

**ACTES du 23e Congrès international d'acoustique  
du 9 au 13 septembre 2019 à Aix-la-Chapelle, Allemagne**

**Une comparaison du bruit inaudible d'un parc éolien et de bruits naturels de l'environnement avec enregistrement des ondes cérébrales et de la fréquence cardiaque .**

Steven COOPER, The Acoustic Group, Australie

## RÉSUMÉ

Une étude pilote entreprise fin 2017 sur le bruit inaudible des éoliennes et les personnes ayant une sensibilité très forte au bruit des éoliennes, a révélé que les sujets testés pouvaient détecter la présence d'un signal par le ressenti plutôt que par l'audition . Un groupe témoin qui n'avait pas été exposé au bruit des éoliennes n'a pas pu détecter ou ressentir le signal inaudible.

L'étude d'un cas isolé, en tant que précurseur d'une étude pilote ultérieure, a utilisé un bruit inaudible d'éoliennes, un bruit blanc inaudible, un bruit de ressac inaudible (océan), un bruit inaudible de ventilateur. Cette étude a été réalisée dans une salle de réverbération de 126 m<sup>3</sup> ainsi que dans une chambre semi-anéchoïque de 31 m<sup>3</sup>, avec surveillance de la fréquence cardiaque et des ondes cérébrales du sujet testé.

Les résultats de ces tests sont commentés.

Mots-clés: *bruit des éoliennes, réponse du cerveau*

## 1. INTRODUCTION

Une plainte courante des résidents à proximité des parcs éoliens est d'être l'objet d'une perturbation du sommeil et de se réveiller dans un état d'agitation, dans des situations où tantôt les éoliennes peuvent être audibles et à d'autres moments pas audibles.

Le test réalisé en 2017 [1] en générant des signaux inaudibles à spectre complet de haute qualité, enregistrement d'ondes à haut taux d'échantillonnage du bruit détecté dans la chambre principale de la maison 87 dans l'étude de Cape Bridgewater [2], a été effectué sur 2 groupes de neuf sujets testés. Un groupe comportait des personnes qui avaient été jugées sensibles au bruit des éoliennes, qui s'étaient éloignés, ou avaient abandonné leur maison, ou résidaient à un endroit différent un certain nombre de fois par semaine.

Le deuxième groupe (groupe témoin) n'avait jamais été exposé au bruit des éoliennes.

La surveillance du bruit des éoliennes (tant à l'extérieur des locaux qu'à l'intérieur des logements) a révélé la présence d'une modulation d'amplitude pulsée de manière dynamique [3] qui impliquait une variation significative du niveau de pression sonore là où cette variation provoque un taux d'infrasons, ces derniers étant identifiés comme la fréquence de passage des pales. Pour les éoliennes, une description courante utilisée pour décrire cette modulation est le terme "modulation d'amplitude".

La pulsation concerne toutes les fréquences et n'est pas nécessairement la modulation d'amplitude telle que définie au sens électrotechnique (elle est différente de la modulation de tonalité associée à l'arbre en sortie du multiplicateur de vitesse) [4]. L'analyse numérique des fréquences dans la zone de production des infrasons met en évidence un signal à la fréquence de passage des pales, ainsi que des harmoniques de cette fréquence.

Leventhall [5] a suggéré que la modulation des composantes basse fréquence du bruit de l'éolienne pouvait être à l'origine de la gêne, et non pas les infrasons eux-mêmes.

Basner et Greifhan [6] ont suggéré que la surveillance de la variabilité de la fréquence cardiaque pourrait être un outil pour étudier les troubles du sommeil associés aux éoliennes.

En raison d'un déménagement des locaux contenant le laboratoire utilisé pour les précédents «essais

sur les bruits d'éoliennes» et de la nécessité de reconstruire les laboratoires dans un lieu provisoire, un essai expérimental a été fait sur l'étude de cas d'une seule personne pour enregistrer la fréquence cardiaque et les ondes cérébrales du sujet testé. Sept signaux différents ont été mis en œuvre dans deux salles d'essais.

