



**HAL**  
open science

# **Effets météorologiques sur le bruit éolien aux points d'immission - Méthodes pratiques de caractérisation du milieu de propagation**

Pierre Dutilleux

## **► To cite this version:**

Pierre Dutilleux. Effets météorologiques sur le bruit éolien aux points d'immission - Méthodes pratiques de caractérisation du milieu de propagation. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. ⟨hal-03847873⟩

**HAL Id: hal-03847873**

**<https://hal.science/hal-03847873v1>**

Submitted on 10 Nov 2022

**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.



HAL Authorization



16<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
11-15 Avril 2022, Marseille

Effets météorologiques sur le bruit éolien  
aux points d'immission  
Méthodes pratiques de caractérisation  
du milieu de propagation

P. Dutilleux

Evergy Engineering GmbH, Malsenstrasse 84, 80638 Munich, Allemagne



Pendant la phase de développement d'un projet éolien, une étude acoustique est faite avec certaines hypothèses sur les conditions de propagation acoustique du bruit éolien. Les résultats des mesures effectuées pendant la phase opérationnelle ne peuvent être comparés à ceux de l'étude acoustique que si les conditions d'exploitation et de propagation sont conformes aux hypothèses de cette étude.

Après avoir utilisé pendant longtemps pour les projets éoliens et leurs sources de bruit à grande hauteur les mêmes méthodes que celles qui ont été développées pour les sources près du sol, des divergences notables sont apparues dont l'explication nécessite des méthodes spécifiques d'évaluation. Dans plusieurs pays, les investigations détaillées effectuées à la demande des régulateurs montrent combien les résultats des calculs dépendent des hypothèses faites sur les caractéristiques de l'atmosphère en tant que milieu de propagation.

L'expérience montre que la micro-météorologie du site éolien et aux points d'immission a une grande influence sur les conditions de propagation acoustique.

Les méthodes développées pour les bruits issus de sources près du sol peuvent nous donner des orientations sur la manière de collecter les informations micro-météorologiques nécessaires à la maîtrise des enjeux mais, dans le cas des projets éoliens, le profil de vitesse du son doit être caractérisé à grande hauteur. On sait par ailleurs que la couverture nuageuse et l'irradiation solaire ont une forte influence sur le profil de vitesse du vent et du gradient de température.

Après une discussion des méthodes envisageables pour collecter des informations micro-météorologiques détaillées pendant les mesures du bruit autour des fermes éoliennes, la mesure du gradient vertical de température et du cisaillement du vent est recommandée.

## 1 Introduction

La prédiction et la mesure du niveau du bruit acoustique aux points d'immission ne peuvent être précises et fiables que si les conditions d'exploitation effectives au moment des mesures correspondent aux hypothèses faites sur les sources sonores et pour le calcul de propagation acoustique autour du projet éolien.

La micro-météorologie sur le site du projet éolien et près des habitations a un fort impact sur la propagation acoustique du bruit des éoliennes (Figure 1). La prépondérance de ces effets dépend également des distances entre les sources et les récepteurs. La variabilité temporelle et spatiale due à la réfraction acoustique des sons est insuffisamment prise en compte par les méthodes communément utilisées pour les calculs de propagation acoustique. Cela induit une forte incertitude sur les niveaux prévus et mesurés aux points de réception.

Cet article s'intéresse aux variables micro-météorologiques qui devraient être surveillées pendant les campagnes de réception acoustique d'un projet éolien et aux méthodes pratiques qui peuvent être utilisées pour analyser et classer les données recueillies.

Les méthodes qui ont été développées pour collecter les informations micro-météorologiques dans le cas de sources sonores près du sol peuvent inspirer le développement de méthodes opérationnelles efficaces adaptées aux sources de bruit éolien.

## 2 Mesures météorologiques - Sources près du sol et bruit éolien

Les méthodes d'évaluation du bruit des sources près du sol, telles que le bruit routier, insistent sur l'importance de

prendre en compte le profil vertical de la vitesse du son [6], ([11] Section 8 Conditions météorologiques).

