

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Émission et propagation du bruit des éoliennes : constitution d'une base de données expérimentale de référence

D. Ecotière^a, B. Kayser^b, B. Gauvreau^c, C. Lebourdat^d, F. Bruneau^e, G. Guillaume^a, H. Lefèvre^f, A. Petit^d, P. Demizieux^a, V. Gary^b et J.-P. Durieux^d

^aCerema, Ifsttar, UMRAE, 11 rue Jean Mentelin, 67000 Strasbourg, France

^bIfsttar, Cerema, UMRAE, Allée des Ponts et Chaussées Route de Bouaye - CS4, 44344 Bouguenais, France

^cIfsttar, Cerema, UMRAE, Route de Bouaye, 44344 Bouguenais, France

^dENGIE Green, 15 rue Nina SIMONE, 44034 Nantes, France

^eEchopsy, 16 Rue Haut Mesnil, 76660 Mesnil-Follemprise, France

^fCerema, 8-10, rue Bernard Palissy, 63017 Clermont-Ferrand, France

bill.kayser@ifsttar.fr

La compréhension et la prévision du bruit des éoliennes reste un sujet sur lequel il est nécessaire de progresser. Parmi les sujets d'actualité figurent par exemple l'apparition épisodique de modulation d'amplitude du signal émis par une éolienne, l'influence de la météorologie et du sol sur la propagation acoustique, la variabilité spatiale et temporelle des niveaux sonores et les incertitudes associées, la directivité de l'émission sonore, ou encore l'amélioration des méthodes de caractérisation expérimentale. Afin d'étudier ces différents sujets, une campagne expérimentale d'envergure a été menée par le Cerema et l'Ifsttar (UMRAE) ainsi que Engie Green, en collaboration avec Echopsy, au sein d'un parc éolien. Cette campagne avait pour but de constituer une base de données de référence concernant le bruit des éoliennes, ayant pour vocation d'être ultérieurement librement mise à disposition de la communauté scientifique. L'objectif de la campagne expérimentale est d'étudier l'émission et la propagation du bruit des éoliennes en fonction de différents paramètres d'influence. Pour cela, plus de 20 points de mesures acoustiques (sonomètres, enregistrements audio) ont été réalisés pendant une semaine, incluant des phases de marche et d'arrêt des éoliennes, à la fois en champ proche (caractérisation de la puissance acoustique des machines) et en champ lointain jusqu'à 1,5 km. Simultanément, des relevés météorologiques ont été réalisés à l'aide de plusieurs types de dispositifs (Lidar météorologique, anémomètres soniques et mâts météorologiques de grande hauteur) à différents endroits du site. Ces relevés ont été complétés par des mesures d'impédance acoustique des sols environnants. Cette communication a pour objectif de présenter la campagne de mesure, ainsi que les traitements et les premières analyses.

1 Introduction

Le bruit émis par les éoliennes en fonctionnement peut être à l'origine dans certaines situations, d'une gêne rapportée par des riverains de parcs éoliens. Cela mène parfois à une opposition contre le développement de ces énergies renouvelables, ou bien à la mise en place de modes de fonctionnement dégradés (bridage) des parcs éoliens concernés, au détriment de l'efficacité énergétique et environnementale. Estimer de façon satisfaisante les nuisances sonores potentiellement induites par les éoliennes constitue un enjeu socio-économique et sanitaire qui nécessite de définir des méthodes fiables de prévision et d'estimation des niveaux sonores dans l'environnement. Bien que la source sonore d'origine éolienne ait fait l'objet de beaucoup d'études ces dernières années (émissions sonore [1], directivité [2], puissance acoustique [3]), peu de travaux se sont focalisés sur l'influence des paramètres de l'environnement sur la variabilité des niveaux sonores rencontrés. Or, il existe aujourd'hui un enjeu majeur à estimer la précision et la représentativité (spatiale et temporelle) des mesures de niveaux sonores en espace extérieur hétérogène. Estimer la variabilité globale et les incertitudes associées à la chaîne émission-propagation-réception apparaît ainsi primordiale quant à la maîtrise des impacts acoustiques des éoliennes dans l'environnement.