## 2. MÉTHODOLOGIE

Les signaux de test qui ont été utilisés pour l'expérience impliquaient:

- le signal d'essai de Cape Bridgewater (à l'intérieur d'une habitation) utilisé dans l'étude précédente [1],
- le bruit du ressac sur un promontoire au-dessus des falaises océaniques,
- trois (quatre?) échantillons différents de bruit d'éoliennes obtenus dans l'environnement extérieur (aux habitations), présentant différents degrés de modulation d'amplitude,
- bruit d'un grand ventilateur d'extraction d'air d'une mine de charbon souterraine,
- bruit blanc,
- bruit ambiant avant et après les sept échantillons.

L'enregistrement du sujet testé aux sept échantillons (et le bruit ambiant) a utilisé chacun des échantillons pendant une durée de trois minutes. Tous les échantillons étaient inaudibles dans chacune des deux salles d'essais.

La première salle de test était une salle de réverbération de 126 m<sup>3</sup> utilisée dans les études précédentes, où tous les murs intérieurs et le toit sont recouverts de polyester de densité moyenne de 50 mm d'épaisseur et l'émetteur de bruit pour la génération du signal était composé de douze subwoofers (hauts-parleurs très basse fréquence) de 15 pouces de diamètre et de puissance 1000 watts RMS fixés à un baffle constitué de deux couches de bois de 38 mm et de trois couches de plaques de plâtre de 16 mm montées dans l'ouverture de la salle de réverbération.



Figure 1: installation d'essai dans la salle à réverbération

La réponse en fréquence des subwoofers chute après 1 kHz, analogue à celle d'un filtre passe-bas restreignant le signal aux bandes de moyennes et basses fréquences, et aux bandes infrasons. Le système est capable de générer une onde sinusoïdale pure à 1 Hz à un niveau de 96 dB.

La deuxième salle était une pièce semi-anéchoïque où tous les murs et le plafond sont garnis de sept couches d'isolation, les trois premières couches en polyester de haute densité (50 mm d'épaisseur), suivi de 50 couches d'isolation en laine de verre de 3 mm d'épaisseur et de 3 couches de polyester basse densité de 50 mm d'épaisseur.

La chambre anéchoïque, vide, a un volume de 31 m<sup>3</sup>. Elle est équipée de trois subwoofers de 12 pouces montés dans une enceinte fermée, et de trois lignes verticales de haut-parleurs montés en

réseau (largeur de faisceau de 28°) positionnés sur la dimension la plus courte de la pièce, de manière à créer un champ sonore uniforme, les réseaux linéaires pouvant délivrer des fréquences jusqu'à 16 kHz.



Figure 2: Les hauts-parleurs installés dans la salle semi-anéchoïque

Le système de hauts parleurs en ligne verticale de la salle semi-anéchoïque a été utilisé pour l'évaluation de signaux stéréo par rapport à des signaux mono [1]. Pour les besoins de cette étude, les trois ensembles de hauts-parleurs en ligne/subwoofers délivraient le même signal (mono) d'une extrémité à l'autre de la salle semi-anéchoïque.

Les signaux originaux pour reproduire les fichiers sons ont été enregistrés à l'aide d'un Bruel & Kjaer LANXI Pulse Unit Type 3050-B-040, utilisant des microphones GRAS 40AZ et des préamplis B & K 2669. Les enregistrements ont été obtenus à l'aide du module d'enregistrement B&K Pulse DATA ou B & K Connect avec une fréquence d'échantillonnage de 51,2 kHz plutôt que la fréquence typique de 44 ou 48 kHz, qui s'est avérée être absente dans la reproduction des pulsations associées au bruit des éoliennes et aux autres bruits transitoires [7].