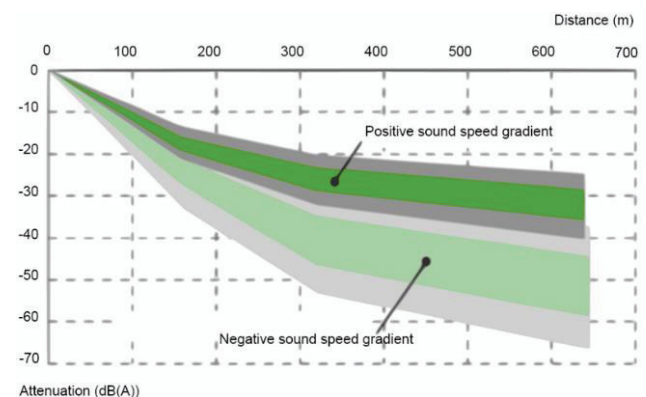


Figure 1 - Dispersion des niveaux sonores en fonction du signe du gradient vertical de vitesse du son pour une source ponctuelle [2]. La propagation est favorable statistiquement seulement quand le gradient est positif et défavorable quand le gradient est négatif [6]

Le profil de la vitesse du son est rarement mesuré directement. Il est en revanche souvent modélisé sur la base des profils de température et de vitesse du vent. L'identification précise de ces profils est fortement recommandée pendant la campagne de mesure mais elle est souvent difficile. La pratique a pourtant montré que la classification des périodes temporelles en fonction de la vitesse moyenne du vent à une hauteur donnée, dans la direction de propagation sonore, et de l'irradiation solaire pendant la journée ou la couverture nuageuse pendant la nuit peut servir de base à la caractérisation des conditions de propagation sonore. Des gradients verticaux de vitesse du vent et de température

peuvent être associés qualitativement à chacune des classes résultantes.

La stratification thermique de l'atmosphère et par conséquent le gradient de température peuvent être mis en relation qualitative avec la couverture nuageuse et l'irradiation solaire ([11] Tables A.2 et A.3).

La couverture nuageuse peut être estimée en octas ([13] A.3) par le personnel sur le site pendant de courtes périodes de mesure mais une méthode automatisée est à préférer pour les campagnes de longue durée. On pourrait se référer à une station météorologique mais, suivant la région du globe, cette station pourrait être trop distante ou bien les informations trop lacunaires. La distance à la station météorologique pourrait induire un retard temporel qui affecterait négativement la corrélation avec les autres séries de données mesurées. Le moyennage temporel des données ainsi que la période d'échantillonnage de la station météorologique pourraient être inappropriés aux besoins des mesures acoustiques autour d'une ferme éolienne dont l'intervalle de base est typiquement de 10 minutes [21].

L'irradiation solaire reçue quantifie l'énergie qui atteint le sol et est exprimée en  $W/m^2$ . La méthode de prédiction du bruit routier NMPB2008 [6] reconnaît deux valeurs conventionnelles pour les irradiations fortes et moyennes mais rappelle qu'elles ne permettent pas toujours de caractériser complètement toutes les classes de propagation acoustique. Selon la norme française NF S 31-120 [13], les conditions de propagation acoustique peuvent être caractérisées par cinq classes aérodynamiques (vitesse et direction du vent) dénommées U1 à U5 et cinq classes thermiques dénommées T1 à T5. Cette classification est habituellement dénommée UiTi ([13] Section 5 et [6] Table D.3). Une approche plus étendue considérerait le bilan énergétique à la surface du sol décrit par la somme de tous les flux de radiations à courte et grande longueur d'onde qui sont reçus et émis par la surface ainsi que des transferts thermiques turbulents de chaleurs sensible et latente ainsi qu'éventuellement des transferts de chaleur dans le sol et du stockage dans les couches de végétation [1][5]. Le nombre de stations météorologiques qui mesurent le spectre complet des flux radiatifs ainsi que les flux turbulents de chaleur est très limité car des équipements et des algorithmes d'analyse de données spéciaux sont nécessaires, en particulier pour les flux turbulents. En l'absence de données locales, le recours à une station météorologique proche risque d'être affecté par les mêmes inconvénients que pour la couverture nuageuse.

La grande hauteur au-dessus du sol à laquelle les sources sonores sont positionnées pose un défi aux calculs de propagation acoustique dans le domaine du bruit éolien. En fonction de l'orographie et du type d'utilisation du terrain, du moment du jour ou de l'année ainsi que des conditions météorologiques, des différences de gradients de température peuvent apparaître entre ces hauteurs et le sol. Il est donc préférable de mesurer le gradient de température à ces hauteurs.

