectrale du signal et un spectrogramme sont présentés à la figure 2. Bien que *R1* et *R2* aient été recueillis en Norvège, les deux sons résiduels auraient pu être enregistrés dans de nombreux autres endroits en Europe. En particulier, les deux espèces d'oiseaux qui peuvent être entendues sont des espèces communes avec une large aire de répartition.

Le son spécifique et le son résiduel sélectionnés sont subjectivement exempts de tout bruit induit par le vent sur le microphone.

## E. Mélange des sons résiduels et spécifiques

Comme expliqué à la section III B, les sons éoliens ont été nettoyés de toute composante tonale occasionnelle et leur spectre de fréquence a été extrapolé à une distance de 1000 m. Le son spécifique a ensuite été combiné avec le son résiduel pour créer une gamme de stimuli avec une émergence sonore spécifiée  $e$  (Eq. 1) et un niveau de pression sonore total spécifié  $L_{\text{tot}}$ . La métrique utilisée pour évaluer à la fois  $L_{\text{tot}}$ ,  $L_{\text{spec}}$  et  $L_{\text{res}}$  est le  $L_{Aeq}$  calculé sur la durée du stimulus sonore.

À la lumière des valeurs typiques pour  $L_{\text{tot}}$  (Hongisto *et al.*, 2017; Michaud *et al.*, 2016a) et des valeurs limites pour  $e$  pour les façades exposées aux sons des éoliennes, trois valeurs de  $L_{\text{tot}}$  ont été choisies à 30, 40 et 50 dB(A) et quatre valeurs de  $SRR$  (Eq. 5) ont été fixées à -10, -5, 0 et 5 dB. Ces dernières valeurs correspondent à  $e$  à 0,4, 1,2, 3,0 et 6,2 dB à la décimale près. Le  $SRR$  a été jugé plus pratique que  $e$  lorsqu'il s'agit de préparer les stimuli car la plage de variation de  $e$  est limitée à 3 dB pour les valeurs négatives de  $SRR$ . Chaque test d'écoute a reposé sur un seul son résiduel.  $T1$  était basé sur *R1* et  $T2$  sur *R2*. Cela signifie que pour les deux tests d'écoute, 48 combinaisons différentes de son spécifique,  $L_{\text{tot}}$  et  $e$  ont été utilisées.

## F. Equipements et salle utilisés pour les tests

La pièce choisie pour les tests d'écoute est une ancienne salle de réception d'un laboratoire d'essai dédié à la mesure de l'indice d'affaiblissement de matériaux de construction. Elle est en forme de boîte à chaussures, de dimensions  $5.87 \times 4.88 \times 4$  m. La pièce est isolée des vibrations du reste du bâtiment où elle se trouve. Les seules ouvertures sont de lourdes doubles portes en acier qui étaient fermées pendant les tests d'écoute. La pièce n'a pas de fenêtre et est visuellement neutre. Pendant les tests d'écoute, la pièce était occupée par divers équipements de laboratoire.

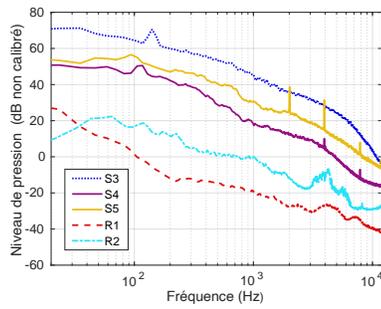
Le niveau de pression acoustique équivalent pondéré A dans la pièce a été mesuré en mai 2021 à l'aide d'un sonomètre de classe I calibré (Norsonic type Nor150) couplé à un microphone à condensateur de 1 pouce à faible bruit propre (Bruel & Kjaer type 4144) et un préamplificateur 200 V (Norsonic type Nor1201) pendant les mêmes créneaux horaires que ceux utilisés pour le test d'écoute. Les  $L_{Aeq,1s}$  n'ont montré que des fluctuations mineures. Avec un niveau équivalent de bruit de fond pondéré A de 17.5 dB, la pièce a été jugée appropriée pour la présentation de stimuli à 30 dB au casque audio.

Le test d'écoute s'est appuyé sur un logiciel développé dans un projet de recherche précédent décrit ailleurs (Dutilleux and Fosset, 2020). L'interface utilisateur n'effectue aucun traitement sur les stimuli acoustiques qui ont préalablement été préparés et stockés au format mono PCM 48 kHz 24 bits.

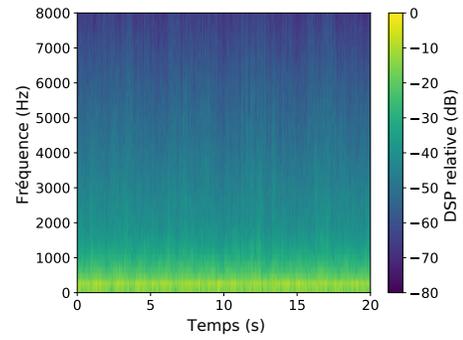
La chaîne de reproduction sonore calibrée était composée de (1) un ordinateur portable (Dell type Vostro), (2) une carte son externe (Roland Studio Capture type UA1610) et un casque audio électrodynamique circum-aural ouvert (Beyerdynamic type DT990 Pro). Pour les besoins des tests d'écoute, la réponse en fréquence du casque a été mesurée avec une tête artificielle (Neumann type KU100) et un filtre inverse a été appliqué pour égaliser la réponse en fréquence de 100 à 6000 Hz. Dans cette plage de fréquence, la réponse en fréquence corrigée du casque correspondait aux recommandations en matière d'audiométrie (IEC, 2017).

## G. Protocole du test d'écoute

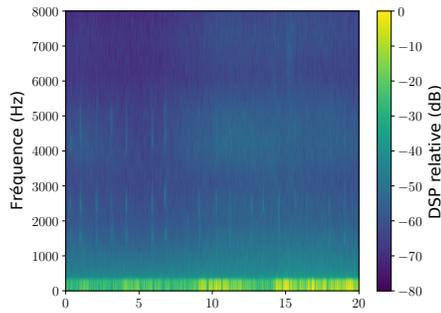
L'interface utilisateur du logiciel guide le participant tout au long du test d'écoute. En commençant par la collecte de données personnelles, elle présente les stimuli et enregistre les réponses des participants pour traitement ultérieur. Le logiciel contrôle la reproduction des différents stimuli dans un ordre aléatoire qui varie d'un sujet à l'autre. L'interface utilisateur contrôle également le matériel audio tout en recueillant les réponses du sujet concernant la gêne à court terme et l'audibilité des sons des éoliennes pour chaque stimulus. Chaque sujet écoute les stimuli un par un. La tâche est introduite par la consigne "Imaginez que vous habitez à proximité d'un parc éolien et que parfois, lorsque vous êtes à l'extérieur ou que vous avez une fenêtre ouverte, vous entendez ce



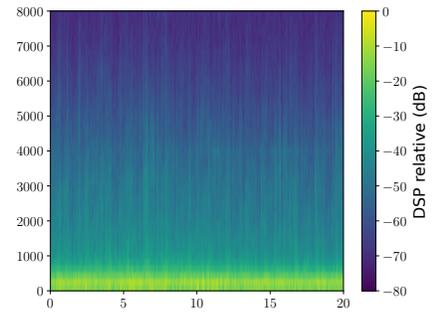
(a) Spectres fréquentiels des sons spécifiques et résiduels



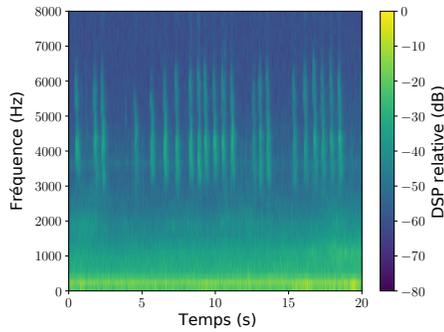
(b) Son spécifique  $S3$



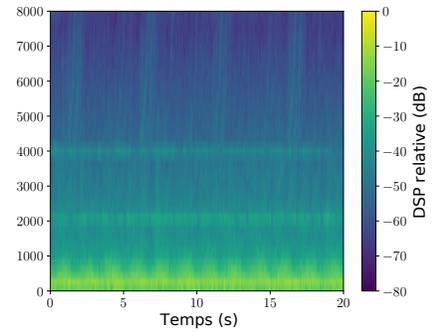
(c) Son résiduel  $R1$



(d) Son spécifique  $S4$



(e) Son résiduel  $R2$



(f) Son spécifique  $S5$

FIG. 2. Vue d'ensemble des signaux sélectionnés pour construire les stimuli des tests d'écoute. Pour les sons spécifiques, les figures sont produites à partir des signaux bruts, *i.e.* avant application de l'atténuation atmosphérique, de l'effet de sol et l'élimination des éventuelles tonalités. Sur la figure 2(a) Spectres fréquentiels des sons spécifiques et résiduels, l'amplitude des spectres est arbitraire. La légère tonalité présente dans  $S4$  (figures 2(a) Spectres fréquentiels des sons spécifiques et résiduels et 2(d) Son spécifique  $S4$ ) peut être observée autour de 4 kHz. Les figures 2(a) Spectres fréquentiels des sons spécifiques et résiduels et 2(f) Son spécifique  $S5$  pour  $S5$  montrent des composantes tonales autour de 2 et 4 kHz et le swish de la turbine. Dans les sons résiduels  $R1$  (figure 2(c) Son résiduel  $R1$ ) et  $R2$  (figure 2(e) Son résiduel  $R2$ )), les transitoires sont des cris d'oiseaux. La tonalité au-dessous de 4 kHz attribuable à une pompe à chaleur est visible dans (figure 2(a) Spectres fréquentiels des sons spécifiques et résiduels) et (figure 2(e) Son résiduel  $R2$ ) pour  $R2$ .

son. Dans quelle mesure ce son vous dérangerait-il, sur une échelle de 0 à 10 ? Notez votre désagrément”. Le sujet peut décider quand diffuser le prochain stimulus sonore mais n’est pas autorisé à le rejouer ni à revenir en arrière. La gêne à court terme est évaluée à l’aide de l’échelle standard ISO 15666 (ISO, 2003) qui est affichée par l’interface graphique. En ce qui concerne l’audibilité, les sujets répondent s’ils ont entendu une éolienne dans le stimulus qui vient d’être présenté, avant de passer au stimulus suivant.