Étant donné que la signature acoustique des éoliennes contient un flux d'impulsions variant dans le temps suivant le taux d'infrasons, il faut comprendre le terme «fluctuations» selon la définition de Zwicker & Fastl [8], qui fait appel au ressenti individuel de la modulation plutôt qu'à sa perception auditive, le degré de perception dépendant du rapport impulsion/modulation, et de l'amplitude de la modulation. Leventhall [5] fait référence à Bradley [9] qui a étudié la modulation en fonction du taux d'infrasons des bruits de basse fréquence, et a trouvé un résultat similaire à Zwicker & Fastl, mais Bradley en a exprimé l'impact en termes de gêne.

Les quatre signaux d'éoliennes comportent une modulation d'amplitude à des degrés divers. Le ventilateur de ventilation présente une pulsation infrason tandis que le bruit de la mer ainsi que le bruit blanc n'ont pas de fonction périodique.

La bande étroite détaillée et la bande en tiers d'octave, les données de temps et de fréquence pour les sept signaux (dérivé selon la procédure de la référence [4]) peut être consulté à partir des liens suivants :

<http://acoustics.com.au/media/ICA2019BW01>

<http://acoustic.com.au/media/ICA2019BW02.pdf>

La figure 3 présente les spectres Leq pondérés en A (incluant les indices de modulation) pour les signaux d'éoliennes, tandis que la figure 4 représente ceux du ventilateur (avec les indices de modulation) comparées au bruit de ressac et au bruit blanc (qui n'ont pas d'indices de modulation).

