Effets météorologiques sur le bruit rayonné par les éoliennes

Benjamin Cotté, Yuan Tian, Antoine Chaigne

▶ **To cite this version:**

Benjamin Cotté, Yuan Tian, Antoine Chaigne. Effets météorologiques sur le bruit rayonné par les éoliennes. Congrès Français d'Acoustique, Apr 2014, Poitiers, France. hal-01206961

HAL Id: hal-01206961

https://ensta-paris.hal.science/hal-01206961

Submitted on 29 Sep 2015

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.

Effets météorologiques sur le bruit rayonné par les éoliennes

B. Cotté, Y. Tian et A. Chaigne
UME - ENSTA ParisTech, 828 boulevard des Maréchaux, 91762 Palaiseau Cedex, France
benjamin.cotte@ensta.fr

Cette étude vise à expliquer les différences observées entre le bruit rayonné par une éolienne en champ proche et en champ lointain, en montrant l'influence des conditions météorologiques à la fois sur les sources de bruit d'une éolienne et sur la propagation de ce bruit dans l'atmosphère. Des données expérimentales ont été analysées afin d'obtenir des profils de vent et de température réalistes dans l'atmosphère. Dans certains cas, les profils de vent prédits par la théorie de la similitude différent fortement des profils mesurés, ce qui conduit à des prédictions erronées du bruit rayonné en champ proche (100 m) comme en champ lointain (jusqu'à 1 km). Le modèle de source montre que les plus fortes amplitudes de modulation sont obtenues dans la direction perpendiculaire au vent, alors que le modèle de propagation met en évidence des niveaux sonores plus importants dans la direction du vent pour des distances supérieures à 800 mètres environ.

1 Introduction

Le bruit des éoliennes, et en particulier les modulations d'amplitude associées à ce bruit, peut être la source d'une gêne pour les habitants situés à proximité d'un parc éolien. Des études récentes ont montré que ces modulations d'amplitude peuvent être expliquées en champ proche par les caractéristiques des sources de bruit aérodynamiques large bande, et par l'effet Doppler associé au mouvement des pales par rapport à un observateur fixe [1, 2]. Des mesures réalisées en champ lointain, ont par contre montré que le bruit n'est audible que dans certains directions de propagation, avec des fluctuations d'amplitude qui peuvent être importantes, notamment la nuit où les conditions atmosphériques stables sont les plus fréquentes [3].

Ce travail vise à comprendre l'influence des conditions météorologiques sur le bruit rayonné par une éolienne en champ proche et en champ lointain. Pour cela, nous modélisons la source aéroacoustique principale d'une éolienne, le bruit de bord de fuite, par la théorie d'Amiet, et la propagation acoustique dans l'atmosphère par un modèle d'équation parabolique, comme cela est décrit dans le paragraphe 2. Puis, des mesures atmosphériques sont analysées afin d'obtenir des profils de vent et de température réalistes dans le paragraphe 3.1. Les résultats en champ proche issus du modèle de source sont étudiés dans le paragraphe 3.2, puis les résultats jusqu'à 1 km obtenus à l'aide du modèle de propagation sont présentés dans le paragraphe 3.3.

2 Modélisation de la source et de la propagation dans l'atmosphère

2.1 Modèle de source aéroacoustique basé sur la théorie d'Amiet

Dans un article récent [4], nous avons montré que deux des sources principales de bruit large bande d'une éolienne, le bruit de bord de fuite et le bruit d'impact de turbulence, peuvent être modélisées par la théorie d'Amiet. Nous ne considérons dans la suite que le bruit de bord de fuite qui est généralement la source dominante d'une éolienne de grande taille. La principale difficulté avec ce modèle est d'avoir accès au spectre de pression pariétale. Nous utilisons pour cela le modèle proposé par Rozenberg *et al.* [5], qui prend en compte les gradients de pression le long du profil qui jouent un rôle important sur le bruit rayonné [4].

Afin de valider les résultats de notre modèle, nous comparons nos prédictions aux mesures présentées par Leloudas [6] pour une éolienne Siemens SWT 2.3-92 de puissance nominale 2.3 MW. L'éolienne a une hauteur de mât de 80 m et un diamètre de rotor de 93 m. Les trois pales ont une longueur de 45 m, et une corde qui décroit de 3.5 m à 0.8 m de l'emplanture à l'extrémité. Il s'agit d'une éolienne dont la puissance est contrôlée par un angle de calage variable. Leloudas [6] a analysé des spectres en tiers d'octave de la puissance acoustique pour trois jeux de vitesse de vent, de vitesse du rotor et d'angle de calage, dont deux sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 – Paramètres des spectres du niveau de puissance L_W mesurés par Leloudas [6].

Cas	A	B
U(80m) (m/s)	6	9.5
Vitesse du rotor (tr/min)	13	17
Angle de calage	3°	5°
L_W mesuré (dBA)	97.0	105.8
L_W calculé sans pitch (dBA)	92.0	101.3
L_W calculé avec pitch (dBA)	93.1	101.1

Pour calculer le bruit rayonné par cette éolienne, chaque pale est divisée en 17 segments dont la longueur décroit de 5 m à l'emplanture à 2 m à l'extrémité, de manière à garder un allongement, rapport de l'envergure sur la corde, supérieur à un le long de la pale. La rotation de la pale est divisé en 36 positions (résolution angulaire de 10°). Enfin, le calcul est réalisé pour 40 récepteurs au niveau du sol situés sur un cercle de rayon 100 m autour de l'éolienne.