Par rapport à la collecte de données personnelles, le protocole a été approuvé par le Centre norvégien des données de recherche (NSD - *Norsk Senter for Forskningsdata* - numéro de dossier 813181).

## H. Participants aux tests

Les sujets ont été recrutés principalement parmi les étudiants de l’Université norvégienne des sciences et techniques (NTNU, Trondheim, Norvège) par mail et par des annonces sur les réseaux sociaux. Il n’a pas été demandé aux sujets de passer un test audiométrique mais de déclarer toute déficience auditive.

Pour chaque test d’écoute, 30 sujets se déclarant sans problèmes d’audition ont été recrutés. Les deux groupes de 30 sujets étaient des ensembles disjoints. 11 femmes et 19 hommes ont participé au premier test d’écoute ( $T1$ ), 10 femmes et 20 hommes au second test d’écoute ( $T2$ ). L’âge des sujets allait de 20 à 35 ans avec un âge médian de 23,5 ans dans le cas de  $T1$ . De façon similaire les sujets étaient âgés de 20 à 41 ans avec un âge médian de 25 ans dans le cas de  $T2$ . Lors de  $T1$ , 14 nationalités (parmi lesquelles 78 % d’Européens) étaient représentées, pour 13 nationalités (dont 57 % en d’Européens) lors de  $T2$ . Respectivement, 10 et 7 participants ont signalé une expérience préalable des sons d’éoliennes dans chaque test d’écoute lors de  $T1$  et  $T2$ .  $T1$  a été réalisé en avril 2021 et  $T2$  en mai 2021.

## I. Analyses statistiques

Lors du post-traitement, nous avons réalisé une analyse ANOVA pour examiner les effets de l’émergence sonore, le niveau de pression sonore, le son résiduel et les différents sons spécifiques sur la gêne à court terme. La correction de Greenhouse-Geisser a été utilisée pour rectifier le manque de sphéricité. De plus, nous avons effectué des régressions linéaires en prenant la gêne à court terme comme variable dépendante et une ou deux métriques de bruit comme variables indépendantes. Dans les tests statistiques, une  $p$ -value inférieure à 0,05 a été considérée comme statistiquement significative. Un t-test complémentaire a également été réalisé pour caractériser la différence entre les stimuli avec une correction de Bonferroni.

L’analyse statistique a été réalisée en parallèle par chaque co-auteur, soit dans R-4.2.0 (en utilisant le paquet *afex* version 1.1.1), soit dans Julia (version 1.5 avec les paquets ANOVA 0.1.0 et GLM 1.1.1). Le

calcul des métriques liées à la sonie a été effectué avec l’implémentation logicielle qui accompagne une des normes ISO sur le sujet (ISO, 2017b).

## IV. RESULTATS

### A. Désagrément

Le test ANOVA a montré que l’influence du son résiduel n’est pas statistiquement significative pour la gêne à court terme ( $p = .48$ ), voir [Table III](#). Ainsi, les données des deux tests  $T1$  et  $T2$  sont traitées simultanément dans l’ANOVA ce qui a permis d’augmenter la puissance de l’analyse.

La figure 3 présente les diagrammes en boîte à moustaches de la gêne à court terme pour les quatre valeurs de  $e$  (Equation 1) considérées dans cette étude. Dans les deux tests d’écoute, la progression des médianes autant que les régressions linéaires montrent que la gêne à court terme est une fonction faiblement croissante de  $e$ . Les pentes positives associées correspondent à un point dans l’échelle de la gêne par augmentation de 5 dB de  $e$ , et les  $\beta^*$  sont égaux respectivement à 0.13 et 0.14. Il existe une grande dispersion dans les évaluations de la gêne, avec un écart interquartile toujours supérieur à 4.8 unités sur l’échelle de gêne. En outre le pourcentage de variance expliquée est faible ( $R^2 = 0.02$ ). Tous les détails des régressions sont rassemblés dans la [Table II](#).

Le test ANOVA a confirmé un effet statistiquement significatif de  $e$  sur la gêne à court terme ( $p < .001$ ,  $F(1.6, 90.2) = 38.2$ ), voir [Table III](#). La même analyse a été réalisée pour le désagrément et  $L_{tot}$ . L’ANOVA a montré un effet significatif de  $L_{tot}$  ( $F(1.5, 87.3) = 811.2$ ,  $p < .001$ ). Les diagrammes de boîtes à moustaches correspondant aux trois valeurs de  $L_{tot}$  considérées dans cette étude sont présentés [Figure 4](#). Les résultats de la régression linéaire où la variable indépendante est  $L_{tot}$  indiquent une forte dépendance du désagrément vis-à-vis du  $L_{tot}$  (voir [Table II](#)). La pente est égale à 0.29 ( $R^2 = 0.64$ ) pour  $T1$  et 0.30 ( $R^2 = 0.62$ ) pour  $T2$ .  $\beta^*$  vaut 0.79 pour les deux régressions. Quant à la dispersion, les écarts interquartiles constatés étaient toujours inférieurs à 3 unités sur l’échelle de désagrément.

Nous avons également calculé des régressions linéaires pour chaque son spécifique de  $S3$  à  $S6$ . En regardant les régressions linéaires ([Figure 3](#) et [Figure 4](#)), les sons spécifiques  $S5$  - avec effet de sol- et  $S6$  - sans effet de sol- semblent être légèrement plus gênants que  $S3$ . Le test ANOVA a en effet montré que le son spécifique avait un effet significatif sur le niveau de désagrément, voir [Table III](#) ( $F(2.1, 124.3) = 7.2$ ,  $p < .001$ ). Cependant, la faible taille d’effet de 0.005 qui correspond au facteur stimuli dans l’ANOVA ([Table III](#)) doit aussi être prise en compte. Il montre que l’influence du type de son spécifique sur la gêne est limitée.

Plus précisément, un t-test réalisé sur les différents sons d’éoliennes a révélé que le score de désagrément pour  $S5$  et  $S6$  était significativement différent de  $S3$ . Ceci confirme l’examen visuel des régressions linéaires. On

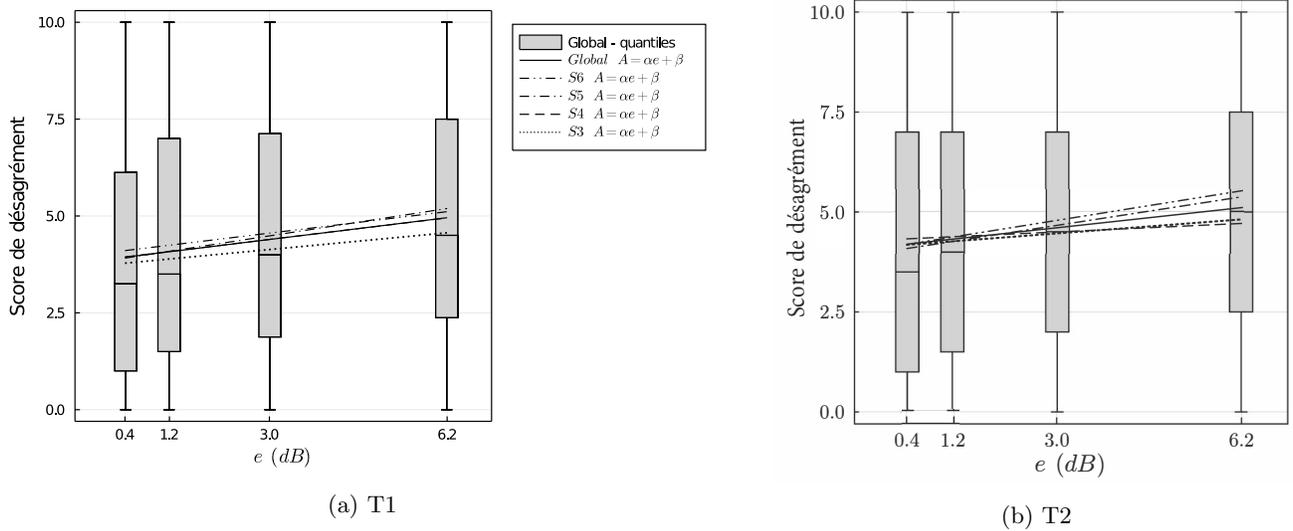


FIG. 3. Score de gêne à court terme en fonction de l'émergence sonore.

peut aussi observer que les statistiques ne diffèrent pas entre  $S5$  et  $S6$ , bien que l'effet de sol ne soit pas pris en compte dans  $S6$ , contrairement à  $S5$ .