---

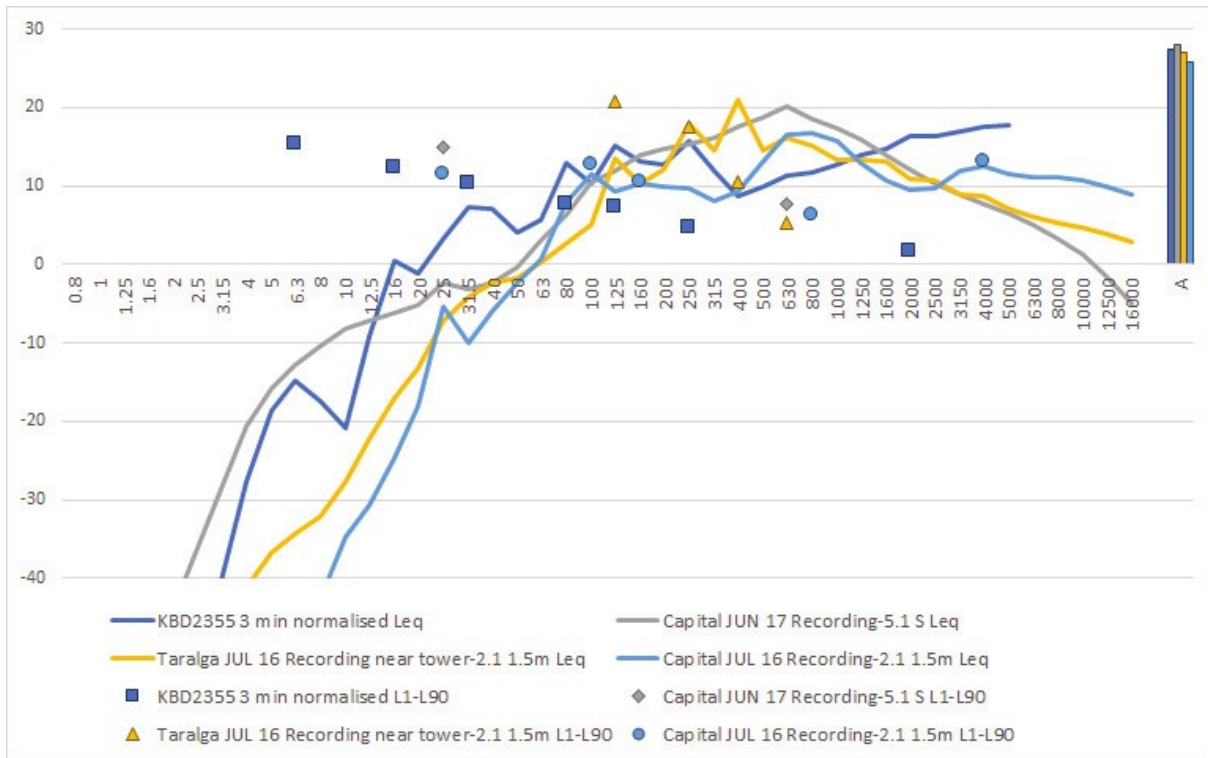


Figure 3 - Bandes en 1/3 d'octave pondérées A et indices de modulation pour les 4 échantillons de bruit d'éoliennes

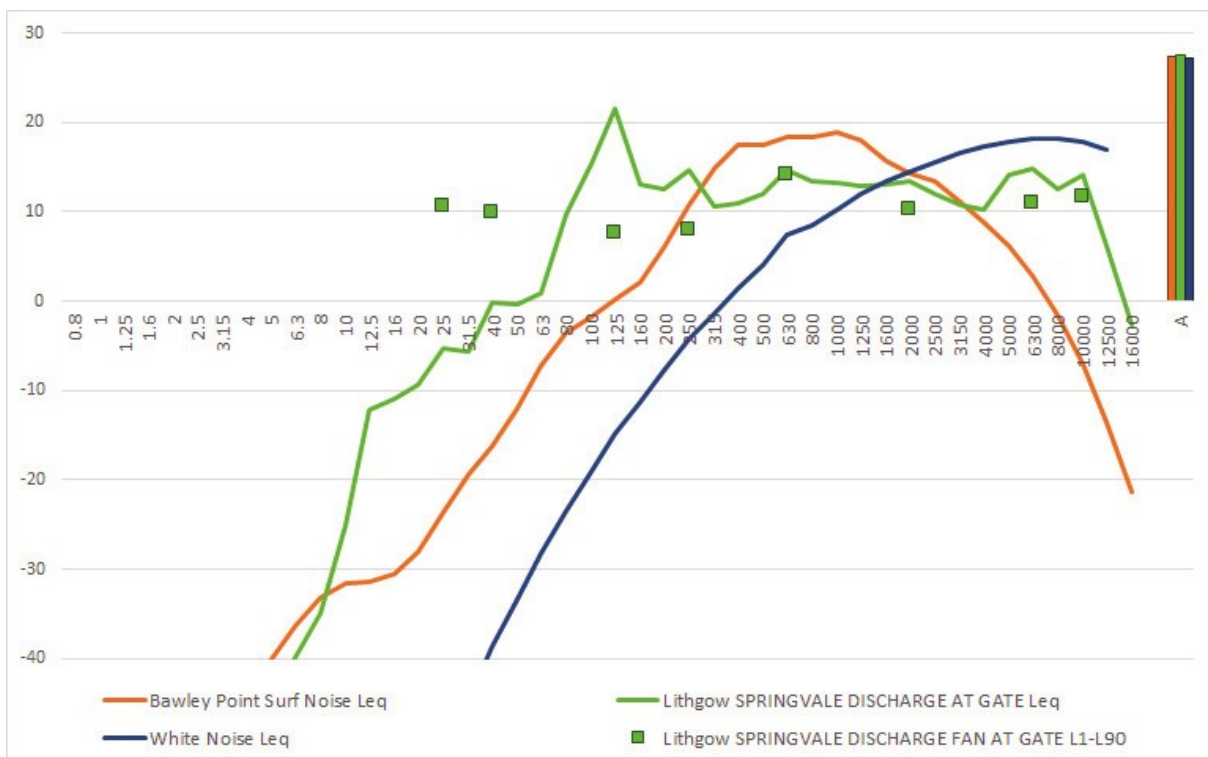


Figure 4 - Bandes d'octave pondérées de 1/3 et indices de modulation des échantillons de bruit d'éoliennes et de bruits non éoliennes

Cependant, en traitant les niveaux de bruit internes, l'atténuation des éléments structurels rend l'utilisation des spectres pondérés A peu utile. L'utilisation de résultats non pondérés (linéaires) (figure 5) semblent plus appropriée pour évaluer les fluctuations lorsque des indices de modulation

d'amplitude plus élevés apparaissent.