Le gradient vertical du vent est habituellement déterminé sur la base de la mesure de la vitesse du vent à différentes hauteurs, deux au minimum. Le gradient de vitesse de vent ainsi déterminé est typiquement valable pour l'emplacement de la mesure. En l'absence d'information complémentaire, le même gradient de vitesse de vent est habituellement utilisé pour l'ensemble de la zone d'étude. Il faut pourtant garder à l'esprit que le gradient vertical de la vitesse du vent peut

varier significativement dans la zone d'étude. Le gradient de vitesse du vent à proximité d'une habitation peut être très différent de celui du site des éoliennes en particulier si elles sont installées au sommet d'une colline alors que les habitations sont au creux d'une vallée. Des effets supplémentaires comme ceux causés par les jets nocturnes de basse altitude (hauteur entre 50 et 500 m) conduisent à des profils de vitesse du vent qui ne peuvent plus être modélisés par des profils logarithmiques [15]. L'identification des phénomènes qui sont importants pour le bruit éolien nécessite la mise en œuvre de mâts de mesures météorologiques de la hauteur du moyeu des éoliennes afin de mesurer correctement les profils de vent et de température.

### 3 Classification des effets météorologiques sur les niveaux sonores à la réception

Les prédictions des niveaux de bruit éolien sont encore généralement établies en utilisant les méthodes développées dans le passé pour les sources près du sol. Pourtant les incohérences qui apparaissent occasionnellement entre les prédictions et les mesures sur site incitent à rechercher des méthodes mieux adaptées aux projets éoliens. Des investigations détaillées menées dans plusieurs pays montrent combien les résultats des calculs de propagation acoustique dépendent des hypothèses sur les propriétés de l'atmosphère en tant que milieu de propagation [8][18]. Nous donnons ci-dessous à titre d'exemple quelques détails du cadre réglementaire actuellement en vigueur en Allemagne.

Afin de mieux prendre en compte la variabilité des influences météorologiques dans les méthodes standards de calcul de propagation, une classification des variables météorologiques d'entrée en fonction de leur pertinence pour les phénomènes acoustiques est nécessaire, en particulier les profils de vent et de température. La prise en compte des classes de stabilité et des classes de vitesse du vent permet une approche généralisée des phénomènes de dispersion dans le cadre des modèles standards de l'atmosphère. Les différents facteurs de stress environnementaux pourront ainsi être étudiés [3][4]. Le projet de directive technique allemande VDI 4101-1 [17] s'intéresse aux spécificités de la propagation acoustique à grande distance de sources sonores situées à des hauteurs typiques pour les bruits de transport terrestre ou le bruit des éoliennes.

Une base de données météorologiques a été simulée dans ce cadre en utilisant le modèle unidimensionnel à deux couches que la directive technique allemande VDI 3783-8 [12] spécifie pour la couche limite atmosphérique [1]. Ce modèle est basé sur la théorie de la similitude de Monin-Obukhov (MOST, présentation générale par Stull, 1989 [1] et Foken, 2006 [5]). Les hypothèses simplificatrices sont les suivantes : stationnarité, terrain plat et homogène, absence de circulations à méso-échelle et de fronts météorologiques, moyennage temporel des variables météorologiques entre une minute et une heure. Le modèle permet entre autres la description des profils verticaux de la vitesse horizontale du vent et de sa direction ainsi que de la température de l'air.

Les classes de propagation du son sont déduites des six classes de dispersion qui sont par ailleurs utilisées pour

l'évaluation de la qualité de l'air [3][4]. La longueur d'Obukhov, une mesure de la force de la stratification thermique, sert à distinguer ces classes (O1 : très stable, O2 : stable, O3 : neutre-stable, O4 : neutre-instable, O5 : instable, O6 : très instable). La longueur d'Obukhov est la hauteur à laquelle la génération de la turbulence dépend plus de la flottabilité que du cisaillement du vent. La stratification thermique, ou stabilité atmosphérique, est une mesure pertinente du soutien ou de la suppression du mouvement vertical des particules d'air. Le type de stabilité (stable, neutre, instable) est directement lié au profil vertical de température. Pendant une nuit claire, les couches d'air de surface et près du sol se refroidissent en raison du rayonnement à grandes longueurs d'onde du sol. Il s'ensuit la formation d'une inversion de température avec augmentation de la température en hauteur (c'est-à-dire une stratification stable). Au cours d'une journée ensoleillée en revanche, un profil avec des valeurs décroissantes de la température de l'air se développe (c'est-à-dire une stratification instable).

Les mesures de vitesse du vent à 10 m de hauteur sont groupées en neuf classes de dispersion de W1 : 1 m/s à W9 : 12 m/s. La combinaison des classes de vitesse de vent près du sol avec les classes de stabilité atmosphérique produit arithmétiquement 54 profils de vent et de température pour chaque type de rugosité. Afin de pouvoir traiter un exemple numérique représentatif d'un site en Allemagne, une latitude géographique de 51° Nord et une longueur de rugosité de 0,1 m (prairie) ont été supposées ([17] Annexe B). Prenant en compte le fait que les combinaisons de classes de vent et de stabilité ne sont pas toutes possibles (la stratification stable ne se produit, par exemple, qu'à des vitesses de vent relativement faibles près du sol) on ne retient que 38 cas réalistes de classes de vent et de stabilité.