L'impact du type de son spécifique sur le score de désagrément augmente avec l'émergence (Figure 3). Cette interaction entre l'émergence et le type de stimulus est confirmée par l'ANOVA (Table III) ( $F(7.8, 451.5) = 2.6, p = .01$ ).

La Figure 5 illustre la dépendance relative du désagrément vis-à-vis de  $e$  et  $L_{tot}$ . On peut constater que  $L_{tot}$  a un effet plus important sur le désagrément. Les variations de  $e$  semblent avoir plus d'impact sur le désagrément aux niveaux sonores faibles. La Figure 5 illustre également les interactions entre  $e$  et  $L_{tot}$ . Ces interactions sont évaluées comme statistiquement significatives par le test ANOVA Table III ( $F(5.2, 302.6) = 4.5, p < .001$ ): plus basse est l'émergence, plus forte est l'influence du niveau de pression acoustique.

Puisque les effets de  $e$  et  $L_{tot}$  sur le désagrément sont tous les deux statistiquement significatifs, nous avons effectué une régression multi-linéaire en prenant  $e$  et  $L_{tot}$  comme variables indépendantes. Cependant, si l'on compare avec la régression linéaire où  $L_{tot}$  est la seule variable indépendante (RMSE=1.89 pour  $T1$ ), le modèle à deux variables n'apporte qu'une amélioration marginale de la prédiction du désagrément (RMSE=1.85 pour  $T1$ ). Des variations similaires de RMSE sont observées pour  $T2$  (Table II).

Quant à l'émergence spectrale  $e_{SP}$  obtenue à partir de niveaux sonores équivalents en bandes d'octave (Eq. 3), il n'est pas possible de conduire un test ANOVA parce que les sons spécifiques ont des valeurs d' $e_{SP}$  différentes. Avec une différence maximale de 3.7 dB, entre  $S3$  et  $S6$ , à  $e = 5$  dB et  $L_{tot} = 50$  dB dans  $T2$ , les conditions d'application du test ne sont pas remplies pour cette variable. Cependant, il est possible de calculer

des régressions linéaires (Table II). On peut alors constater que les coefficients standardisés  $\beta^*$  pour  $e_{SP}$  sont encore plus faibles que pour  $e$ . Ce résultat est en accord avec le diagramme en boîtes à moustaches présenté Figure 6. Il est bien visible que, malgré une tendance générale dans les variations du désagrément en fonction de  $e_{SP}$  où les très faibles valeurs de  $e_{SP}$  correspondent à un désagrément plus faible et les valeurs très élevées de  $e_{SP}$  correspondent à un désagrément plus élevé, la corrélation est moins bonne dans la gamme des valeurs intermédiaires de  $e_{SP}$ . La plage de variation de  $e_{SP}$  est de 11 dB, ce qui représente environ le double de la plage de variation de  $e$  dans cette étude, quel que soit le test. Par définition,  $e_{SP}$  est obtenue à partir des calculs de  $e$  par bandes d'octave de 125 Hz à 4 kHz. Toutefois, dans notre cas, la bande d'octave de 250 Hz était toujours celle qui présentait la plus grande valeur d'émergence sonore, quel que soit le couple  $(S_x, R_y)$  analysé.

Les diagrammes en boîte à moustaches obtenus avec le SRR comme variable indépendante ne sont pas reproduits ici. Ils sont très similaires à ceux obtenus avec  $e$  comme variable indépendante (Figure 3). La différence la plus notable est la pente plus faible  $\beta = 0.07, R^2 = 0.02$  pour  $T1$  par rapport à  $e$ . Cependant, la pente plus faible peut s'expliquer par la plage de variation relativement plus importante du SRR par rapport à  $e$  et les coefficients standardisés sont les mêmes ( $\beta^* = 0.13$  pour  $T1$ ). Des valeurs similaires ont été obtenues pour  $T2$  (Table II).

Lorsque la métrique de la sonie est choisie comme variable indépendante, les résultats de la même analyse statistique pour les trois indicateurs considérés dans cette étude sont très similaires (Table II). Aussi seuls ceux relatifs à  $L_N$  seront donnés ici. Comme pour  $L_{tot}$ , les scores de désagrément pour  $T1$  et  $T2$  sont moins dispersés avec  $L_N$  autour des médianes qu'avec  $e$  (Table II). La régression linéaire renvoie des pentes qui sont in-

|   | $(\beta_i)$                      | $\alpha$       | $(\beta_i^*)$                    | RMSE        | $R^2$       |
|---|----------------------------------|----------------|----------------------------------|-------------|-------------|
| $\beta \cdot L_{\text{tot}} + \alpha$                     | 0.29 — 0.30                      | -7.4 — -7.6    | 0.79 — 0.80                      | 1.89 — 1.85 | 0.62 — 0.64 |
| $\beta \cdot e + \alpha$                                  | 0.18 — 0.16                      | 3.9 — 4.1      | 0.13 — 0.14                      | 3.03 — 3.08 | 0.02 — 0.01 |
| $\beta \cdot e_{\text{UAC}} + \alpha$                     | 0.25 — 0.25                      | 3.7 — 3.7      | 0.19 — 0.19                      | 3.00 — 3.00 | 0.04 — 0.04 |
| $\beta \cdot e_{\text{SP}} + \alpha$                      | 0.12 — 0.06                      | 3.8 — 4.3      | 0.12 — 0.10                      | 3.04 — 3.09 | 0.01 — 0.00 |
| $\beta \cdot \text{SRR} + \alpha$                         | 0.07 — 0.06                      | 4.5 — 4.7      | 0.13 — 0.14                      | 3.03 — 3.08 | 0.02 — 0.01 |
| $\beta \cdot L_N + \alpha$                                | 0.23 — 0.24                      | -9.5 — -9.6    | 0.78 — 0.79                      | 1.91 — 1.89 | 0.61 — 0.63 |
| $\beta \cdot L_{N_{\text{max}}} + \alpha$                 | 0.25 — 0.27                      | -11.5 — -12.6  | 0.78 — 0.79                      | 1.91 — 1.91 | 0.61 — 0.62 |
| $\beta \cdot L_{N_5} + \alpha$                            | 0.25 — 0.25                      | -10.8 — -11.12 | 0.78 — 0.79                      | 1.91 — 1.89 | 0.61 — 0.63 |
| $\beta_L \cdot L_{\text{tot}} + \beta_e \cdot e + \alpha$ | (0.29, — (0.30,<br>0.18) — 0.16) | -7.9 — -8.0    | (0.79, — (0.80,<br>0.13) — 0.14) | 1.8 — 1.82  | 0.63 — 0.65 |

TABLE II. Résultats des régressions linéaires. Dans chaque cellule, la valeur à gauche (resp. droite) correspond à  $T1$  (resp.  $T2$ ). Ceci est valable aussi pour la dernière colonne qui concerne un modèle à deux variables indépendantes ( $\beta_L \cdot L_{\text{tot}} + \beta_e \cdot e + \alpha$ ): la valeur du dessous est celle de  $\beta_e$  la valeur du dessus celle de  $\beta_L$ .

| Variable                          | d.f        | MSE | F     | $\eta^2$ | p-value |
|-----------------------------------|------------|-----|-------|----------|---------|
| Son résiduel                      | 1, 58      | 64  | 0.5   | <.01     | .48     |
| $L_{\text{tot}}$                  | 1.5, 87.3  | 14  | 811.2 | .65      | <.001   |
| $e$                               | 1.6, 90.2  | 7   | 38.2  | .04      | <.001   |
| Son spécifique                    | 2.1, 124.3 | 3   | 7.2   | <.01     | <.001   |
| Son résiduel : $L_{\text{tot}}$   | 1.5, 87.3  | 14  | 0.2   | <.01     | .77     |
| $L_{\text{tot}} : e$              | 5.2, 302.6 | 2   | 4.5   | <.01     | <.001   |
| Son résiduel : Son spécifique     | 2.1, 123.3 | 3   | 0.6   | <.01     | 0.55    |
| Son résiduel : $e$                | 1.6, 90.2  | 7   | 0.2   | <.01     | .80     |
| Son spécifique : $e$              | 7.8, 451.5 | 2   | 2.6   | <.01     | .01     |
| Son spécifique : $L_{\text{tot}}$ | 5.1, 296.9 | 2   | 0.7   | <.01     | .63     |

TABLE III. Résultats du test ANOVA,  $\eta^2$  est la taille de l'effet généralisé.

termédiaires ( $\beta = 0.23$  pour  $T1$ ). Leurs valeurs sont comprises entre celles obtenues avec  $e$  et  $L_{tot}$  comme variable indépendante, alors que les coefficients de détermination ( $R^2 = 0.61$  pour  $T1$ ) sont aussi élevés que ceux obtenus avec  $L_{tot}$  (Table II). Les coefficients normalisés ( $\beta^* = 0.78$  pour  $T1$  et  $\beta^* = 0.79$  pour  $T2$ ) sont légèrement inférieurs à ceux obtenus pour  $L_{tot}$ .

