

CFA/VISHNO 2016

Influence du gradient vertical de température sur les niveaux sonores résiduels dans le cadre de mesures de réception acoustique de parcs éoliensA. Bigot^a, C. Mirabel^b et P. Dutilleux^c^aSoldata Acoustic, Parc de L'île, 21 rue du Port, 92022 Nanterre, France^bSoldata Acoustic, Espaces Ste Baume, 30 Av du Château de Jouques, 13420 Gemenos, France^cEvery Engineering GmbH, Malsenstrasse 84, 80638 Munich, Allemagne
alexis.bigot@soldata-acoustic.com

LE MANS

Les réceptions acoustiques des parcs éoliens sont réalisées, en France, à proximité des habitations riveraines, et nécessitent de caractériser les niveaux sonores résiduels et ambiants à l'aide de programmation de marche-arrêt des éoliennes pendant une campagne de mesures qui dure en général au moins une semaine. Les échantillons de niveaux sonores sont exprimés en $L_{50,10mn}$ vis-à-vis d'une vitesse standardisée à 10 m. La norme NF S 31-114 recommande de classer ces échantillons en classes homogènes, qui peuvent être basées sur des critères environnementaux ou météorologiques (ex : activités humaines, réveil de la nature, plages horaires, direction de vent, autres conditions météorologiques etc.).

L'expérience montre que les résultats pour un même site peuvent être très variables d'une campagne de mesures à une autre, et qu'il est parfois nécessaire d'analyser les mesures en regard d'autres facteurs météorologiques que la direction et la vitesse de vent.

Dans cet article nous montrerons comment le gradient vertical de température peut être un moyen d'affiner la définition des classes homogènes, en réduisant la dispersion des échantillons de mesures au sein de ces classes.

La classification proposée est basée sur la mesure du gradient de température potentielle entre deux hauteurs (ex : 2 m et 10 m), qui est un moyen relativement simple mais efficace et robuste d'évaluer la stabilité atmosphérique. Cette méthode, a été appliquée avec succès sur plusieurs campagnes de mesures de réceptions acoustiques.

1 Introduction

La réglementation en France est basée sur le concept d'émergence, qui est la différence entre le bruit ambiant (mesuré lorsque les éoliennes sont en fonctionnement) et le bruit résiduel (mesuré lorsque les éoliennes sont à l'arrêt).

Les mesures de bruit sont réalisées à proximité des habitations riveraines, à l'aide de l'indice fractile $L_{50,10mn}$ des échantillons $L_{Aeq,1s}$.

Les mesures météorologiques peuvent être réalisées de différentes manières, mais sont en fine exprimées en termes de vitesse de vent standardisée à 10 m, notée V_s . Cette dernière correspond à la vitesse de vent au moyen ramenée à des conditions de référence (hauteur 10 m et longueur de rugosité 0,05 m) en faisant l'hypothèse d'un profil logarithmique. Si l'on se réfère à un profil en fonction puissance, la vitesse de vent standardisée peut également être obtenue en ramenant la vitesse de la hauteur du moyen à 10 m de hauteur en utilisant comme exposant de la fonction puissance un "facteur de cisaillement" ou "shear factor" dont la valeur typique couramment utilisée de $\alpha = 0,16$ est valide pour une conversion entre 75 m et 10 m [2][5].

Les normes de référence pour les mesures acoustiques et météorologiques sont : NF S31-114 et NF EN 61400-11.

2 Influence du gradient de vent sur les niveaux sonores résiduels

Le niveau de bruit résiduel retenu est un paramètre déterminant des projets éoliens. Lorsqu'il est surestimé lors de la phase de développement du projet, il peut s'avérer difficile de mettre le parc en conformité lorsqu'il entre en exploitation. L'expérience montre, en France comme à l'étranger, qu'il est difficile de déterminer le niveau de bruit résiduel avec une bonne fiabilité. Il n'est pas rare que des campagnes de mesures répétées sur le même site fournissent des résultats notablement divergents [11].