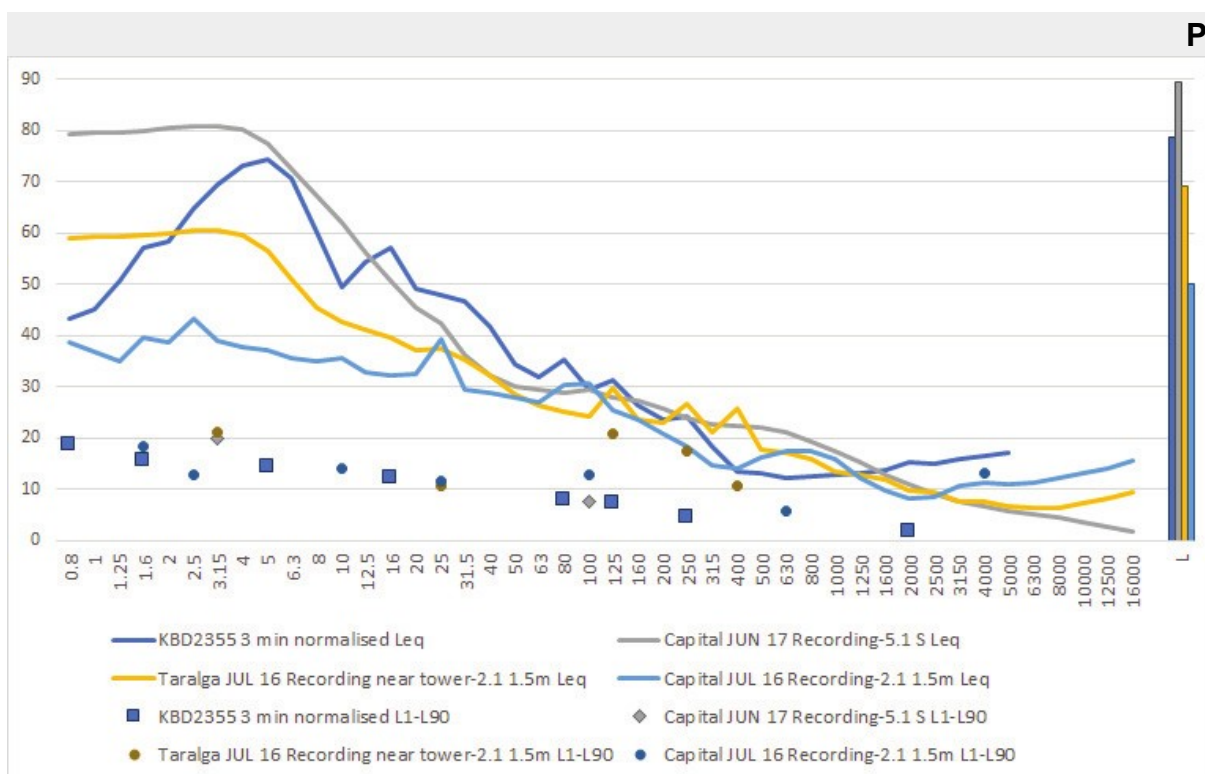


Figure 5: Transcription de la figure 3 en niveaux non pondérés

Les fichiers d'ondes ont été envoyés à des amplificateurs de classe D de 2000 watts via un DAC (convertisseur numérique-analogique) Schiit Gungnir hautes performances offrant une sortie analogique de 115 dB de dynamique de 1 Hz à 100 kHz (-1 dB). Les amplificateurs de classe D avaient des condensateurs de compensation d'entrée pour fournir une réponse en fréquence de 0,5 Hz.