## B. Audibilité

A partir des réponses à la question "Pouvez-vous entendre une éolienne ?", nous avons également testé la corrélation entre la gêne à court terme et l'émergence sonore sous condition d'audibilité  $e_{UAC}$  (voir Equation 2). Chaque test représente 1440 réponses au total. Les sujets ont entendu une éolienne 1191 fois durant  $T1$  et 1168 fois durant  $T2$ . À la Figure 7, on peut voir que la gêne à court terme n'augmente pas systématiquement avec  $e_{UAC}$  lorsque le son spécifique est audible mais que la gêne est beaucoup plus faible lorsque les sujets ne détectent pas les éoliennes.

En plus de permettre le calcul de  $e_{UAC}$ , les réponses à la question "Pouvez-vous entendre une éolienne ?" permettent de calculer les taux d'audibilité pour les différents stimuli sonores présentés. Comme on peut s'y attendre, les sons des éoliennes sont plus facilement détectables lorsque l'émergence sonore augmente (Figure 8). Mais la capacité des sujets à détecter un son d'éolienne dépend également fortement de  $L_{tot}$  pour les valeurs inférieures de  $e$  dans le cas de  $T1$  (Figure 8). Alors que la tendance globale est que la variation du taux d'audibilité empirique est une fonction croissante de  $L_{tot}$ , la dépendance n'est pas parfaitement monotone pour  $e = 3.0$  et  $e = 6.2$  dB. De plus, même pour l'émergence sonore la plus faible  $e = 0.4$  dB et le  $L_{tot}$  le plus faible considérés dans notre étude, le taux d'audibilité est assez élevé, soit 47 % pour  $T1$  et 56 % pour  $T2$ . En ce qui concerne l'audibilité moyenne pour tous les stimuli, nous avons trouvé un taux plus élevé de 5 % pour les stimuli basés sur  $S5$  et un taux plus élevé de 7 % pour les stimuli basés sur  $S6$ .

## V. DISCUSSION

### A. Désagrément

La principale conclusion de notre étude est que le  $L_{tot}$  prédit beaucoup mieux que  $e$  la gêne à court terme causée par les sons des éoliennes. Même si la corrélation entre la gêne à court terme et  $e$  est statistiquement significative,  $e$  apparaît comme un descripteur de second ordre. Les régressions linéaires entre la gêne à court terme et les deux indicateurs montrent que, tant pour  $T1$  que pour  $T2$ , les coefficients  $R^2$  et les pentes sont plus élevés pour le  $L_{tot}$  que pour  $e$  tandis que les  $RMSE$  sont plus faibles. En outre, le  $\beta^*$  est six fois plus élevé pour le  $L_{tot}$ . Les réponses des sujets sont également moins dispersées dans les régressions entre  $L_{tot}$  et le désagrément (Figure 4) que dans les régressions entre  $e$  et le désagrément (Figure 4). Enfin, le test ANOVA révèle une meilleure

corrélation entre la gêne à court terme et  $L_{tot}$  également, avec une valeur  $F$  plus élevée que celle correspondant à  $e$ .  $L_{tot}$  explique également beaucoup plus de variance de la gêne que  $e$ , avec une taille d'effet généralisé de 0.65 pour  $L_{tot}$  et 0.04 pour  $e$ .

Par conséquent, le lien entre  $L_{tot}$  et la gêne à court terme est plus fort que celui entre  $e$  et la gêne à court terme. Ceci est cohérent avec d'autres expériences récentes portant sur les bruits d'éoliennes (Schäffer *et al.*, 2016) qui ont montré que la gêne à court terme est également fortement liée au  $L_{tot}$ . Plus généralement, la contribution relativement mineure du son résiduel à la gêne a également été soulignée par une vaste méta-analyse d'enquêtes socio-acoustiques sur la gêne causée par le bruit dans l'environnement, bien que les résultats de recherche analysés ne couvrent pas le bruit éolien (Fields, 1998).

En outre, un modèle linéaire où la gêne à court terme est prédite par  $L_{tot}$  seul n'est pas significativement amélioré par l'ajout de  $e$  comme deuxième variable indépendante. Par conséquent, si l'on doit ne retenir qu'un seul descripteur,  $L_{tot}$  devrait être préféré parmi ces deux variables indépendantes.

En utilisant le modèle linéaire avec  $L_{tot}$  comme seule variable indépendante (Table II) à  $L_{tot} = 35$  dB, les notes de gêne de 2.8-2.9 sur l'échelle à 11 points de la norme ISO 15666 (ISO, 2003) sont similaires à celles d'autres tests effectués en laboratoire (Schäffer *et al.*, 2016). L'extrapolation du même modèle à  $L_{tot} = 55$  dB conduit à des notes de gêne de 8.6-8.9, ce qui est également similaire aux recherches précédentes (Schäffer *et al.*, 2016). À  $L_{tot}$  constant, seul un effet mineur du son spécifique sur la gêne à court terme pour  $S3$  à  $S6$  a été constaté. Ceci est en accord avec (Dutilleux and Fosset, 2020) où il y avait peu de différence dans l'évaluation de la gêne entre les trois sons spécifiques considérés.

Par rapport à  $T0$  (Dutilleux and Fosset, 2020), les résultats de  $T1$  et  $T2$  concernant les mérites relatifs de l'émergence sonore et du niveau de pression acoustique sont presque identiques, bien que (a) un autre ensemble de stimuli basés sur différents types de turbines provenant de différents parcs éoliens ait été utilisé pour construire les bibliothèques de stimuli sonores, (b) la gamme de  $L_{tot}$  considérée ne soit pas identique, (c) le système de reproduction sonore utilisé soit différent, avec des écouteurs au lieu de haut-parleurs, (d)  $T1$  et  $T2$  ne partagent aucun sujet avec  $T0$ . Si  $R2$  et  $R0$  présentent certaines similitudes, la nature de  $R1$  est différente car elle est dominée par le bruit de la végétation induit par le vent. En outre, les sons de  $S0$  à  $S2$  ont été obtenus à une vitesse de vent assez faible à la hauteur du moyeu, tandis que  $S3$  à  $S5$  correspondent à des vitesses de vent plus de deux fois supérieures.

Alors que (Dutilleux and Fosset, 2020) considéraient  $e$  comme la seule définition possible de l'émergence sonore, deux variantes de  $e$  - à savoir  $e_{UAC}$  et  $e_{SP}$  - ont été évaluées dans la présente étude. La corrélation entre la gêne et  $e_{UAC}$  a légèrement augmenté lorsque l'audibilité a été prise en compte. Mais la relation entre  $e_{UAC}$  et

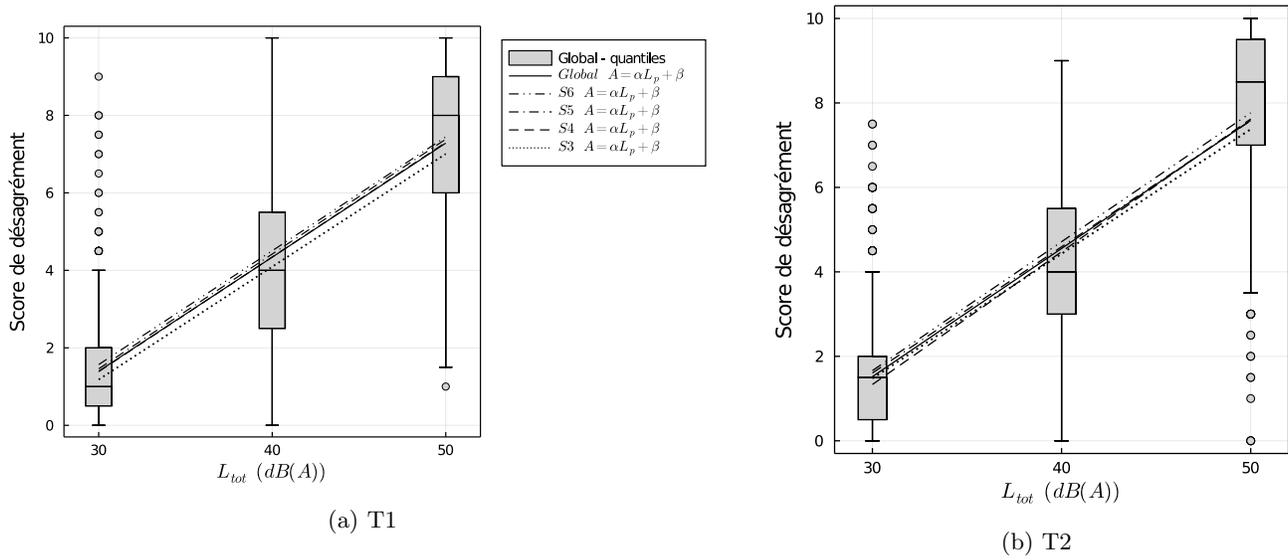


FIG. 4. Score de gêne à court terme en fonction du niveau de pression acoustique.