L'objectif de la campagne présentée ci-après est ainsi de fournir une base de données expérimentale permettant l'étude des processus physiques liés à l'émission et à la propagation du bruit des éoliennes en fonction de différents paramètres d'influence. Ces paramètres sont principalement les caractéristiques du milieu de propagation (conditions météorologiques) et les caractéristiques des frontières (impédance et rugosité du sol). Ces données alimenteront en particulier une thèse qui est actuellement en cours de réalisation sur cette thématique (2017-2020, Bill Kayser). Elle a pour but d'étudier l'influence relative des paramètres de l'environnement sur la propagation acoustique à grande distance, notamment à l'aide de modèles numériques, de méthodes statistiques et d'analyses de sensibilité.

2 Protocole expérimental

Le parc éolien étudié est situé sur un site présentant une faible déclivité (<2%). Il est constitué de 5 éoliennes d'une puissance électrique de 2MW chacune dont la nacelle est

située à 100m de haut. Chaque éolienne comporte 3 pâles de 46m de long. Le site présente l'avantage d'un environnement sonore assez calme, d'une bonne diversité de vitesses et directions de vent, ainsi que la présence d'un mât météorologique de 100m de haut. Durant la campagne expérimentale, le parc éolien a été soumis à des cycles marche/arrêt d'une durée de 1 heure/ 1 heure, pendant les 8 jours de mesures, permettant ainsi une analyse fine de la contribution du bruit des éoliennes dans le bruit mesuré.

Une vingtaine de capteurs acoustiques a été déployée sur le site afin d'observer l'évolution des niveaux sonores en fonction de la distance et des conditions de l'environnement. Des conditions favorables et défavorables à la propagation acoustique ont été rencontrées (détails *infra* section 2.1). Des mesures audio et de puissance acoustique des sources (IEC 61400-11) ont aussi été réalisées. 6 anémomètres soniques ont été déployés, en complément d'un lidar météorologique et d'un mât météorologique permanent de 99m de hauteur équipé de thermomètres et d'anémomètres (détails *infra* section 2.2). Les données des différents capteurs présents sur les nacelles des éoliennes ont été récupérées (vitesse et direction du vent, production électrique, orientation du rotor, inclinaison des pâles, etc.). Enfin, les caractéristiques de sol (absorption *via* impédance acoustique) sont également détaillées (détails *infra* section 2.3).

2.1 Mesures acoustiques

15 sonomètres ont été répartis de part et d'autre du parc éolien selon une direction correspondant aux vents dominants du site sur les intervalles [-1000m ; -300m] et [+300m ; +1500m] (cf Figure 1) par rapport à l'éolienne centrale du parc. Cette disposition permet ainsi de mesurer le profil du niveau sonore des côtés « vent contraire » (direction Ouest, où les vents sont majoritairement orientés de façon contraire), et « vent portant » (direction Est, où les vents sont principalement portants). Les différents sonomètres (B&K 2250, 01dB Solo et Cube, Rion) ont été placés à une hauteur de 1.5 ± 0.1 m du sol et ont effectué des mesures dans les bandes fréquentielles [12.5Hz ; 20kHz] ou [1Hz ; 20kHz] selon les points.

En complément de ces mesures de niveaux sonores, les puissances acoustiques apparentes des éoliennes 1, 3 et 5 ont été mesurées à l'aide du protocole décrit dans la norme IEC 61400-11 :



Figure 1: Protocole expérimental de la campagne présentant les différents types de mesures réalisées (niveaux sonores, puissance acoustique, météorologie) et types de capteurs déployés (sonomètres, anémomètres soniques, lidar et mât météo), ainsi que les 5 éoliennes du site (Eol 1-5).

Un microphone de mesure est placé au sol, au centre d'une plaque circulaire réfléchissante de 1m de diamètre, à une distance égale à la hauteur maximale atteinte par l'extrémité d'une pale de l'éolienne, et équipé de deux protections anti-vent (9cm et 50cm de diamètre).

La puissance acoustique apparente de l'éolienne L_w est ensuite obtenue en corrigeant le niveau sonore mesuré L_{eq} de l'atténuation due à la protection anti-vent, de l'effet de baffle de la plaque, de la divergence géométrique et de l'atténuation atmosphérique.