2.1 Effet du gradient de vitesse du vent sur le niveau de bruit résiduel

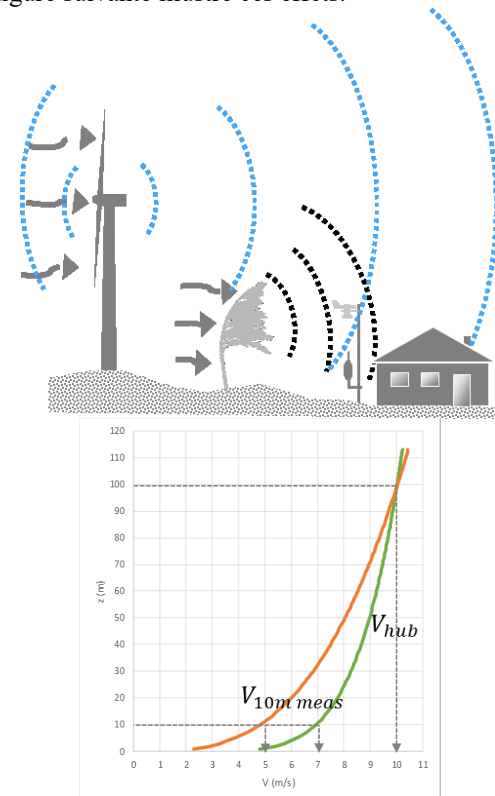
Les niveaux sonores résiduels peuvent être très faibles dans les zones rurales, lorsque le trafic routier et les activités humaines sont faibles, notamment en période nocturne. Dans ces conditions le bruit induit par le vent sur la végétation (qui dépend fortement de la vitesse de vent

proche du sol) a une influence importante sur les niveaux sonores résiduels.

Les niveaux sonores ambiants (mesurés lorsque les éoliennes sont en fonctionnement) sont dépendants de la vitesse de vent au moyen.

Il est dès lors facile de comprendre comment facteur de cisaillement α peut avoir un impact déterminant sur les niveaux sonores résiduels : pour une vitesse de vent donnée au moyen, le choix d'une faible valeur α va induire une forte vitesse de vent proche du sol (et par conséquent un niveau sonore résiduel "élevé"). Et le choix d'un α plus grand va induire une faible vitesse de vent proche du sol (et par conséquent un niveau sonore résiduel "faible").

La figure suivante illustre ces effets.



Facteur de cisaillement α	V_{Hub}	V_s	V_{10} , mesurée	Bruit résiduel
0,16	10 m/s	7 m/s	7 m/s	40 dB(A)
0,32	10 m/s	7 m/s	5 m/s	30 dB(A)

Figure 1 : Illustration de l'effet du gradient de vent sur les niveaux sonores résiduels

2.2 Résultats de mesures

Voici à titre d'exemple quelques résultats issus de deux campagnes de mesures d'une durée de un mois chacune qui ont été réalisées avant l'installation du parc, à l'aide de mesures de bruit en 6 positions, d'un mât météo de grande hauteur (100 m, 70 m, 50 m et 20 m). Ces campagnes de mesures ont été effectuées à différentes périodes de l'année.

Les résultats sont présentés ci-dessous à l'aide de nuages de points des échantillons $L_{50,10\text{min}}$ en fonction de la vitesse de vent standardisée V_s .