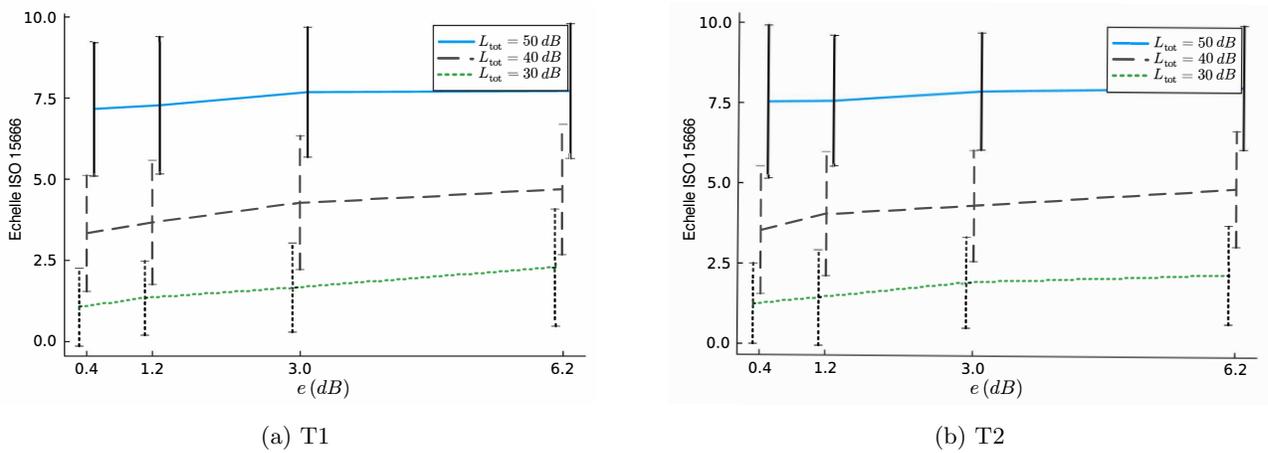


FIG. 5. Score de désagrément en fonction de l'émergence sonore pour différents niveaux de pression acoustique. Pour des raisons de lisibilité, les séries de données sont légèrement décalées horizontalement afin d'éviter les chevauchements.

la gêne à court terme s'est révélée non linéaire. Elle est principalement sous le contrôle de l'audibilité, avec une influence relativement faible du SRR, car la plupart des variations de la gêne à court terme apparaissent autour de  $e_{UAC} = 0$  dB. En outre,  $e_{UAC}$  serait plus difficile à utiliser dans la pratique en raison de la nécessité de décider de l'audibilité. Lorsque  $e_{SP}$  était utilisée, la corrélation avec la gêne à court terme était plus faible, bien que la plage de variation de  $e_{SP}$  soit plus grande que celle de  $e$ . Ceci suggère que la décision d'éliminer  $e_{SP}$  de la législation française sur le bruit des éoliennes a été sans conséquences négatives.

La faible corrélation entre la gêne à court terme et les différentes formes d'émergence considérées dans cette étude, et de même entre la gêne à court terme et les SRR, suggère que s'appuyer sur des indicateurs qui dépendent des  $L_{res}$  n'est pas nécessairement bénéfique par rapport aux indicateurs basés uniquement sur  $L_{tot}$ .

Dans la recherche de modèles linéaires alternatifs à une variable pour mieux prédire la gêne à court terme, le niveau sonore  $L_N$  et ses deux variantes  $L_{N_{max}}$  et  $L_{N_5}$  semblaient des candidats pertinents en raison de leur capacité à se rapprocher d'un  $L_{tot}$  perçu. Nous avons toutefois constaté qu'ils ne sont pas plus performants que  $L_{tot}$ . En gardant à l'esprit que la gamme de niveaux de pression acoustique étudiée ici est proche de la courbe de sonie à 40 phones qui a été utilisée pour définir la pondération A, il ne faut pas s'étonner que  $L_N$  et  $L_{tot}$  présentent des performances similaires. Étant donné que  $L_N$  est plus complexe à calculer (ISO, 2017b) que  $L_{Aeq}$ , l'utilisation de  $L_N$  pour prédire la gêne n'est pas justifiée dans le cas présent.

Pour résumer les résultats de notre analyse du potentiel de différents indicateurs pour prédire la gêne à court terme, le remplacement le plus évident de  $e$  pour évaluer la gêne due au bruit des éoliennes est le  $L_{tot}$  estimé par le niveau de pression acoustique équivalent pondéré A, malgré les limites bien connues de ce dernier indicateur en général et dans le cas spécifique de l'énergie éolienne (Haac et al., 2019; Persson Waye and Öhrström, 2002).

La difficulté ici est que les causes de la gêne sonore due aux éoliennes ne peuvent être prises en compte par un modèle à une seule variable. Il est bien connu que d'autres facteurs que le  $L_{tot}$  jouent un rôle dans la gêne à court terme, parmi lesquels les composantes tonales (Oliva et al., 2017; Yokoyama et al., 2016) ou la fluctuation périodique du niveau de pression acoustique - souvent appelée "modulation d'amplitude" par souci de concision - (Pohl et al., 2018; Schäffer et al., 2018). D'autres auteurs ont souligné la contribution relativement mineure de la modulation d'amplitude (Schäffer et al., 2016), alors qu'une plus grande dispersion des scores de gêne a été observée dans des recherches antérieures (Persson Waye and Öhrström, 2002), en fonction des stimuli sonores. Toutefois, cette dernière publication, a pris en compte des turbines de puissance inférieure à 1 MW et des turbines à deux et trois pales. La présente étude a constaté un effet des caractéristiques spectro-temporelles des sons spécifiques sur la gêne à court terme qui est

beaucoup plus faible que celui du  $L_{tot}$ . Ces autres facteurs pourraient intervenir sous la forme d'une correction appliquée à un estimateur de  $L_{tot}$  pour définir un niveau d'évaluation (ISO, 2016b). Ceci est susceptible d'améliorer la prédiction de la gêne à court terme. Mais, cela dépasse le cadre de notre étude.

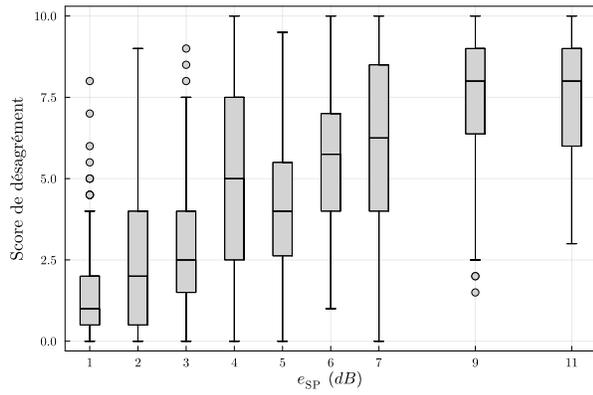
## B. Audibilité

Étant donné que  $e$  ne reflète pas l'intensité de l'exposition au bruit, une interprétation possible de l'utilisation de  $e$  lors de la fixation des valeurs limites dans la législation est que  $e$  refléterait l'audibilité d'une source sonore dans l'environnement. Cependant, dans les deux tests  $T1$  et  $T2$ , une grande partie des sujets ont été capables d'entendre l'éolienne dans des situations de  $SRR$  qui correspondent à  $e$  aussi faible que 0.4 dB. Ces résultats sont en accord avec les conclusions de (Dutilleul and Fosset, 2020) et ils soulèvent la question de la pertinence psycho-acoustique des seuils d'émergence sonore de 3 dB ou 5 dB que l'on trouve dans les législations nationales et les directives internationales existantes qui s'appuient sur cet indicateur pour fixer des limites de bruit. Cette question a été soulignée dans (Viollon et al., 2004), et elle est discutée plus en détail dans (Dutilleul and Fosset, 2020).