Les profils verticaux de la vitesse effective du son ont ensuite été déduits des profils de vent et de température. La propagation du son a été étudiée dans les directions pertinentes pour les applications pratiques : par vent portant (conditions favorables) et contre le vent (conditions défavorables). La hauteur de référence pour la direction du vent a été choisie à la hauteur de la source : 100 m. La Figure 2 montre un exemple de profils verticaux de la vitesse effective du son dans le cas d'une stratification très stable.

Le projet de directive technique détaille un exemple de calcul de propagation qui fait partie de la procédure de confirmation algorithmique de la méthode (VDI 4101-1 Annexe B [17]). Les profils verticaux de la vitesse horizontale du vent et de sa direction ainsi que de la température de l'air ont été simulés avec une équation parabolique (Crank-Nicholson Parabolic Equation CNPE) [9]. En plus du calcul de la divergence des ondes sonores, la simulation a pris en compte les phénomènes de la réflexion sur le sol et de la réfraction causée par les profils verticaux de la température et des champs de vitesse de vent. L'atmosphère et le sol herbeux ont été supposés homogènes dans la direction horizontale. Les résultats des calculs aux fréquences centrales des bandes de tiers d'octave 16 à 2 000 Hz pour des

sources sonores à 1 m et 100 m de hauteur, pour des conditions favorables et défavorables, à des distances variant de 500 à 1 000 m montrent entre autres que (Figure 3) :

- En conditions favorables, les variations des écarts de niveau acoustique par rapport aux niveaux en champ libre sont plus importantes lorsque la couche limite de l'atmosphère est très stable (O1) ;
- En conditions défavorables, les variations de niveau sont plus élevées pour les classes de dispersion neutre (O3, O4), en particulier pour la source sonore à grande hauteur ;
- Les écarts de niveau sonore par rapport au champ libre (atténuation excédentaire) sont généralement plus faibles pour la source à 100 m de hauteur que pour la source à 1 m de hauteur ;
- En conditions défavorables, dans le cas des sources à grande hauteur, les niveaux sonores sont occasionnellement plus élevés qu'en conditions favorables. Les situations pendant lesquelles cela se produit sont à prendre en compte dans le cadre de la protection des riverains.

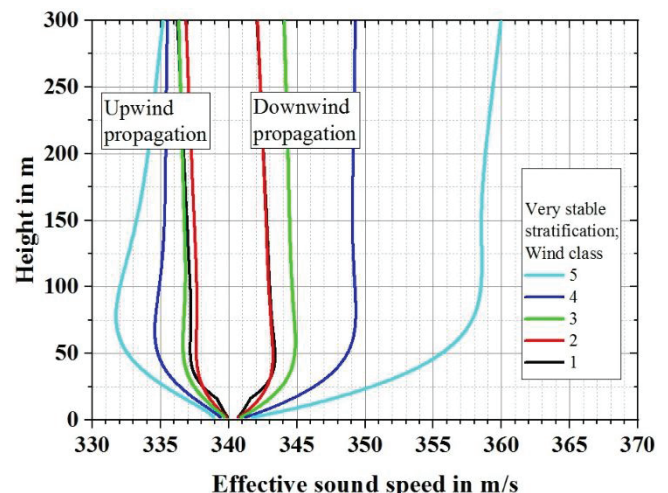


Figure 2 - Profils verticaux de la vitesse effective du son pour la classe de stabilité O1 (très stable) et cinq classes de vitesse du vent (vent de référence à 10 m au-dessus du sol, W1 : 1 ; W2 : 1.5 ; W3 : 2 ; W4 : 3 ; W5 : 4.5 m/s) en conditions défavorables et défavorables. La direction du vent est définie à la hauteur de la source : 100 m de hauteur) [19].

On constate que les propriétés du milieu de propagation acoustique doivent être soigneusement caractérisées si des résultats de calcul précis sont recherchés. Le transfert des résultats de la simulation ci-dessus à un site particulier n'est envisageable qu'à la suite d'études climatologiques des fréquences d'occurrence de certaines classes de vent et de stabilité atmosphérique sur le site considéré.