Des enregistrements audio ont été effectués en plusieurs points du site (150m, 750m, 1250m et 1500m) de manière à pouvoir identifier, puis caractériser (spectre), les événements sonores parasites (aéronefs, bruit animal, vent, etc.).

2.2 Mesures micrométéorologiques

6 anémomètres ultrasoniques tridimensionnels (Young et Campbell) sont répartis sur le site de la campagne (cf Figure 1). Ils mesurent la vitesse et la direction du vent à une hauteur de 3m (5 appareils) ou 10 m (1 appareil) dans les plans vertical et horizontaux, avec une fréquence d'échantillonnage de 20Hz. Après traitement des données, ce matériel permet de déterminer le profil vertical de vent et de température à l'aide de la théorie de la similitude de Monin-Obukhov [4,5]. Les gradients verticaux de vitesse de vent et de température obtenus permettent de déterminer le gradient vertical de la célérité du son.

Un lidar météorologique WindCube WLS7 a été déployé en retrait de l'éolienne 2 à proximité de deux anémomètres ultrasoniques (3m et 10m). Cet appareil permet de mesurer

les profils de vent à différentes hauteurs (jusqu'à 10 points de mesure) comprises entre 40m et 200m. Les points de mesure retenus lors de la campagne sont : 40m, 55m (bas de pale), 70m, 85m, 100m (hauteur du rotor), 115m, 130m, 145m (haut de pale) et 185m. Enfin, les données du mât météo permanent de 99m implanté au nord du parc ont été récupérées. Ce mât est constitué de 5 anémomètres (30m, 50m, 75m, 97m, 99m) et de 3 thermomètres (5m, 48m, 95m).

Les mesures effectuées avec ces différents appareillages seront comparées entre elles afin d'estimer leur capacité à fournir un profil de gradient de vitesse du son exploitable dans un contexte de prévision numérique de la propagation acoustique.

2.3 Mesures des propriétés du sol

La campagne a été réalisée sur un site agricole découpé en plusieurs parcelles cultivées (la figure 2 présente à titre d'illustration les parcelles du côté « contraire » à la propagation). De ce fait, les propriétés du sol (hauteur et longueur de rugosité, impédance caractéristique) n'étaient pas homogènes sur l'ensemble du domaine de propagation acoustique. Les propriétés du terrain étant une caractéristique d'influence majeure sur les niveaux sonores rencontrés [6,7], ainsi que sur les profils de vent, des mesures de rugosité (hauteur et densité de la végétation) et d'impédance ont été effectuées en plusieurs points du site (cf *infra* section 3.3) à l'aide d'un système prototype d'acquisition et de traitement automatique *in situ* développé en partenariat Ifsttar/Cerema [8,9].

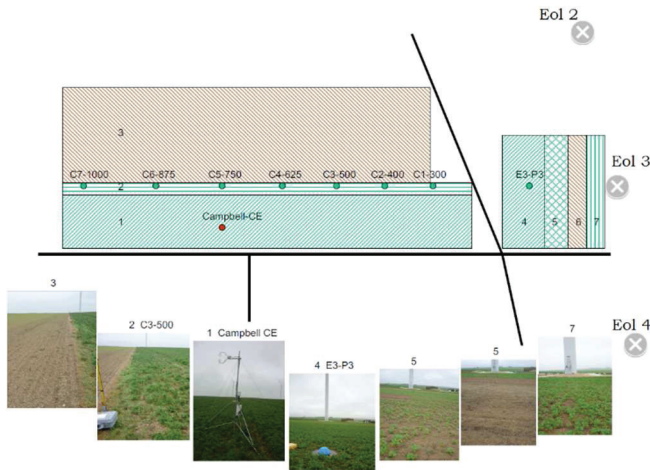


Figure 2: Vue schématique du dessus des parcelles agricoles présentes du côté « contraire » à la propagation. Chacune des parcelles possède un code couleur et un numéro distinctif. Les points de mesures d'impédance de sol sont représentés par un rond vert, et les routes et chemins par les traits noirs.