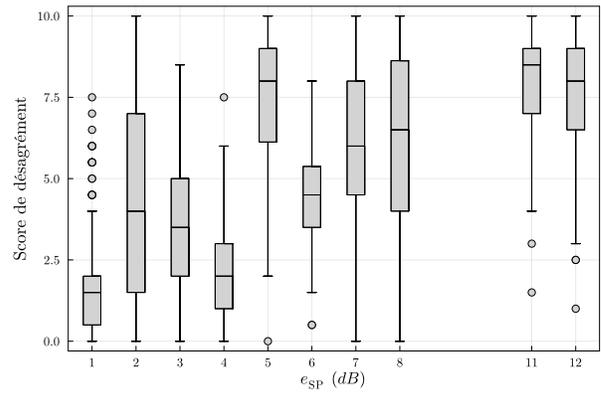
Il existe des différences évidentes entre les taux d'audibilité trouvés dans  $T1$  et  $T2$ , en particulier pour les deux plus faibles valeurs de  $e$  considérées. Cela reflète l'influence du son résiduel en tant que masque potentiel. À  $e$  constant,  $R1$  semblait masquer les sons d'éolienne plus efficacement que  $R2$ , probablement parce que la densité spectrale de puissance de  $R1$  était plus plate que celle de  $R2$  dans la gamme de fréquences où l'audition humaine est la plus sensible. Comme mentionné précédemment,  $R1$  est dominé par le bruit du feuillage dans le vent. Qualitativement, cela concorde avec les preuves existantes de la capacité du bruit de la végétation à masquer les sons des éoliennes (Bolin et al., 2010). En outre,  $R1$  était plus stable que  $R2$  avec moins d'instant de silence relatif.

Les taux d'audibilité plus élevés trouvés pour  $S5$  et  $S6$  suggèrent qu'un paramètre spécifique à la source, tel que la modulation d'amplitude est associé à des taux de détection plus élevés. La modulation d'amplitude est clairement visible sur la Figure 2(f) Son spécifique  $S5$ . Là encore, cela correspond à la littérature existante.

Les taux d'audibilité obtenus suggèrent également que l'influence de l'émergence sonore sur la détection est plus importante à des niveaux de pression acoustique plus faibles qu'à des niveaux de pression acoustique plus élevés. Alors que  $e$  semble être en corrélation avec la détectabilité de l'éolienne pour  $L_{tot} = 30$  dB, les sujets ont presque systématiquement détecté l'éolienne indépendamment de  $e$  pour  $L_{tot} = 50$  dB. De même, il existe une corrélation entre  $L_{tot}$  et la détectabilité de l'éolienne quand  $e$  est faible tandis que l'influence de  $L_{tot}$  devient négligeable quand  $e$  atteint 6 dB. Pour  $e = 6$  dB, l'éolienne a effectivement été détectée presque

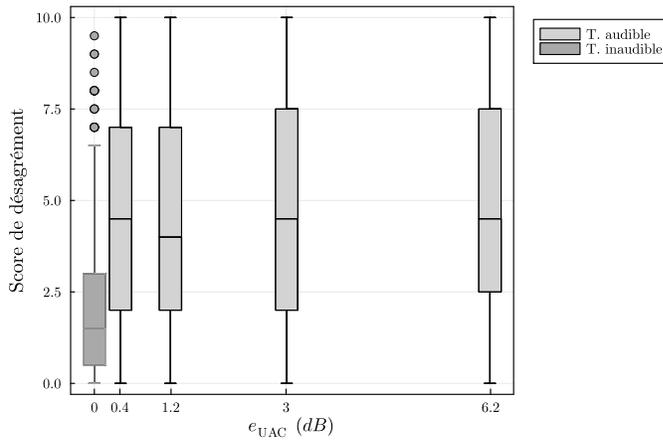


(a) T1

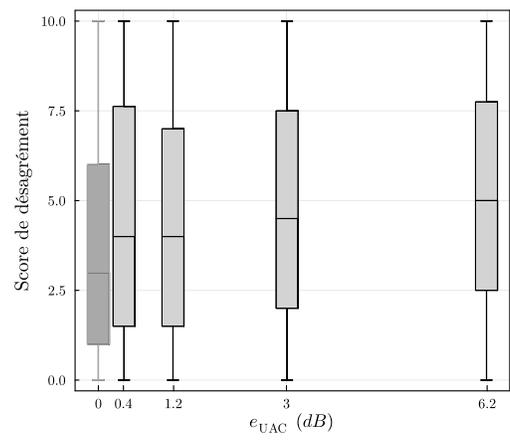


(b) T2

FIG. 6. Gène de court terme évaluée en fonction de l'émergence spectrale pour  $T1$  et  $T2$ . L'émergence spectrale correspond à l'octave centrée autour de 250 Hz, qui est l'octave ayant l'émergence maximale dans les deux tests.



(a) T1



(b) T2

FIG. 7. Évaluation de la gène à court terme en fonction de l'émergence sous condition d'audibilité.

systématiquement par tous les sujets. À cet égard, alors que nous avons constaté que le niveau de pression acoustique était un bon prédicteur de l’audibilité, comme dans les recherches précédentes (Haac *et al.*, 2019), dans notre étude, l’émergence et le niveau de pression acoustique semblent se compléter jusqu’à un certain point lorsqu’il s’agit de prédire l’audibilité du son des éoliennes.

La comparaison des taux d’audibilité (Figure 8(b) T2) avec le désagrément en fonction de  $e$  (Figure 3) et  $L_{\text{tot}}$  (Figure 4) suggère qu’il n’y a pas de lien clair entre l’audibilité et la gêne à court terme. D’autres auteurs ont affirmé que ces deux aspects sont affectés par des facteurs distincts (Haac *et al.*, 2019). Dans T1 et T2, des taux élevés d’audibilité ont été observés à  $e = 6, 2$  dB et  $L_{\text{tot}} = 30$  dB, alors que la gêne moyenne était faible. Une fois encore, cela soulève la question de la pertinence des seuils de 3 ou de 5 dB que l’on trouve dans la législation existante.

### C. Aspects méthodologiques

Notre étude n’a évalué que le désagrément, ou gêne à court terme, car la durée des stimuli n’était que de 20 s pour une durée totale du test d’écoute de 25 minutes afin que les sujets restent concentrés (Nordtest, 2002). Dans la vie réelle, l’exposition aux sons des éoliennes est de longue durée. Néanmoins, la durée du stimulus sonore était suffisamment longue pour enregistrer plusieurs rotations des turbines étudiées. De plus, la durée choisie pour les stimuli semble bien se situer dans la fourchette de valeurs trouvées dans la littérature pour les tests d’écoute relatifs à la perception des sons des éoliennes (Alamir *et al.*, 2019).

Bien que les sujets aient été invités à se projeter dans une situation à long terme lorsqu’ils évaluaient leur niveau de gêne, on ne peut pas affirmer que leur réaction serait identique après une longue exposition à un parc éolien. Une étude en laboratoire comme la nôtre ne peut pas remplacer complètement une étude de terrain. Une telle étude sur le terrain soulèverait toutefois de sérieuses difficultés, en raison de la nécessité de mesurer l’émergence sonore dans la position des récepteurs où le rapport signal/bruit serait généralement très faible (Dutilleux *et al.*, 2019), ce qui entraîne de grandes incertitudes. S’appuyer sur la prédiction du bruit au lieu de la mesure ne serait pas possible non plus, car l’incertitude de la prédiction serait trop grande pour prédire  $e$  (Dutilleux *et al.*, 2019).

Dans notre étude, un casque audio a été utilisé pour la reproduction du son. Pendant le calibrage, les fréquences inférieures à 100 Hz n’ont pas été prises en compte. En dessous de 100 Hz, il n’est donc pas possible d’évaluer la fidélité de la reproduction des échantillons sonores qui ont été acquis avec une chaîne d’enregistrement qui présente une fréquence de coupure inférieure à 20 Hz. Cependant, les casques ne sont pas parfaitement adaptés à la reproduction de la partie basse du spectre audio. Or, les sons spécifiques comme les sons résiduels contiennent beaucoup d’énergie en dessous

de 100 Hz (Figure 2(a) Spectres fréquentiels des sons spécifiques et résiduels). Cette partie du spectre peut contribuer à la gêne globale, et les sons des éoliennes sont connus pour être riches en basses fréquences dans la gamme 20-200 Hz (Møller, 2011).

En outre, la limitation de la durée du test d’écoute a conduit également à restreindre le nombre de stimuli sonores proposés dans nos tests d’écoute, et on peut se demander ce qui peut être déduit d’un petit ensemble de stimuli contrôlés. Néanmoins, lorsque la présente étude et (Dutilleux and Fosset, 2020) sont combinées, elles représentent une variété de 5 turbines modernes à axe horizontal provenant de 4 parcs éoliens différents. De plus, ces turbines ont été présentées aux sujets dans trois ambiances sonores différents.

Une variabilité supplémentaire par rapport à l’étude précédente (Dutilleux and Fosset, 2020) a été introduite dans notre étude par une tentative de prise en compte des modifications spectrales causées par l’effet de sol. Une limitation ici est qu’un effet de sol constant a été simulé. En réalité, l’effet de sol est sujet à fluctuation en raison de la variabilité des conditions atmosphériques, et de la variation cyclique de la distribution des hauteurs des sources au-dessus du sol lorsque les pales de l’éolienne sont en rotation. La prise en compte de ce phénomène est susceptible d’augmenter les taux d’audibilité des éoliennes, toutes choses étant égales par ailleurs.