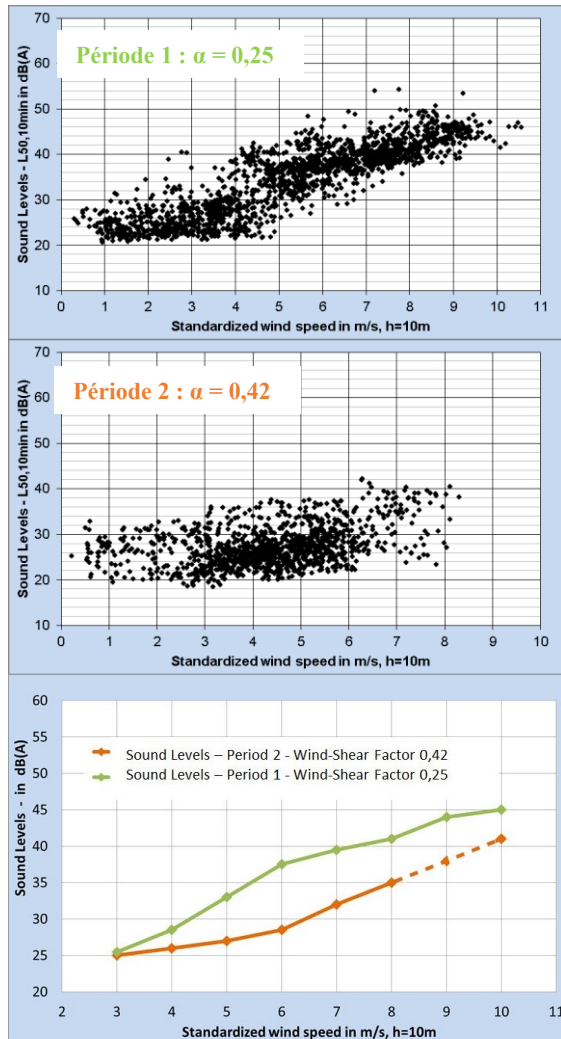


Figure 2 : Niveaux sonores résiduels mesurés lors de deux périodes présentant des gradients de vent différents. Les valeurs à 9 et 10 m/s pour la période 2 sont extrapolées

Commentaire : Pour une même vitesse de vent standardisée V_s (donc pour une même vitesse au moyen) on observe le phénomène décrit au paragraphe précédent : le facteur de cisaillement a un impact important sur les niveaux sonores résiduels.

Il est donc important de pouvoir caractériser le gradient de vent lors des mesures acoustiques de parcs éoliens. Ceci est possible lors des mesures d'état initial, pendant lesquelles un mât météorologique de grande hauteur est souvent disponible. C'est en revanche rarement possible en phase de réception acoustique, car le mât de grande hauteur a généralement été déposé.

En l'absence de mât de grande hauteur, l'utilisation d'un mât de 10 m est recommandée pour plusieurs raisons :

- Il est nécessaire pour la mesure du bruit résiduel car, lorsque les éoliennes sont à l'arrêt, les informations de vitesse fournies par les anémomètres de nacelle ne sont parfois pas fiables
- Il est nécessaire lorsque les éoliennes sont en fonctionnement et que les vitesses de vent mesurées par l'anémomètre nacelle ou déduites de données d'exploitation ne sont pas fiables.
- Lors des mesures de bruit ambiant, les vitesses mesurées au niveau de la nacelle et celles mesurées à 10 m offrent un moyen de caractériser le facteur de cisaillement moyen pour chaque période de 10 minutes.

3 Relation entre le gradient de température et le gradient de vitesse de vent

Dans d'autres secteurs industriels, la problématique et la prévision de la dispersion des polluants dans l'atmosphère a conduit à des études spécifiques de la couche limite de l'atmosphère [1][2] dont certaines notions et résultats sont applicables ici.

3.1 Notion de classe de stabilité atmosphérique

La mesure du gradient vertical de température peut être utilisée afin de classifier la stabilité de l'atmosphère. On peut pour cela se baser sur les classes de stabilité de Pasquill (classes A à F) [1] qui sont rappelées ci-dessous, avec leur correspondance en terme de gradient de température :

Classe de stabilité	Définition	Plage de gradient de température vertical ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)
A	Très instable	$\Delta T/\Delta Z < -1,9$
B	Instable	$-1,9 \leq \Delta T/\Delta Z < -1,7$
C	Faiblement instable	$-1,7 \leq \Delta T/\Delta Z < -1,5$
D	Neutre	$-1,5 \leq \Delta T/\Delta Z < -0,5$
E	Faiblement stable	$-0,5 \leq \Delta T/\Delta Z < 1,5$
F	Stable	$1,5 \leq \Delta T/\Delta Z$

Vitesse de vent au sol m/s	Jour : radiation solaire			Nuit : couverture nuageuse	
	Forte	Modérée	Faible	>50%	<50%
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Figure 3 : Classes de stabilité de Pasquill et conditions météorologiques associées

L'expérience acquise lors de la réception acoustique de parcs éoliens en France nous incite à proposer la classification simplifiée suivante, en considérant la classe « Neutre » comme très faiblement instable :

- Classe 1 : Gradient de température supérieur à une valeur proche de $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$: atmosphère stable, donc un gradient vertical de vent potentiellement fort.
- Classe 2 : Gradient de température inférieur à une valeur proche de $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$: atmosphère instable, donc un gradient vertical de vent potentiellement faible.