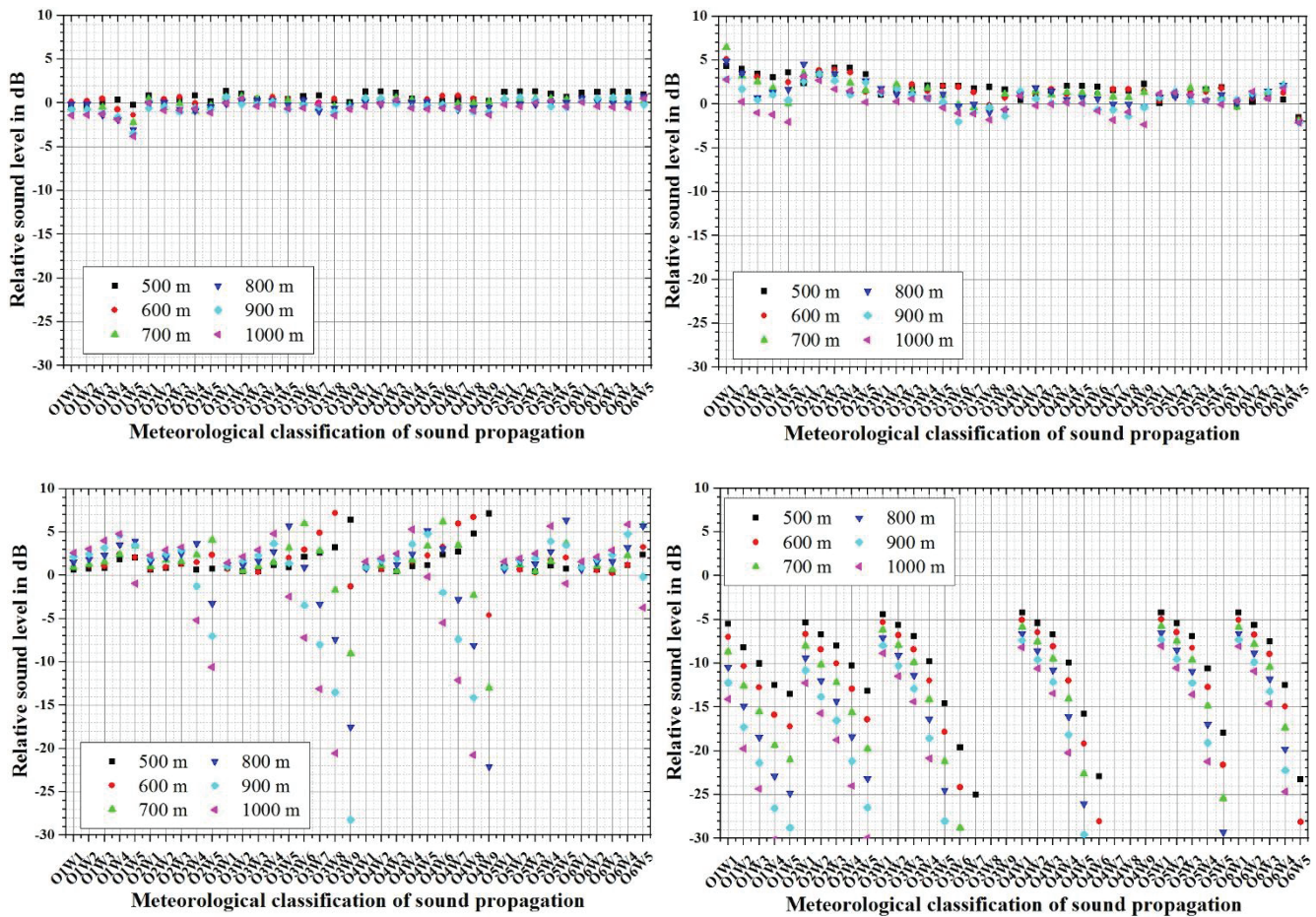


Figure 3 - Niveau sonore relatif pour 38 classes météorologiques (O : classe de stabilité, W : classe de vent) et 6 distances entre la source et le récepteur (500 à 1 000 m). Le niveau sonore relatif représente la différence entre le niveau sonore calculé avec l'effet du sol et le niveau sonore en propagation libre sans surface. Il est calculé comme la somme sur les fréquences 16 à 2 000 Hz et représente l'influence du sol corrigée de la réfraction sonore causée par la météorologie. À gauche : bruit de l'éolienne (source sonore à 100 m de hauteur). À droite : bruit de circulation (source sonore à 1 m de hauteur). En haut : conditions favorables. En bas : conditions défavorables [19]

### 4 Conditions météorologiques pendant les mesures acoustiques

Quand aucune variable météorologique n'a été collectée de façon détaillée pendant la campagne de mesure acoustique, les sources de données par réanalyse (par exemple ERA5 [23]) peuvent éventuellement permettre d'estimer les conditions météorologiques moyennes typiques du site. La grille des données de réanalyse est cependant souvent beaucoup plus large que les distances entre les éoliennes et les habitations. Elles peuvent fournir des informations sur les conditions météorologiques globales de la région mais elles ne permettent pas de fournir l'information micro-météorologique nécessaire. En plus d'une résolution spatiale et temporelle insuffisante, les modèles météorologiques utilisés pour les calculer ne permettent la prise en compte ni des effets à micro-échelle ni de la variabilité de la végétation ou du terrain sur les profils de vent et de température.