3 Premiers résultats

3.1 Résultats acoustiques

Un exemple de chronique (évolution temporelle) des niveaux sonores (exprimés en dBA) est donné ci-dessous (Figure 3) à différentes distances de la source, *i.e.* pour un microphone positionné à 500m, 1000m et 1500m au droit de la ligne des éoliennes (cf Figure 1). Les niveaux sonores sont affichés pour toute la durée de la campagne (haut) et pour la période du 23/10/17-12h au 24/10/17-12h (bas).

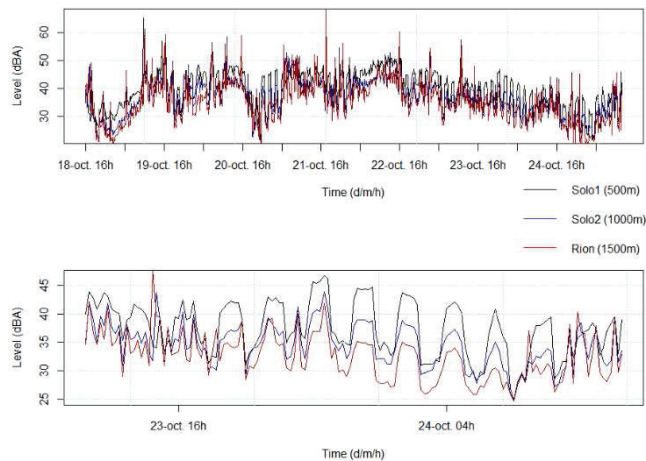


Figure 3: Exemple d'évolution temporelle du niveau sonore (en dBA) mesuré à 1.5m de hauteur aux microphones positionnés à 500m, 1000m et 1500m côté portant (cf Figure 1).

D'une manière générale, les chroniques des niveaux sonores font clairement apparaître le régime marche/arrêt des éoliennes, même à très grande distance de la source (par exemple ici à 1500m de la source). Cette émergence sonore est évidemment d'autant plus marquée que l'on se place proche de la ligne formée par les éoliennes. Ceci est un résultat important pour la suite : l'analyse statistique croisée avec les paramètres d'influence pourra ainsi reposer sur des

données acoustiques validées, fiables et variées (en global A ou en bandes de 1/3 d'octave), *i.e.* issues uniquement des sources sonores éoliennes (après filtrage des événements parasites type avion, vent, pluie, etc.).

3.2 Résultats micrométéorologiques

L'état thermique du milieu de propagation et les champs aérodynamiques qui y règnent influencent sensiblement la variabilité des niveaux sonores rencontrés en espace extérieur, notamment *via* le phénomène de stratification de l'atmosphère (apparition de conditions favorables ou défavorables à la propagation [5,10,11]). La turbulence atmosphérique joue également un rôle important sur les conditions de propagation acoustique [5,11] mais elle n'est volontairement pas abordée dans ce papier.

Les gradients verticaux de température et de vitesse de vent ont été mesurés en plusieurs points du site à l'aide d'anémomètres ultrasoniques tridimensionnels, de mât équipé de capteurs météorologique et d'un Lidar météorologique (cf Section 2.2). À titre d'exemple de résultats, la figure 4 présente les évolutions temporelles du gradient vertical de température et du gradient de vitesse de vent obtenus avec l'anémomètre ultrasonique disposé à 3m de hauteur et placé à 750m du côté contraire.

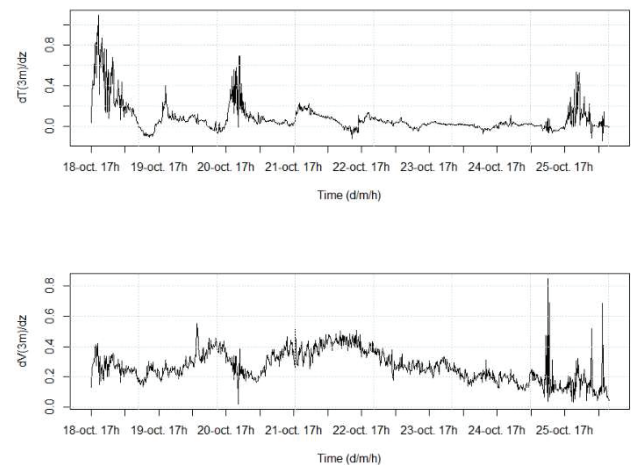


Figure 4: Exemple d'évolutions temporelles des gradients verticaux de température (haut) et de vitesse de vent (bas) mesurés à 3m de hauteur à l'aide de l'anémomètre ultrasonique positionné à 750m coté contraire (cf Figure 1).