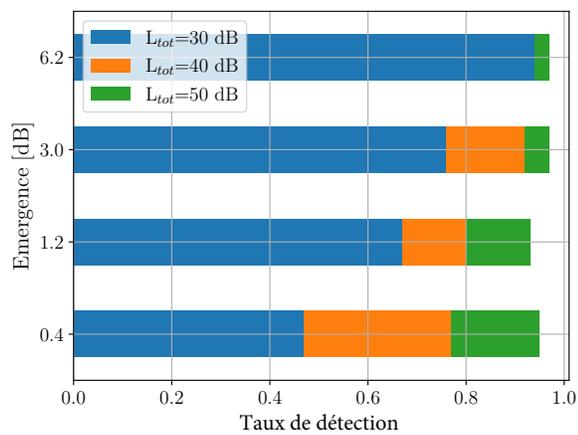
Un défaut possible de notre évaluation de  $e_{\text{SP}}$  en tant que prédicteur de la gêne à court terme est que toutes les combinaisons de sons spécifiques et résiduels envisagées dans les deux tests d’écoute ont conduit à une valeur d’ $e_{\text{SP}}$  obtenue à partir de la bande d’octave de 250 Hz. La corrélation entre l’émergence spectrale  $e_{\text{SP}}$  et la gêne pourrait être plus forte si des bandes d’octave plus élevées avaient une incidence sur  $e_{\text{SP}}$ .

Les tests d’écoute sur lesquels se base cet article ont été principalement conçus pour étudier la gêne et non la détection du bruit des éoliennes. Une analyse plus approfondie serait nécessaire pour mieux appréhender ce sujet. Une limitation potentielle de notre étude est l’absence de stimuli de contrôle, c’est-à-dire de stimuli sans bruit d’éolienne.

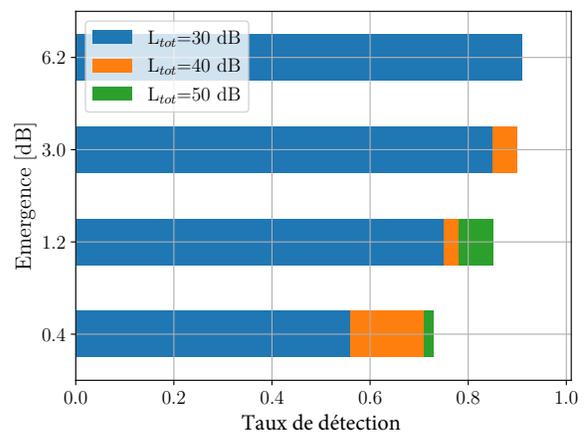
## VI. CONCLUSION

À partir d’enregistrements de sons d’éoliennes et de sons résiduels, nous avons construit deux ensembles de paysages sonores synthétiques, où les paramètres de contrôle sont le niveau de pression acoustique total et le rapport spécifique/résiduel. Ces paysages sonores, qui auraient pu être enregistrés dans de nombreux endroits différents en Europe, ont constitué la base de deux tests d’écoute qui rendent compte des situations avec et sans vent en un point récepteur hypothétique.

À la lumière des résultats des tests d’écoute, (1) l’émergence sonore standard  $e$  n’a pas d’influence majeure sur la gêne à court terme, bien que la corrélation entre l’émergence sonore standard et la gêne à court terme soit statistiquement significative ; (2) en ce qui concerne



(a) T1



(b) T2

FIG. 8. Taux d'audibilité, en fonction de l'émergence  $e$  et du niveau de pression acoustique total  $L_{tot}$ . Sur cette figure, les barres ne sont pas empilées mais superposées. Pour une valeur spécifiée de  $e$ , la barre représentant le taux d'audibilité pour  $L_{tot} = 50$  dB est d'abord affichée, avant que la barre pour  $L_{tot} = 40$  dB soit ajoutée. La barre pour  $L_{tot} = 30$  dB est affichée en dernier. En d'autres termes, le taux d'audibilité pour un  $L_{tot}$  spécifique peut être lu à l'extrémité droite de la zone rectangulaire correspondante.

$e$ , les deux définitions alternatives de l'émergence sonore  $e_{UAC}$  et  $e_{SP}$  évaluées ici n'apportent pas d'amélioration nette, si tant est qu'il y en ait une, à la corrélation entre l'émergence sonore et la gêne à court terme ; (3) la gêne à court terme due aux éoliennes est beaucoup mieux prédite par le niveau de pression acoustique total que par l'émergence sonore. Ces conclusions sont valables lorsque les deux indicateurs,  $e$ ,  $e_{UAC}$  et  $e_{SP}$  sont basés sur des niveaux de pression acoustique équivalents. De plus, le remplacement du niveau de pression acoustique par la sonie n'améliore pas la corrélation avec la gêne à court terme.

Il semble que l'émergence sonore standard fondée sur les niveaux de pression acoustique équivalents ne permettent pas de tenir compte de la contribution du son résiduel à la gêne provenant des sons des éoliennes, et qu'une métrique alternative doit être développée pour tenir compte du rôle du son résiduel dans la gêne qui a été observé par plusieurs auteurs.

Avec les stimuli sonores utilisés dans nos tests d'écoute, il a été également observé que l'émergence sonore était un mauvais prédicteur de l'audibilité des sons des éoliennes. En effet, même pour les valeurs de l'émergence sonore qui sont proches de la limite inférieure de cet indicateur, plus de 4 sujets sur 10 ont pu détecter l'éolienne dans les différents stimuli proposés.

L'émergence sonore a été introduite dans un certain nombre de textes juridiques et de directives en Europe et au niveau international, apparemment sans évaluation systématique des mérites de cette métrique. Les résultats obtenus ici concordent avec ceux d'une étude précédente - lesquels ont été obtenus avec différents stimuli, avec une méthode de reproduction sonore différente et avec différents sujets - pour remettre en question la pertinence de l'émergence sonore lorsqu'il s'agit d'évaluer l'impact environnemental des éoliennes. Les deux études combinées représentent plus de 90 sujets, 3 sons résiduels différents qui couvrent diverses situations, et 6 sons spécifiques différents provenant d'éoliennes modernes.

A la connaissance des auteurs, la réglementation basée sur la référence au niveau de pression acoustique résiduel et le rapport spécifique/résiduel ne reposent pas non plus sur de solides preuves scientifiques. Notre étude suggère que la corrélation entre cet indicateur et la gêne à court terme est également assez faible, ce qui justifie des recherches supplémentaires.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Céline Angonin, étudiante en Master d'acoustique à NTNU qui a participé aux mesures sur le terrain à Storheia et Bessakerfjellet ; TrønderEnergi AS pour le partage des données de vent ; Tim Cato Netland, NTNU, pour son aide pendant les expériences de calibration ; U. Peter Svensson, NTNU, pour ses commentaires sur le le manuscrit ; Hugo Lebreton, élève ingénieur ENSIM en stage à NTNU, pour sa relecture de la traduction française ; et les 60 volontaires qui ont passé les tests d'écoute.