Pour la mesure des niveaux acoustiques, la norme ISO 1996-2 ([11] Section 8) demande la mesure des varia-

bles météorologiques ainsi que la documentation de la stabilité atmosphérique. Cette norme donne un exemple de définition des classes de stabilité atmosphérique et incite même à fournir une description encore plus détaillée de l'état de l'atmosphère, en particulier pour les sources à grande hauteur comme les éoliennes, sans toutefois expliquer ou spécifier comment procéder.

#### 4.1 Gradient de température

Selon Gauvreau et al. 2009 [7], le gradient de température près du sol peut être caractérisé, pour les sources près du sol, au moyen de mesures de températures à 1 m, 3 m et 10 m de hauteur. On comprend que pour les sources à grande hauteur comme les éoliennes, des mesures de température à la hauteur du moyeu soient recommandées. Elles devraient être prévues chaque fois qu'un mât météorologique de grande hauteur est disponible sur le site. Cela pourrait être le cas dans le cadre des mesures de la courbe de puissance des éoliennes ou des charges mécaniques sur leurs structures. La norme IEC 61400-13 prévoit la mesure de la stabilité atmosphérique [20] par mesure différentielle des températures à

deux hauteurs en complément des mesures de cisaillement du vent.

La température potentielle est une variable importante pour la caractérisation de la couche limite. Son gradient vertical, ou différence de température potentielle, peut être utilisé pour grouper les mesures en classes de stabilité. Les hauteurs sont à choisir de préférence près du sol et au niveau du moyeu des éoliennes mais la pratique montre qu'une différence de hauteur même limitée à quelques mètres (2 m et 10 m) apporte déjà une information très utile [10]. L'appareillage est typiquement basé sur des thermo-résistances (Pt100 par exemple). Ces capteurs sont souvent couplés à d'autres capteurs capacitifs pour la mesure de l'humidité. Les capteurs ventilés et protégés du rayonnement solaire fournissent des mesures convenant aux besoins des calculs de propagation acoustique. Cette méthode économique peut être déployée en plusieurs endroits du site en cours d'étude voire en chacun des emplacements des sonomètres. La comparaison de la stabilité atmosphérique en ces différents endroits devient alors possible.

Sur certains types d'éoliennes, la température extérieure à la nacelle est mesurée dans le but de réguler la température à l'intérieur de celle-ci. Ces mesures ne sont habituellement pas adaptées aux calculs de propagation acoustique car la chaleur émise par la machine peut affecter les valeurs mesurées. Une résolution de 1°C est généralement acceptable pour une régulation de température mais ne peut pas apporter la précision requise pour les calculs de propagation acoustique. Une mesure de température ambiante dont la résolution et l'incertitude seraient meilleures que 0,1°C permettrait une détermination du gradient de température entre le sol et la hauteur du moyeu avec une meilleure fiabilité.

Les anémomètres/thermomètres à ultrasons sont maintenant couramment utilisés en micro-météorologie depuis plusieurs années. Certains appareils mesurent en trois dimensions la vitesse et la direction du vent ainsi que la température acoustique virtuelle tout en évitant les effets néfastes de l'inertie ou de la sensibilité à l'irradiation solaire des capteurs plus traditionnels. Les capteurs de température tels que les sondes Pt100 sous abris sont sujets à une erreur due au rayonnement (positive de jour et négative de nuit) alors que les mesures des anémomètres à coupelles peuvent être affectées d'un effet de seuil au démarrage. Un anémomètre à ultrasons mesure le temps de parcours acoustique d'un signal sonore entre des émetteurs et des récepteurs espacés d'environ 20 cm, délimitant ainsi un volume de mesure de petite taille. La cadence de mesure élevée est bien adaptée à la caractérisation des rafales et des valeurs extrêmes. La mesure acoustique de la température virtuelle permet de déduire la vitesse effective du son en présence d'humidité.