Les valeurs des gradients verticaux de température et de vitesse de vent permettent de déterminer le gradient vertical de célérité du son à l'aide de l'Eq. 1. [5]:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{gR}{c_0} \frac{\partial T(z)}{\partial z} + \frac{\partial V(z)}{\partial z} \cos \alpha \quad (1)$$

avec $\gamma \approx 1.4$ le rapport des chaleurs spécifiques, $R = 286.69 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ la constante spécifique de l'air sec, $c_0 = 343 \text{ m.s}^{-1}$ la valeur de référence de célérité du son dans l'air et $\cos \alpha$ qui traduit la projection de la direction du vent suivant la direction principale de propagation acoustique (ici définie comme la perpendiculaire à la ligne d'éoliennes passant par le point de mesure).

Les résultats obtenus sont présentés à titre d'exemple en figure 5 ci-après.

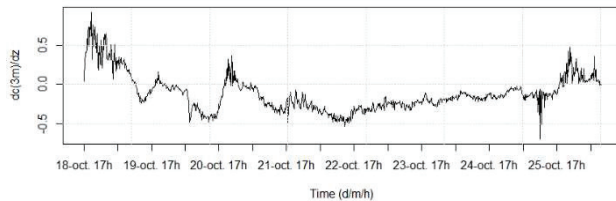


Figure 5: Exemple d'évolution temporelle du gradient vertical de célérité du son à 3m de hauteur à l'emplacement de l'anémomètre ultrasonique positionné à 750m coté contraire (cf Figure 1)

Une grande variété de conditions micrométéorologiques ont ainsi été rencontrées pendant la campagne expérimentale : au point de mesure considéré, les conditions de propagation acoustique sont alternativement favorables ($dc/dz > 0$) et défavorables ($dc/dz < 0$) à la propagation. Lorsque dc/dz est au voisinage de 0 (état transitoire), les conditions météorologiques sont sans effet sur la propagation acoustique (conditions homogènes). D'autres résultats seront présentés en conférence et viendront ensuite enrichir l'analyse statistique de cette base de données, en prenant également en compte les informations relatives aux conditions de turbulence atmosphérique.

3.3 Résultats d'impédance de sol

Le système prototype permettant la mesure *in situ* d'impédance de sol [8,9] est constitué d'une source (haut-parleur Navsound Fugue 70W) positionné sur trépied à une hauteur de 0.6m, ainsi que de deux microphones Microtechgefell M370 de classe 1 placés à 4m de distance dans l'axe de la source, respectivement à une hauteur de 0m et 0.6m. La méthode consiste ensuite à émettre un signal « burst chirp » et à calculer le rapport des deux pressions acoustiques mesurées. Le résultat est affiché sous la forme d'une fonction de transfert (en dB) : il s'agit d'ajuster un modèle théorique d'impédance de sol selon les valeurs optimums des paramètres σ (résistance spécifique au passage de l'air en Nsm^{-4}) et e (épaisseur de sol en m). Le modèle utilisé ici est celui de Miki [11,12]. La figure suivante présente 2 exemples de résultats expérimentaux pour des parcelles cultivées aux propriétés différentes en termes d'absorption (impédance acoustique).