3.2 Différence de température potentielle

La mesure de la différence de température entre deux couches d'air permet de mettre en évidence certains flux d'énergie entre ces deux couches [3][4][15]. Cette différence est affectée par plusieurs effets. L'un d'eux, la transformation adiabatique entre les deux couches n'est pas pertinente dans notre usage et peut être compensée en considérant la température potentielle.

$$\theta = T \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}}$$

Où T est la température absolue mesurée, p est la pression atmosphérique mesurée, p_0 est la pression de référence (ex : 1013,25 hPa), et où R et C_p sont respectivement la constante des gaz parfaits et la chaleur massique à pression constante de l'air.

Afin de mieux comprendre la signification de cette différence de température potentielle, considérons quelques situations pratiques.

Pendant la journée, le sol s'échauffe par le rayonnement solaire. La température potentielle du sol devient généralement plus élevée qu'au-dessus du sol et un transfert de chaleur par convection mélange la couche limite et conduit à une stratification instable. Dans ces conditions, le cisaillement vertical du vent sera généralement faible.

Après le coucher du soleil, le sol conserve l'énergie rayonnée jusqu'à ce que sa température potentielle devienne inférieure à celle de la couche limite.

Pendant la nuit, en l'absence de transfert de chaleur par convection à partir du sol, la stratification de la couche limite se stabilise. Si un vent chaud souffle pendant la nuit, une couche d'air chaud va glisser au-dessus d'une couche plus froide. Les éoliennes peuvent fonctionner à la puissance nominale, alors que la vitesse du vent dans la couche froide près du sol sera très faible. Dans ces conditions, le bruit de l'éolienne pourrait devenir plus important que le bruit de fond induit par un faible vent au sol.

La couverture nuageuse joue un rôle important dans les variations du flux d'énergie entre le sol et les couches d'air. Pendant la journée, une couverture nuageuse réduit l'échauffement du sol par le rayonnement solaire. D'autre part, au cours d'une nuit claire, la température du sol diminue plus rapidement que la couche limite et une stratification très stable peut apparaître.

Nous avons négligé ici l'influence de l'humidité mais, pour être précis, il faudrait également la prendre en compte.

3.3 Résultats de mesures

Voici à titre d'exemple quelques résultats obtenus à la suite d'une campagne de mesures d'observation des

conditions météorologiques qui a été réalisée durant un mois sur une zone de plaine à l'aide de stations météorologiques placées à 2 m et 10 m de hauteur, en complément des informations anémométriques fournies par les éoliennes.

Les mesures de température sensible ont été converties en température potentielle afin de pouvoir être comparées entre elles.

La hauteur de 10 m est retenue car il s'agit d'une hauteur standard dont les résultats peuvent être utilisés pour des corrélations avec d'autres données météorologiques. La hauteur de 2 m est retenue car elle correspond à une hauteur proche de celle des microphones pour les mesures de bruit.