Un anémomètre à ultrasons tridimensionnel permet la mesure de la stabilité atmosphérique, de la vitesse du son et de la vitesse du vent au point de mesure. La mise en œuvre d'un deuxième appareil du même type, au même emplacement mais à une hauteur différente, permet de déterminer le gradient de température entre ces deux hauteurs également.

## 4.2 Gradient vertical du vent

Dans une ferme éolienne en fonctionnement ne comprenant qu'un petit nombre d'éoliennes, le gradient vertical du vent (cisaillement) est typiquement déterminé pendant une

campagne de mesure acoustique de courte durée sur la base de la mesure de la vitesse du vent à 10 m de hauteur et de la vitesse à hauteur du moyeu telle qu'elle est fournie par les éoliennes ([14] Section 8.2). La réglementation française envisage plusieurs méthodes de détermination du cisaillement afin de d'en déduire la vitesse standardisée du vent ([21] Section 2.3 et Annexe 3).

Dans les fermes éoliennes comportant un grand nombre d'éoliennes, un mât météorologique de grande hauteur est parfois disponible. Les mesures de vitesse de vent fournies par ce mât permettent de déterminer le gradient vertical du vent indépendamment des éoliennes.

Des systèmes lidar (light detection and ranging) ou sodar (sonic detection and ranging) peuvent également être utilisés. Les systèmes sodar ont l'inconvénient d'émettre des signaux sonores dans le spectre audible qui risquent de compromettre les mesures de niveau sonore chez les riverains. Un système lidar peut fournir des informations très détaillées sur le profil vertical du vent, typiquement jusqu'à 200 m de hauteur avec un pas de 20 m. Les systèmes lidar ont l'avantage d'être plus faciles à mettre en œuvre que les mâts météorologiques de grande hauteur mais sont généralement plus onéreux. Ils fournissent de plus des moyennes spatiales de la vitesse et de la direction du vent. Cela permet d'étayer les hypothèses de distribution des vitesses du vent sur la surface du rotor des éoliennes. Il faut cependant faire attention à la hauteur minimale des mesures. Pour pouvoir s'approcher de la réalité, un calcul de propagation près du sol et au voisinage des habitations doit s'appuyer sur des informations atmosphériques détaillées à proximité du sol ( $\leq 10$  m). Les systèmes lidar commerciaux ne sont pas tous conçus pour fournir ces informations à des hauteurs aussi faibles. Une attention particulière doit également être portée aux périodes de précipitations et de brume car ces phénomènes affectent les mesures fournies par les lidars.

Un exemple d'utilisation du gradient de vent pendant une campagne de mesure du bruit à basse-fréquence est fourni par Blumendeller et al. 2020 [16]. Dans cet exemple, le bruit à basse-fréquence est plus facilement identifié dans le spectre fréquentiel quand on ne considère que les conditions météorologiques légèrement stables ( $m = 0,35$  où  $m$  est l'exposant du modèle en fonction puissance de la vitesse entre 10 m et la hauteur du moyeu.)

## 4.3 Couverture nuageuse

Bien que la documentation de la couverture nuageuse pendant les périodes de mesure soit requise par les normes sur la mesure du bruit dans l'environnement [11][13], rares sont les systèmes adaptés à ce type de mesure pour les projets éoliens opérationnels.

Des systèmes basés sur l'analyse du rayonnement infrarouge en provenance du ciel sont pourtant disponibles. Développés principalement pour la gestion des installations photovoltaïques, ils pourraient aussi trouver une application en acoustique des projets éoliens.

Les télomètres utilisés près des aéroports peuvent fournir des informations en continu sur la hauteur du plafond nuageux et sur la couverture en octas. Les appareils modernes utilisent une technologie laser.

Bien que la mesure de la couverture nuageuse soit possible, elle reste beaucoup plus difficile à mettre en œuvre que

les mesures de températures. Puisque le profil de température est le facteur déterminant des effets météorologiques sur la propagation acoustique, la mesure directe du profil de température semble être préférable à la mesure d'une couverture nuageuse qui ne fournit qu'une estimation qualitative de la stabilité de la stratification atmosphérique.

## 5 Perspectives

L'acquisition d'informations détaillées sur la vitesse du vent et la température de l'air dans le domaine de l'énergie éolienne fait l'objet de nombreuses normes internationales dans la série IEC 61400. Des lidars au sol sont parfois utilisés pour les mesures de certification des machines ou la mesure des conditions particulières d'exploitation d'un site. Un tel appareil est rarement disponible pour les études acoustiques en phase opérationnelle mais les services d'un lidar installé en nacelle deviendront peut-être plus accessibles à moyen terme [24]. Les études d'impact acoustique pourraient bénéficier des données collectées par ces lidars en complément de la mesure directe des variables météorologiques par des anémomètres à ultrasons installés sur des mâts météorologiques.