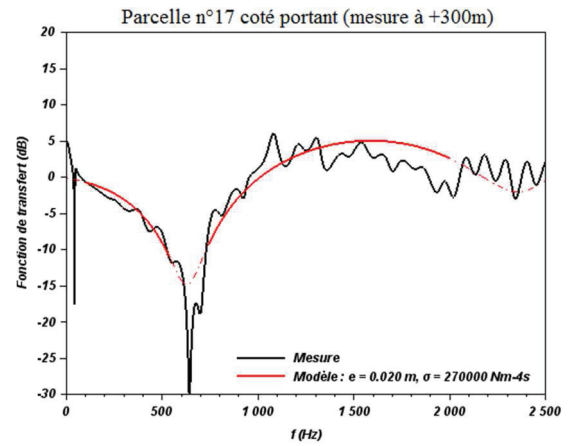
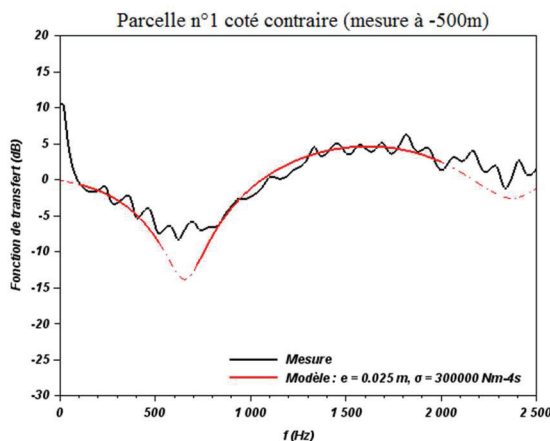


Figure 6: Ajustement du modèle théorique de Miki (courbe rouge) sur des mesures d'atténuation (courbe noire) effectuées à l'aide du système prototype Ifstar/Cerema sur 2 parcelles agricoles du site.

Ces deux résultats d'atténuation illustrent la variabilité des propriétés de sol rencontrée durant la campagne. La mesure sur la parcelle n°1 (sol peu humide avec de petits sillons de 0.05m et hautes herbes de 0.5m de hauteur) présente un premier creux d'interférence centré sur l'intervalle [500Hz ; 900Hz]. La mesure sur la parcelle n°17 (sol très humide avec petits sillons de 0.05m et repousses de 0.1m de hauteur) présente un creux centré sur l'intervalle [600Hz ; 700Hz]. Ces résultats sont caractéristiques de sols absorbants. L'ajustement du modèle d'impédance de sol de Miki sur l'ensemble des mesures met en évidence une dispersion du paramètre σ de 90 kNsm^{-4} à 680 kNsm^{-4} , et du paramètre e de 0.01m à 0.05m.

3.4 Données de puissance des éoliennes

La figure 7 ci-dessous présente un aperçu de la puissance électrique fournie par 2 éoliennes (numérotées 1 et 5 sur la Figure 1) en fonction des vitesses de vent mesurées *in situ* au niveau de leurs nacelles respectives.

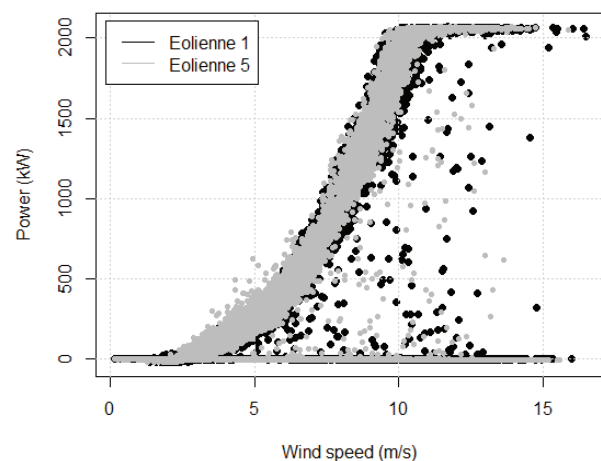


Figure 7: Puissance électrique produite par les éoliennes n°1 et n°5 (kW) en fonction de la vitesse de vent (m/s) mesurée au niveau des nacelles des éoliennes.

Les profils des puissances électriques des 3 autres éoliennes sont similaires pendant la période de la campagne expérimentale. Une vitesse de vent minimale est nécessaire

pour produire de l'énergie, elle est ici de 3m/s. La puissance produite augmente ensuite avec la vitesse de vent jusqu'à atteindre un plateau (2MW), c'est la puissance nominale des éoliennes. Au-delà d'une certaine vitesse de vent, souvent 25m/s (exceptionnelle, et non rencontrée dans cette campagne), les éoliennes sont arrêtées par raison de sécurité. Comme les éoliennes du site effectuaient des cycles marche/arrêt d'une heure, une production nulle d'électricité est aussi enregistrée pour des vitesses de vent supérieures à 3m/s. De plus, les phases de transitions entre l'arrêt et le fonctionnement des aérogénérateurs engendrent des productions plus faibles, ceci explique la présence de points en deçà de la production optimale.