Les signaux audio ont été chacun normalisés à un niveau de source de 25 dB (A) puis atténués de manière à atteindre une contribution de 18 dB (A) pour la salle de réverbération et de 12 dB (A) pour la chambre semi-anéchoïque, de manière à être inaudible dans les deux chambres.

Pour les niveaux obtenus, les tests ont été effectués conformément à la Norme AS 1269.4 *Gestion du bruit au travail, Partie 4: Évaluation auditive* [10]. Les essais ont été conduits conformément aux principes éthiques de l'ASA de la Acoustical Society of America pour la recherche impliquant des humains et non humains dans la recherche et la publication de présentations [11].

Un observateur était présent dans chaque pièce lors des tests.

**Lors du test le sujet testé n'était pas au courant de la nature de la source de bruit, et ne savait pas quand les signaux étaient émis.** Le psychologue recevait un compte à rebours d'une minute avant l'application des signaux de test, mais aucune information quant à leur contenu.

**L'enregistrement de la fréquence cardiaque** a utilisé un ECG (électrocardiographe) dynamique Contec Medical Systems modèle TLC5000. La mise en place de l'enregistreur a été effectuée par une infirmière qualifiée.

**L'enregistrement des ondes cérébrales** a été effectuée par un psychologue certifié BCIA, accrédité « praticien utilisant un neuronavigateur J&J ». Le sujet testé est un patient du psychologue depuis 11 ans, connaissait la conduite des tests d'ondes cérébrales et ne présentait aucune anxiété associée aux enregistrements EEG (électro-encéphalogramme).

Les données EEG ont été analysées dans une base de données normative pour évaluer la nature de la gravité de la dérégulation dans les régions du cerveau. La base de données normative utilisée était celle donnée dans le Neuroguide du Dr Robert Thatcher (Applied Neuroscience Inc). Le QEEG (EEG quantitatif) fournit des informations sur la conduction altérée et la connectivité entre différentes zones du cerveau et réseaux de neurones.

### 3. OBSERVATIONS

La première série d'essais dans la salle de réverbération de 126 m<sup>3</sup> [12] a été entreprise avec le sujet testé au centre de la pièce, devant le champ sonore des haut-parleurs, les yeux fermés tout au long du test complet. Le sujet testé n'a détecté aucun bruit pendant le programme de test.

### 4. RÉSULTATS

L'analyse ultérieure des données a été examinée par rapport au moment de la demande signaux notés par l'acousticien contrôlant la génération du signal.

L'enregistreur de fréquence cardiaque a révélé des variations au cours des différents échantillons de test. Les détails des résultats EEG sont en dehors de notre domaine d'expertise acoustique et feront l'objet d'un document séparé par le psychologue. Cependant, les résultats ont été résumés pour de simples acousticiens comme suit:

- L'enregistrement des ondes cérébrales a révélé, pour le test en salle de réverbération, une fréquence alpha dominante de 10 Hz avec une amplitude globale restant dans un intervalle de deux écarts-types de la norme, à l'exception du test du ventilateur. En terme de sites du cerveau enregistrés, les sites bilatéraux médiaux (T3 et T4) présentaient des changements en fonction des différents signaux (sons inaudibles).
- L'augmentation de T3 et T4 observée pendant les échantillons de bruit est restée à un rythme constant pendant le bruit blanc et le test de référence.
- L'enregistrement en salle semi-anéchoïque, après une pause de 10 minutes pour la mise en place des équipements, **a montré qu'au début du test la fréquence de l'alpha postérieure dominante du sujet testé était tombée à 9,5 Hz et à 8 Hz à la fin des essais.**
- Pour les mêmes signaux de test dans la salle semi-anéchoïque, les niveaux indiqués par l'électrocardiogramme dépassaient 2 écarts-types au sens de la base de données normative. Une augmentation notable dans les sites médiaux bilatéraux (T3 et T4) a été observée, ainsi qu'une augmentation significative du Site intermédiaire (Vortex Cz).