- AFNOR (1996). "Acoustique - Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement - Méthodes particulières de mesurage (in French)," Standard NF S 31-010.
- Alamir, M. A., Hansen, K. L., Zajamsek, B., and Catcheside, P. (2019). "Subjective response to wind farm noise: a review of laboratory listening test methods," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **114**(109317), 9, doi: [10.1016/j.rser.2019.109317](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109317).
- Attenborough, K., Bashir, I., and Taherzadeh, S. (2011). "Outdoor ground impedance models," *Journal of the Acoustical Society of America* **129**(5), 2806-2819.
- Bolin, K., Bluhm, G., and Nilsson, M. E. (2014). "Listening test comparing A-weighted and C-weighted sound pressure level as indicator of wind turbine noise annoyance," *Acta Acustica united with Acustica* **100**(5), 842-847, <https://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaua/2014/00000100/00000005/art00009;jsessionid=168tps5ppri2q.x-ic-live-02>, doi: [10.3813/AAA.918764](https://doi.org/10.3813/AAA.918764).
- Bolin, K., Kedhammar, A., and Nilsson, M. E. (2012). "The influence of background sound on loudness and annoyance of wind turbine noise," *Acta Acustica united with Acustica* **98**, 741-748.
- Bolin, K., Nilsson, M. E., and Khan, S. (2010). "The potential of natural sounds to mask wind turbine noise," *Acta Acustica united with Acustica* **96**(1), 131-137, doi: [10.3813/AAA.918264](https://doi.org/10.3813/AAA.918264).
- Davy, J. L., Burgemeister, K., and Hillman, D. (2018). "Wind turbine sound limits: Current status and recommendations based on mitigating noise annoyance," *Applied Acoustics* **140**, 288-295, doi: [doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.009](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.06.009).
- Dutilleul, 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, <https://acta-acustica.edpsciences.org/articles/aacus/abs/2020/03/aacus200025/aacus200025.html>, doi: [10.1051/aacus/2020009](https://doi.org/10.1051/aacus/2020009).
- Dutilleul, G., Gjestland, T., and Licitra, G. (2019). "Challenges of the use of sound emergence for setting legal noise limits," *International Journal of Environmental Research and Public Health* **16**(4517), 14, <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/22/4517>.
- Fastl, H., and Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models*, **22** (Springer Berlin Heidelberg), pp. 1-463.
- Fields, J. M. (1998). "Reactions to environmental noise in an ambient noise context in residential areas," *Journal of the Acoustical Society of America* **104**(4), 2245-2260.
- Glé, P., and Dutilleul, G. (2016). "Détection des tonalités marquées : Implantation du PAS 20065 et application (in French)," Technical Report 2015-76-023.
- Haac, T. R., Kaliski, K., Landis, M., Hoen, B., Rand, J., Firestone, J., Elliot, D., Hübner, G., and Pohl, J. (2019). "Wind turbine audibility and noise annoyance in a national U.S. survey: individual perception and influencing factors," *Journal of the Acoustical Society of America* **146**(2), 1124-1141, doi: [10.1121/1.5121309](https://doi.org/10.1121/1.5121309).
- Hathaway, K. M., and Kaliski, K. (2006). "Assessing wind turbines against relative noise standards," in *Proc. internoise*, Honolulu, HI, p. 7.
- Hongisto, V., Oliva, D., and Keränen, J. (2017). "Indoor noise annoyance due to 3-5 megawatt wind turbines - an exposure-response relationship," *Journal of the Acoustical Society of America* **142**(4), 2185-2196, doi: [10.1121/1.5006903](https://doi.org/10.1121/1.5006903).
- Hussain, H., and Dutilleul, G. (2020). "A parametric study of long-range sound propagation using underwater acoustics software," in *Proceedings of Meetings on Acoustics - Proc. LRSP XVIII*, edited by D. Max, Acoustical Society of America, Washington, DC, Vol. 41, p. 7, doi: [10.1121/2.0001321](https://doi.org/10.1121/2.0001321).
- IEC (2017). "Electroacoustics - Audiometric equipment - Part 1: Equipment for pure-tone and speech audiometry," Standard IEC 60645-1:2017, <https://webstore.iec.ch/publication/32370>.
- IEC (2018). "Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques," Standard IEC 61400-11 Edition 3.1, <https://webstore.iec.ch/publication/63367>.
- ISO (1993). "Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere," Standard ISO 9613-1, <https://www.iso.org/standard/17426.html>.
- ISO (2003). "Acoustics, Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys," Standard ISO/TS 15666,

- <https://www.iso.org/standard/28630.html>.
- ISO (2016a). "Acoustics - Objective method for assessing the audibility of tones in noise - Engineering method," Standard ISO/PAS 20065, <https://www.iso.org/standard/66941.html>.
- ISO (2016b). "Acoustics, Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures," Standard ISO 1996-1:2016, <https://www.iso.org/fr/standard/59765.html>.
- ISO (2017a). "Acoustics, Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of sound pressure levels," Standard ISO 1996-2:2017, <https://www.iso.org/fr/standard/59765.html>.
- ISO (2017b). "Acoustics, Methods for calculating loudness - Part 1: Zwicker method," Standard ISO 532-1, <https://www.iso.org/fr/standard/63077.html>.
- Janssen, S. A., Vos, H., Eisses, A. R., and Pedersen, E. (2011). "A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources," *Journal of the Acoustical Society of America* **130**(6), 3746–3753.
- Michaud, D. S., Feder, K., Keith, S. E. K., Voicescu, S. A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Denning, A., D'Arcy, M., Bower, T., Lavigne, E., Murray, B. J., Weiss, S. K., and van den Berg, F. (2016a). "Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects," *Journal of the Acoustical Society of America* **139**(3), 1443–1454, doi: [10.1121/1.4942391](https://doi.org/10.1121/1.4942391).
- Michaud, D. S., Keith, S. E., Katya, F., Voicescu, S. A., Marro, L., Than, J., Guay, M., Bower, T., Denning, A., Lavigne, E., Whelan, C., Janssen, S. A., Leroux, T., and van den Berg, F. (2016b). "Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance," *Journal of the Acoustical Society of America* **139**(3), 1455–1466, doi: [10.1121/1.4942390](https://doi.org/10.1121/1.4942390).
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (2004). "Circolare 6 settembre 2004 - interpretazione in materia di inquinamento acustico: Criterio differenziale e applicabilità dei valori limite differenziali (in Italian)," *Gazzetta Ufficiale* **217**.
- Ministre de la Transition Ecologique et Solidaire (2020). "Arrêté du 22 juin 2020 modifiant l'arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à déclaration au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (in French)," *Journal Officiel de la République Française* **0160**(TREP2003954A), 14263, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042056089>.
- Møller, H. (2011). "Low-frequency noise from large wind turbines," *Journal of the Acoustical Society of America* **129**(6), 3727–3744, doi: [10.1121/1.3543957](https://doi.org/10.1121/1.3543957).
- Nordtest (2002). "Acoustics: human sound perception - guidelines for listening tests," Standard NT ACOU 111, <http://www.nordtest.info/wp/2002/05/01/acoustics-human-sound-perception-guidelines-for-listening-tests-nt-acou-111/>.
- Oliva, D., Hongisto, V., and Haapakangas, A. (2017). "Annoyance of low-level tonal sounds – Factors affecting the penalty," *Building and Environment* **123**, 404–414, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132317303037>, doi: [10.1016/j.buildenv.2017.07.017](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.017).
- Pedersen, E., and Persson Waye, K. (2007). "Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments," *Journal of Occupational and Environmental Medicine* **64**, 480–486, doi: [10.1136/oem.2006.031039](https://doi.org/10.1136/oem.2006.031039).
- Pedersen, E., van den Berg, F., Bakker, R., and Bouma, J. (2009). "Response to noise from modern wind farms in The Netherlands," *Journal of the Acoustical Society of America* **126**(2), 634–643, doi: [10.1121/1.3160293](https://doi.org/10.1121/1.3160293).
- Pedersen, E., and Waye, K. P. (2004). "Perception and annoyance due to wind turbine noise - a dose-response relationship," *Journal of the Acoustical Society of America* **116**(6), 3460–3470, doi: [10.1121/1.1815091](https://doi.org/10.1121/1.1815091).
- Persson Waye, K., and Öhrström, E. (2002). "Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise," *Journal of Sound and Vibration* **250**(1), 65–73.
- Pohl, J., Gabriel, J., and Hübner, G. (2018). "Understanding stress effects of wind turbine noise - the integrated approach," *Energy Policy* **112**, 119 – 128, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517306304>, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.007>.
- Porter, M. B., and Bucker, H. P. (1987). "Gaussian beam tracing for computing ocean fields," *Journal of the Acoustical Society of America* **82**(4), 1349–1359.
- Premier ministre (2006). "Décret du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage et modifiant le code de la santé publique (dispositions réglementaires)," *Journal Officiel de la République Française* **202**(2006-1099), 3, <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=05s5HXhw4EbN3ATjpyzJgOt-kY10cdxfMgkK7daNs9c->.
- Premier ministre (2011). "Arrêté du 26 août 2011 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (in French)," *Journal Officiel de la République Française* **202**(14), 14539, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000459023&categorieLien=id>.
- Presidente del consiglio dei ministri (1991). "Decreto, limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno (in Italian)," *Gazzetta Ufficiale* (57).
- Presidente del consiglio dei ministri (1997). "Decreto, determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore (in Italian)," *Gazzetta Ufficiale* **280**(1).
- Schäffer, B., Pieren, R., Schlittmeier, S. J., and Brink, M. (2018). "Effects of different spectral shapes and amplitude modulation of broadband noise on annoyance reaction in a controlled listening experiment," *International Journal of Environmental Research and Public Health* **15**(5), 17p, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29783747/>, doi: [10.3390/ijerph15051029](https://doi.org/10.3390/ijerph15051029).
- Schäffer, B., Schlittmeier, S. J., Pieren, R., Heutschi, K., Brink, M., Ralf, G., and Helbrück, J. (2016). "Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: a laboratory study," *Journal of the Acoustical Society of America* **139**(5), 2949–2963, doi: [10.1121/1.4949566](https://doi.org/10.1121/1.4949566).
- Stallen, P. J. (1999). "A theoretical framework for environmental noise annoyance," *Noise & Health* **1**(3), 69–80.
- Viollon, S., Marquis-Favre, C., Junker, F., and Baumann, C. (2004). "Environmental assessment of industrial noises annoyance with the criterion "sound emergence"," in *Proc ICA*.
- World Bank (2007). 112110 *Environmental, Health, and Safety General Guidelines (English)* (International Finance Corporation E&S - World Bank Group, Washington, D.C.), <http://documents.worldbank.org/curated/en/157871484635724258/Environmental-health-and-safety-general-guidelines>.
- World Bank (2015). 110346 *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Wind Energy* (International Finance Corporation E&S - World Bank Group, Washington, D.C.), <http://documents.worldbank.org/curated/en/157871484635724258/Environmental-health-and-safety-general-guidelines>.
- Yokoyama, S., Kobayashi, T., and Tachibana, H. (2016). "Perception of tonal components contained in wind turbine noise," *Inter-Noise Hamburg 2016* 12.