4 Conclusion

Une campagne expérimentale d'envergure a été menée par le Cerema et l'Ifsttar (UMRAE) ainsi que Engie Green, en collaboration avec Echopsy, au sein d'un parc éolien afin d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des niveaux sonores et les incertitudes associées. Cette campagne avait pour but de constituer une base de données de référence concernant le bruit des éoliennes (processus physiques liées à l'émission et à la propagation), ayant pour vocation d'alimenter des travaux de recherche, puis d'être ultérieurement librement mise à disposition de la communauté scientifique. Cette communication a permis de présenter la campagne de mesure ainsi que les traitements et les premiers résultats en termes d'évolutions temporelles des niveaux sonores (en global A) et des observables influentes liées au milieu de propagation (atmosphère/réfraction) et à ses frontières (sol/impédance). Cette importante base de données servira de support à un travail d'analyse statistique prévu dans le cadre d'une thèse Ifsttar/Cerema en cours (Bill Kayser, 2017-2020), qui inclura également les effets de la turbulence atmosphérique et de la rugosité du sol sur la propagation acoustique, afin de pouvoir quantifier plus précisément les incertitudes associées aux mesures du bruit des éoliennes dans l'environnement.

Remerciements

Les auteurs remercient T. Falwisanner pour sa participation à la campagne expérimentale.

Références

- [1] R. Bowdler, G. Leventhall, *Wind Turbine Noise*, Multi-Science Pub (2011).
- [2] S. Oerlemans, P. Sijtsma, B.M López. Location and quantification of noise sources on a wind turbine, *Journal of sound and vibration*, 299(4) :869–883, (2007).
- [3] NF EN 61400-11 (décembre 2004) Aérogénérateurs - Partie 11 : techniques de mesure du bruit acoustique.
- [4] A. S. Monin, A. M. F. Obukhov. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 151(163), e187, (1954).
- [5] B. Gauvreau, D. Écotière, H. Lefèvre, B. Bonhomme. Propagation acoustique en milieu extérieur complexe – Caractérisation expérimentale in situ des conditions micrométéorologiques – Éléments méthodologiques et météorologiques, *Coll. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Réf. EG21, 68 pages, (2009)
- [6] O. Faure (conférencier), B. Gauvreau, F. Junker, Ph. Lafon, Modélisation des sols irréguliers par une impédance effective : application aux méthodes temporelles, 12^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Poitiers (F), 22-25 Avril 2014
- [7] O. Faure (conférencier), B. Gauvreau, F. Junker, Ph. Lafon, Experimental validation of the modelling of surface roughness effects by an effective impedance, invited paper, Proc. Internoise 2014, Melbourne (Australia), november 16-19 2014
- [8] G. Guillaume, O. Faure, B. Gauvreau, F. Junker, M. Bérengier, Ph. L'Hermite. Estimation of impedance model input parameters from in situ measurements: principles and applications", *Applied Acoustics*, Vol. 95, pp 27-36, (2015)
- [9] Ph. Glé, D. Ecotière (conférencier), B. Gauvreau, R. Boittin, H. Lefèvre, D. Lunain, Uncertainty of an in situ method for measuring ground acoustic impedance, Internoise 2015, San-Francisco (USA), August 2015
- [10] D. Ecotière, B. Gauvreau, F. Junker, H. Lefèvre « NF S 31-111 : une nouvelle norme pour évaluer l'influence des effets météorologiques et des effets de sol sur la mesure du bruit dans l'environnement », Proc. CFA 2018, Le Havre (F), 23-27 avril 2018
- [11] Benoit Gauvreau, Approche multi-échelle et trans-disciplinaire de l'acoustique environnementale. Acoustique [physics.class-ph]. HDR. Université du Maine, Le Mans, (2015). Disponible sur <https://www.archives-ouvertes.fr/tel-01571231/>
- [12] Y. Miki, Acoustical Properties of Porous Materials - Modifications of Delany-Bazley Models. *The Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 11 (1): 19–24, (1990)