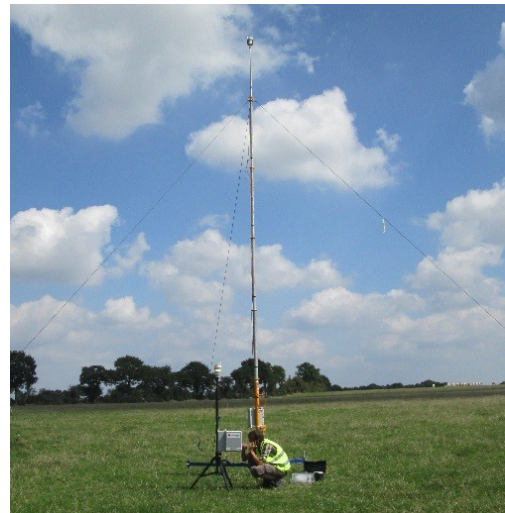


Figure 4 : Exemple d'installation avec 2 stations météo à 2 m et 10 m de hauteur

Afin d'illustrer la relation entre le gradient vertical de température et le gradient vertical de vitesse de vent, nous présentons ci-dessous l'évolution du facteur de cisaillement et de la différence de température potentielle durant deux journées consécutives de cette campagne de mesures.

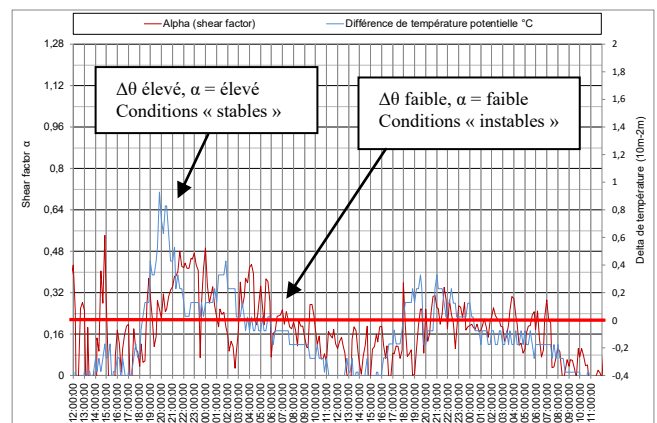


Figure 5 : Evolution du facteur de cisaillement et de la différence de température potentielle durant 2 jours consécutifs

Commentaires :

- On remarque tout d'abord une bonne correspondance entre le gradient vertical de vitesse de vent et la différence de température potentielle, avec un léger décalage temporel entre les deux, le gradient de température se manifestant parfois

quelques heures avant l'apparition du gradient de vent.

- Comme indiqué sur ce graphe, on observe durant la première nuit le passage de conditions stables à instables, au travers d'une inversion du gradient de température durant la nuit. Durant cette nuit la vitesse de vent est restée globalement stable autour de 6 à 7 m/s à 100 m de hauteur.
- Durant la deuxième nuit, marquée par des vitesses de vent plus élevées (environ 10 m/s à 100 m), le même phénomène d'inversion du gradient est apparu, mais de façon moins marquée.

La mesure de différence de température potentielle peut donc être utilisée pour caractériser la stabilité de l'atmosphère selon une classification simplifiée (stable / instable). Du point de vue pratique, cela permet de définir de nouvelles « classes homogènes » en application de la norme NF S 31-114 lors de la réception acoustique de parcs éoliens.

Cette méthode peut également être appliquée durant les mesures d'état initial, notamment lorsqu'aucun mât de grande hauteur n'est disponible pour évaluer le gradient vertical de vent ou tout au moins le classifier.

L'expérience confirme que la classification en fonction de la stabilité de la stratification atmosphérique apporte des résultats similaires à ceux illustrés par la figure 2. Le bruit résiduel est nettement plus faible lorsque la stratification est stable que lorsqu'elle est instable. Cette classification conduit à une nette réduction des incertitudes de mesure et permet de mieux identifier les périodes pendant lesquelles le parc éolien est/sera particulièrement perceptible,

L'expérience montre également qu'une mesure de vent à 10 m est parfois affectée de façon significative par le fonctionnement des turbines à proximité du mât de mesures, contrairement à la différence de température potentielle qui est moins influencée par les obstacles présents sur le site.