Les résultats d'une campagne de mesure acoustique dépendent encore d'autres phénomènes météorologiques comme la turbulence sur le chemin de propagation, la variation du bruit résiduel [10] ou du rapport signal sur bruit des mesures mais ces sujets sortent du cadre de cet article.

## Remerciements

Cet article en français est basé sur une publication en anglais [19] à laquelle Astrid Ziemann, a largement contribué.

## Références

- [1] Stull, R.B. (1989) An introduction to boundary layer meteorology Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- [2] Zouboff, V., Laporte, J.C. and Brunet, Y. (1998) Effets des conditions météorologiques sur la propagation du bruit, Prise en compte pratique, LCPC
- [3] Federal Ministry for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany (2002) Technical Instructions on Air Quality Control – TA Luft, Annex 3, 8 Meteorological Data
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2021) Neufassung der TA Luft, Annex 2, 9 Meteorologische Daten
- [5] Foken, T. (2006) 50 Years of the Monin-Obukhov similarity theory, *Boundary-Layer Meteorology* 119, pp. 431–447
- [6] Besnard, F., Defrance, J., Bérengier, M., Dutilleux, G., Junker, F., Gauvreau, B., Écotière, D., van Maercke, D., Abbaléa, F., Baulac, M., Bonhomme, Lefevre, H., Steimer, V., Le Duc, E., et Zouboff, V. (2009). Prédiction du bruit routier - Tome 2 (NMPB08) Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques. Sétra.
- [7] Gauvreau, B., Écotière, D., Lefèvre, H. and Bonhomme, B. (2009) Propagation acoustique en milieu complexe, Méthodes et métrologie, LCPC
- [8] Heutschi, K., (2010) Lärmermittlung und Massnahmen zur Emissionsbegrenzung bei Windkraftanlagen, EMPA
- [9] Wilson, D. K., Vecherin, S. N. and Ostashov, V. E. (2012) Modeling sound fields from directive noise sources in the presence of atmospheric refraction and ground effects In: INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Institute of Noise Control Engineering, 1094-1106
- [10] Bigot, A., Slaviero, D., Mirabel, Ch. and Dutilleux, P. (2015) Influence of vertical temperature gradient on background noise and on long-range noise propagation from wind turbines, *Wind Turbine Noise*, Glasgow
- [11] ISO 1996-2 (2017) Determination of sound pressure levels
- [12] VDI 3783-8 (2017) Environmental meteorology. Turbulence parameters for dispersion models supported by measurement data
- [13] NF S 31-120 (2018) Acoustique — Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement — Influence du sol et des conditions météorologiques, AFNOR
- [14] IEC 61400-11 Ed.3.1 (2018) Wind turbines – Part 11: Acoustic noise measurement techniques
- [15] Ziemann, A., Starke, M. and Leiding, T. (2019) Sensitivity of nocturnal low-level jets to land-use parameters and meteorological quantities *Adv. Sci. Res.* 16, 85–93, <https://doi.org/10.5194/asr-16-85-2019>
- [16] Blumendeller, E., Kimmig, I., Huber, E., Rettler, Ph. and Cheng, P.W. (2020) Investigations on Low Frequency Noises of On-Shore Wind Turbines *Acoustics* 2020, 2, 343–365, doi:10.3390/acoustics2020020
- [17] VDI 4101-1 (2020) Sound propagation outdoors in consideration of meteorological and topographical conditions – Part 1: Phenomena and Procedures
- [18] VDI 4101-2 (2020) Sound propagation outdoors in consideration of meteorological and topographical conditions – Part 2: Wind turbines
- [19] Dutilleux P., Ziemann A. (2021) Meteorological effects on wind turbine noise at the receptor location, *Wind Turbine Noise*, 2021-05
- [20] IEC 61400-13 (2021) Eoliennes - Partie 13 : Mesurage des charges mécaniques. Section 7.2.3 Stabilité atmosphérique
- [21] Ministère de la transition écologique. Protocole de mesure de l'impact acoustique d'un parc éolien terrestre. 2021-10-21. <https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-terrestre>
- [22] Arrêté du 10 décembre 2021 modifiant l'arrêté du 26 août 2011 modifié 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. TREP2136555A.
- [23] ERA5 Hourly data on single levels from 1979 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- [24] IEC PT 61400-50-3 Use of nacelle mounted lidars for wind measurements