### 5. DISCUSSION

En termes de dB (A), la reproduction de fréquences en spectre complet dans la pièce anéchoïque a montré que les niveaux dans la salle semi-anéchoïque étaient en fait plus bas que dans la salle de réverbération, mais que les niveaux de sons inaudibles dans la salle semi-anéchoïque avaient une composante en hautes fréquences significativement plus élevée en raison de la réponse en fréquence du système de hauts-parleurs utilisé.

L'augmentation de la réponse en fréquence dans la salle semi-anéchoïque suggère que pour le même niveau exprimé en dB (A) la présence de fréquences inaudibles au-dessus de 1 kHz est pertinente. Des comparaisons ultérieures des mêmes signaux dans la salle de réverbération (limitée à 1 kHz) faites dans la salle semi-anéchoïque avec d'autres sujets testés montrent un plus grand niveau de gêne dans la salle semi-anéchoïque pour les personnes sensibles au bruit des éoliennes.

**Les résultats de cette étude de cas unique, lorsqu'ils sont ajoutés à l'étude pilote [1] de 2017 susmentionnée, suggèrent que les personnes sensibles au bruit des éoliennes peuvent subir des modifications de l'EEG (ondes cérébrales) pendant la présence du signal ou du fonctionnement des éoliennes, même lorsque ce bruit est inaudible.**

**Les changements d'EEG et de fréquence cardiaque qui ont été observés lors des tests de bruit inaudible sont une réponse automatique du corps et ne peuvent être attribuée à la fausse allégation de placebo. Ils confortent le concept de « réflexe de sursaut » déjà envisagé [13].**

## **6. CONCLUSION**

Ces tests ont été entrepris dans le prolongement de l'étude pilote en double aveugle de 2017 sur le bruit inaudible des éoliennes, pour déterminer si l'enregistrement de la fréquence cardiaque ou des ondes cérébrales répond à l'échantillon de bruit.

L'étude expérimentale de ce cas unique est le résultat de six années de recherches sur la mesure et la capacité de recréer avec précision le bruit d'éoliennes pour une étude en laboratoire (par d'autres chercheurs).

Les tests ont montré qu'il y avait un impact mesurable des échantillons testés sur les enregistrements EEG (ondes cérébrales), encourageant ainsi l'hypothèse d'entreprendre de nouvelles études dans cette voie, pour lesquelles nous recherchons un financement.

À partir de nos expériences, voici nos propositions:

- Les expériences pourraient être menées en utilisant les échantillons de bruit existants pour une étude de cas, ou au domicile d'un résident en répétant le test «on / off» en laboratoire.
- Les expériences utiliseraient un spectre d'échantillon de test dans une séance avec exposition nominale de 20 minutes. Ensuite, l'exercice serait répété avec un échantillon de test différent.
- Un temps de récupération d'au moins 30 minutes doit être respecté si un autre signal d'échantillon doit être testé.
- L'équipe d'étude devrait être élargie pour inclure des experts médicaux appropriés pour entreprendre des mesures supplémentaires pour déterminer les parties du corps répondant au signal de test.
- Le test consistait à immerger le sujet testé dans un champ sonore tout entier, et pas seulement à lui mettre des écouteurs sur les oreilles. Par conséquent, tester l'utilisation d'un casque seul servirait à évaluer si l'impact concerne le corps tout entier ou seulement des oreilles.

## **REMERCIEMENTS**

L'auteur remercie pour son aide Rosemary Boon de Learning Discoveries, pour sa patience le personnel de The Acoustic Group, et, plus important encore, la patience et l'aide de la famille de l'auteur, famille qui a "profité" de quelques six ans de recherches et d'enquêtes privées, notamment de longs trajets et d'excursions sur le terrain dans divers parcs éoliens en Australie.