D'autres informations et méthodes ont également été envisagées :

- La mesure de la température à hauteur de nacelle aurait permis de constater des écarts de températures plus importants qu'entre 2 m et 10 m mais n'était pas disponible.
- La mesure de la température du sol est généralement recommandée par les météorologues.
- L'utilisation d'un anémomètre ultrasonique 3D à 3 m de hauteur a été testée. Cette méthode est prometteuse mais est nettement plus coûteuse et fragile. De plus, elle nécessite une alimentation électrique sur le secteur alors que la mesure des températures peut être assurée grâce à des systèmes photovoltaïques autonomes.
- L'utilisation de SODAR ou de LIDAR est souvent évoquée mais ces appareils sont prévus pour la mesure à grande hauteur et sont peu adaptés aux mesures près du sol. Rappelons ici que la vitesse du vent près du sol est déterminante pour le bruit résiduel induit par le vent dans l'environnement.

4 Influence des conditions météorologiques sur la propagation sonore

La fiabilité des résultats de calculs de propagation acoustique et des hypothèses faites sur les sources acoustiques à grande hauteur font souvent l'objet de discussions [8] mais les résultats intermédiaires des mesures que nous avons faites jusqu'à maintenant tendent à montrer, aux incertitudes de mesure près, que le niveau du bruit particulier est peu influencé par la stratification (stable ou instable).

L'objet n'est pas ici de réaliser une étude théorique détaillée, mais d'illustrer au travers d'un exemple concret quelle peut être l'influence des gradients de vent et de température sur la propagation sonore.

4.1 Principes

On a vu précédemment que les gradients verticaux de vitesse et de température sont des grandeurs qui sont physiquement liées.

Ces deux paramètres interviennent également dans le profil de célérité du son $c(z)$ qui est responsable de la réfraction lors de la propagation sonore.

$$c(z) = \sqrt{\gamma RT(z)} + v_{100m} \left(\frac{z}{100} \right)^\alpha \cos(\beta)$$

Où z est l'altitude en m, v_{100m} est la vitesse de vent à 100 m de hauteur, α est le facteur de cisaillement, et β est l'angle entre la direction du vent et l'axe source-récepteur.

Afin d'illustrer l'impact des conditions météorologiques sur la propagation sonore, on utilisera à titre d'exemple les conditions météorologiques observées durant la première nuit identifiée sur la figure 5 :

- Début de nuit (moyenne 22h-0h), gradient de vent élevé : $\alpha = 0,395$, $\Delta\theta = 0,011$ °C/m.
- Milieu de nuit (moyenne 1h-3h), gradient de vent faible : $\alpha = 0,163$, $\Delta\theta = 0,029$ °C/m.

Le choix de ces périodes n'est pas fait sur des critères de stabilité de l'atmosphère, mais plus naturellement sur deux périodes caractéristiques de la période réglementaire nocturne (22h-7h) durant lesquelles les paramètres des gradients verticaux de vitesse de vent et de température sont restés globalement stables.

Le graphe ci-dessous présente les profils de célérité $c(z)$ correspondant à ces deux situations, en se plaçant en conditions de vent contraire ($\beta = 180^\circ$).

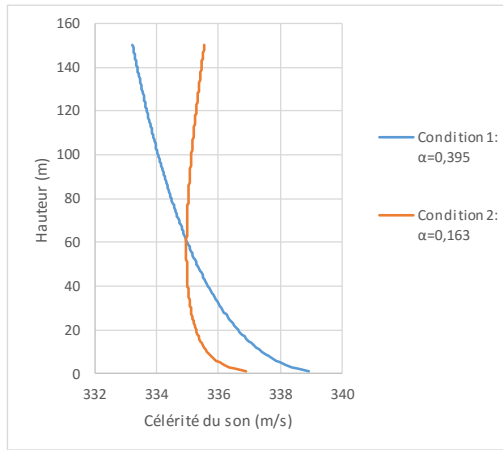


Figure 6 : Profil vertical de célérité du son $c(z)$ en vent contraire, pour les conditions 1 et 2 observées durant la même nuit

Des simulations acoustiques sont ensuite réalisées à l'aide d'un modèle d'Equation Parabolique 2D prenant en compte les effets de la réfraction (via le profil vertical de célérité) et de la turbulence atmosphérique (via le modèle de Von Karman avec variance de fluctuation d'indice $\langle \mu^2 \rangle = 2 \cdot 10^{-6}$). Dans cette approche théorique, la source a été modélisée à l'aide d'une source ponctuelle en rotation autour du moyeu situé à 100 m de hauteur, et le sol a été considéré comme plat.

4.2 Résultats des simulations

En vent portant, les simulations ont montré très peu de différences entre les deux conditions météorologiques identifiées. Les résultats des simulations sont donc présentés ci-dessous uniquement en conditions de vent contraire.

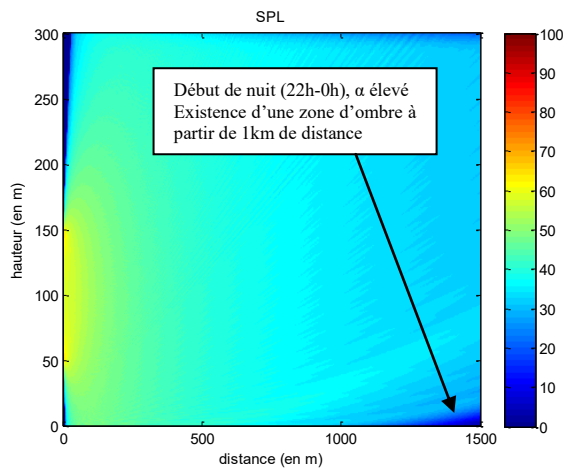


Figure 7 : Propagation sonore en condition 1 (début de nuit) par vent contraire avec fort gradient de vent : $f=250$ Hz, $\alpha = 0,395$, $\Delta\theta = 0,011$ °C/m, $V_{100m}=6,6$ m/s

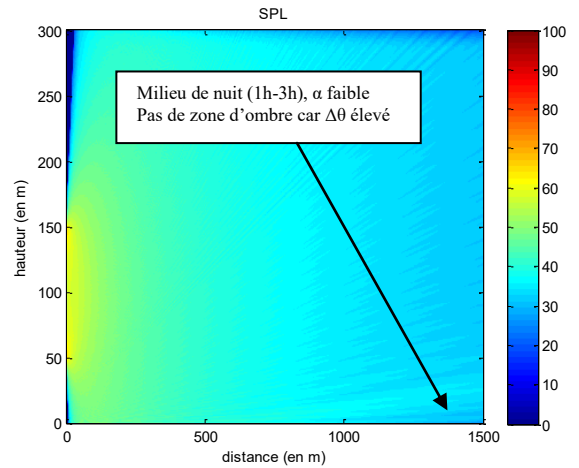


Figure 8 : Propagation sonore en condition 2 (milieu de nuit) par vent contraire avec faible gradient de vent : $f=250$ Hz, $\alpha = 0,163$, $\Delta\theta = 0,029$ °C/m, $V_{100m}=6,6$ m/s

Commentaires :

- En vent portant, comme dit précédemment, l'impact des gradients verticaux de vitesse de vent et de température est négligeable sur la propagation sonore.
- En vent contraire et par gradient de vent faible, il peut y avoir des situations où un gradient thermique positif inverse le profil de célérité (comme indiqué en figure 6). Les conditions météorologiques peuvent dans ce cas avoir un impact important sur les niveaux sonores des machines, avec une augmentation pouvant aller jusqu'à 10 à 20 dB. Cet impact n'est visible qu'à grande distance des machines (ex : au-delà de 1 km environ pour une éolienne de 100 m de haut).

5 Conclusions

L'étude du gradient vertical de température est pertinent aussi bien dans l'étude des niveaux de bruit résiduel que pour la propagation du bruit provenant d'une éolienne.

Il devrait être pris en compte lors des mesures de bruit des parcs éoliens afin d'identifier les périodes critiques [8]. Lorsque le gradient vertical de vitesse du vent ne peut pas être mesuré directement, la différence de température potentielle est une méthode alternative qui est économique et robuste. Cette méthode a été utilisée avec succès sur une grande série de campagnes de mesures, afin de définir des «classes homogènes» des conditions météorologiques avec leurs niveaux de bruit correspondants.