Cependant, ces sorties sur le terrain ont conduit à rencontrer un merveilleux groupe de résidents ruraux qui ont offert l'utilisation de leurs domiciles pour des expériences acoustiques et ont ensuite soutenu notre laboratoire pour aider nos recherches sur le bruit des éoliennes.

## **RÉFÉRENCES**

1. Cooper SE, « Perception subjective du bruit des éoliennes - L'approche stéréo », Acoustical Society of America Meeting, New Orleans, décembre 2017, ASA POMA Vol 31 10.1121/2.0000653
2. The Acoustic Group, «The Results of a Acoustic Testing Program, Cape Bridgewater Wind Farm», déc 2014 - <http://waubrafoundation.org.au/resources/cooper-s-acoustic-group-results-cape-bridgewater-acoustic-investigation/>
3. Cooper SE & Chan C. « Infrasons des éoliennes. Mesurons-nous ce qui est réellement là ou quelque chose d'autre? » (partie 3), réunion de l'Acoustical Society of America, Hawaï, décembre 2016

4. Cooper S, « une méthode simplifiée pour la détermination de la "modulation d'amplitude" des sons audibles et inaudibles » - bruit des éoliennes, ICA 2019, septembre 2019.
5. Leventhall HG, Benton S, Un examen des recherches publiées sur le bruit à basse fréquence et ses effets, rapport pour Defra, 2003
6. Griefhan B, Brode P, marques A et Basner M, « éveils autonomes liés au bruit de la circulation pendant le sommeil », Vol 31, No 4, 2008
- 7 Cooper S, « les taux d'échantillonnage des enregistrements de fichiers Wave sont-ils trop faibles pour les signaux transitoires? », Acoustique - Réunion de la Society of America, Boston, juin 2017
8. Norme australienne AS 1269.4 Gestion du bruit au travail, partie 4: évaluation auditive, Standards Australia, 2005.
9. Bradley JS, « Gêne causée par des sons à amplitude constante et à modulation d'amplitude contenant un grondement », Noise Control Engineering Journal **42** (8) 1994
10. Norme australienne AS 1269.4 «Gestion du bruit au travail, partie 4: évaluation auditive», Standards Australia, 2005.
- 11 Acoustical Society of America, «Principes éthiques de l'Acoustical Society of America for Research : Impliquer les animaux - humains et non humains - dans la recherche, l'édition et les présentations », [http://acousticalsociety.org/for\\_authors/ethical\\_principles](http://acousticalsociety.org/for_authors/ethical_principles)
12. Cooper SE, « perception subjective du bruit des éoliennes », réunion de l'Acoustical Society of America, Boston, juin 2017, ASA POMA Vol **30** /10.1121/2.0000639
13. Cooper SE, « les infrasons et les bruits de basse fréquence inaudibles et audibles peuvent-ils être le déclencheur acoustique du réflexe de sursaut? », Réunion de l'Acoustical Society of America, Hawaï, décembre 2016

Quelques explications :

#### Chambre anéchoïque

Une **chambre anéchoïque acoustique**, communément appelée « chambre sourde », est un local destiné aux expériences acoustiques, dont les parois sont équipées de matériaux absorbants plus ou moins sophistiqués de manière à éviter la réflexion d'une partie des sons émis dans la chambre (« l'écho »). Ce type de local permet d'étudier la propagation du son en « champ libre », c'est-à-dire sans aucune réflexion.

La **chambre semi-anéchoïque** a cette particularité que son plancher n'est pas équipé de matériaux absorbants. Outre qu'elle est plus facile à réaliser et à utiliser, elle permet d'étudier la propagation en « semi-champ libre », comme dans l'environnement extérieur, où le son se réfléchit toujours plus ou moins sur le sol (plus ou moins « absorbant »). Comme la chambre anéchoïque, elle permet surtout de faire abstraction du bruit de fond « naturel » (appelé aussi bruit résiduel) qui existe toujours à l'extérieur à un niveau plus ou moins élevé suivant l'endroit où on se trouve.