Alors que les programmes d'optimisation acoustique des parcs éoliens sont actuellement basés essentiellement sur la vitesse et la direction au moyeu, il serait intéressant d'étudier la possibilité de prendre en compte également le gradient de vent et/ou de température potentielle.

Une étude de la propagation du bruit d'éolienne a également été réalisée par le biais de simulations informatiques. A titre d'illustration, nous avons retenu deux conditions météorologiques présentant des gradients de vent et de température différents, et qui se sont succédées durant une même nuit. Cet exemple a permis d'illustrer comment le gradient vertical de température peut influencer la propagation du bruit en supprimant la zone d'ombre, généralement présente en condition de vent contraire.

L'impact sur la propagation sonore n'est cependant visible qu'en vent contraire et à grande distance uniquement (ex : au-delà de 1 km environ pour une éolienne de 100 m de haut). Une recherche plus poussée serait nécessaire pour vérifier ces effets, par exemple grâce à des séries de mesures de bruit à grandes distances, avec en parallèle des mesures micro-météorologiques détaillées.

Références

- [1] F. Pasquill, *The estimation of the dispersion of windborne material*, The Meteorological Magazine, Vol. 90, No. 1063, pp. 33-49 (1961).
- [2] J.S. Touma, *Dependence of the Wind Profile Power Law on Stability for Various Locations*, J. Air Pollution Control Association (1977).
- [3] J.R. Garratt, *The atmospheric boundary layer* (1994).
- [4] M. Strack, A. Albers, *Analyse und Extrapolation des Windprofils am 130 Meter-Meßmast des DEWI*, DEWI Magazin (1996).
- [5] E.L. Petersen, N.G. Mortensen, L. Landberg, J. Hojstrup, H.P. Frank, *Wind Power meteorology*, Risoe (1997).
- [6] R. Stull, *Meteorology for Scientists and Engineers*, Brooks/Cole (2000).
- [7] Erik M. Salomons, *Computational Atmospheric Acoustics*, Kluwer Academic Publishers (2001). NF EN 61400-11 (2004)
- [8] G. P. van den Berg, *The sounds of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine and microphone noise*, Université de Groningue (2006).
- [9] K. Bleibler, T. Kramkowski, N. Cosack, K. Braun, *The Influence of Meteorological Parameters on the Operational Behavior of Multi-Megawatt WEC*, DEWEK (2006).
- [10] H.-J. Albrecht, E. Peters, *Der Einfluss turbulenter Temperatur- und Windfluktuationen auf die Standardabweichung des akustischen Beurteilungspegels*, LUA Brandenburg (2007).
- [11] D. Bowdler, *What is the Real Background Noise ?*, Wind Turbine Noise (2007).
- [12] R. Kochanowski et N. Mackenzie, *Atmospheric Stability Specific Noise Criteria and Noise Prediction for Wind Farms*, Acoustics (2008).
- [13] P. Dutilleux, J. Gabriel, *Recommendations for Improved Acceptance of Wind Farm Projects in France with Regard to Acoustic Noise*, DEWI Magazin No. 32 (2008).
- [14] P. Dutilleux, J. Gabriel, *Assessment of the acoustic noise issues of wind farm projects in the light of the experience gained in Germany*, DEWEK (2008).
- [15] S. Malardel *Fondamentaux de Météorologie*, Cépaduès (2009).
- [16] NF S 31-114, *Acoustique - Mesurage du bruit dans l'environnement avec et sans activité éolienne* (2011).
- [17] J. Gabriel, S. Vogl, T. Neumann, G. Hübner, J. Pohl, *Amplitude modulation and complaints about wind turbine noise*, Wind Turbine Noise (2013).
- [18] Bowdler et Leventhall, *Wind Turbine Noise* (2011).
- [19] Y. He, A.H. Monahan, N.A. McFarlane, *Diurnal variations of land surface wind speed probability distributions under clear-sky and low-cloud conditions*, Geophysical Research Letters (2013).
- [20] *A Good Practice Guide to the Application of ETSU-R-97, Supplementary Guidance Note2: Data Processing & Derivation of ETSU-R-97 Background Curves*, IOA (2014).