Pour chaque segment, chaque pas angulaire et chaque récepteur, le bruit de bord de fuite est calculé à l'aide du modèle d'Amiet, et une correction due à l'effet Doppler est appliquée. Le niveau de puissance L_W est ensuite obtenu à partir du niveau de pression L_p en champ libre en supposant que l'éolienne rayonne comme un monopôle : $L_W = L_p + 10\log_{10}(4\pi R^2)$, avec $R \approx 128$ m la distance entre le centre du rotor et le récepteur. Le niveau de puissance dépend donc du récepteur considéré ; dans cette partie nous utilisons le récepteur dans la direction du vent pour estimer le niveau de puissance. Les spectres de puissance en tiers d'octave sont comparés aux mesures de Leloudas [6] sur la figure 1. On observe que l'allure général du spectre est bien reproduit, même si les prédictions sous-estiment les mesures, en particulier aux hautes fréquences. Le tableau 1 montre que le niveau global en dB(A) est 4 à 5 dB(A) inférieur dans les calculs par rapport au mesure. Cette différence peut

s'expliquer par la présence d'autres sources de bruit (bruit d'impact de turbulence, bruit de décrochage, ...), et par la méconnaissance du profil de vent lors des mesures. On remarque également sur la figure 1 que la prise en compte de l'angle de calage change la distribution fréquentielle de façon assez importante, et permet d'obtenir un meilleur accord avec les spectres mesurés.

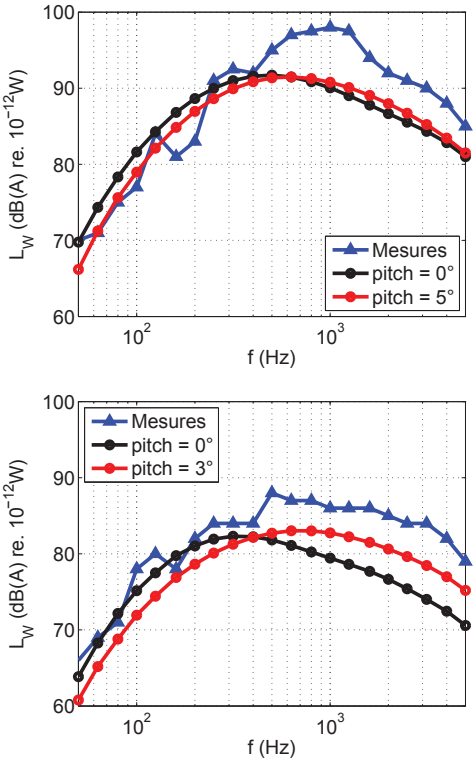

FIGURE 1 – Spectres en tiers d'octave du niveau de puissance mesurées par Leloudas (triangles), et calculés avec le modèle d'Amiet du bruit de bord de fuite (cercles) dans le cas A (en haut), et dans le cas B (en bas).

2.2 Modèle de propagation acoustique basé sur l'approximation parabolique

Il existe différentes méthodes pour obtenir une équation parabolique grand angle, qui permet de résoudre l'équation d'Helmholtz de façon efficace dans une atmosphère inhomogène stratifiée au repos. Nous choisissons ici la méthode Split-Step Padé (2,2), qui permet d'obtenir une validité angulaire supérieure à 45° tout en gardant un coût de calcul raisonnable [7]. Les calculs sont réalisés sur un spectre de 58 fréquences afin d'obtenir le spectre en tiers d'octave entre 50 Hz et 2500 Hz, sur un domaine bidimensionnel de 1000 m selon la direction horizontale (x) et de 400 m selon la direction verticale (z).

On suppose que la source est ponctuelle, omni-directionnelle, et située à une hauteur de 80 m. Pour profiter de la large validité angulaire de la méthode Split-Step Padé (2,2), les conditions initiales sont obtenues par une méthode de rétro-propagation à partir de la solution analytique pour une source ponctuelle à une distance de 80 m de la source, comme le propose Dragna [7]. L'impédance du sol est calculée avec le modèle de Miki pour une résistivité effective de 200 kN.s/m^4, typique d'un sol herbeux. Une couche absorbante est située en haut du domaine afin de représenter des conditions de champ libre. Le pas de discrétisation est choisi inférieur à $\lambda/10$ selon z, et inférieur à λ selon x. Afin de prendre en compte les effets de réfraction dus aux gradients verticaux de température et de vent, on considère une célérité du son effective dans les calculs [10] :

$$c_{eff}(z) = c(z) + U(z)\cos\theta = \sqrt{\gamma r T(z)} + U(z)\cos\theta, \quad (1)$$

avec $U(z)$ et $T(z)$ les profils verticaux de vent et de température.

Le niveau de pression au récepteur (x_R, z_R) à la fréquence f est obtenu à partir du niveau de puissance par [10] :

$$L_p(f) = L_W(f) - 10\log_{10}(4\pi R_1^2) + \Delta L - \alpha(f)R_1, \quad (2)$$

avec $R_1 = \sqrt{x_R^2 + (z_R - z_S)^2}$ la distance entre la source et le récepteur, $\alpha(f)$ le coefficient d'absorption de l'air en dB/m, et ΔL le niveau de pression par rapport au champ libre calculé par le modèle d'équation parabolique.

3 Effets météorologiques sur le bruit rayonné par l'éolienne

3.1 Sélection et analyse des données météorologiques mesurées au SIRTA

Le SIRTA (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique) est un observatoire atmosphérique situé sur le plateau de Saclay, à 20 km au sud de Paris [8]. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé les données d'un lidar Doppler pour obtenir la vitesse du vent entre 40 m et 200 m d'altitude, d'un radiomètre micro-onde pour la température jusqu'à 2 km d'alitude, et d'une station météo pour la température à 2 m, la vitesse du vent à 10 m et l'humidité relative à 2 m. De plus, un anémomètre sonique à 10 m du sol nous permet d'estimer la vitesse de friction u^*, l'échelle de température T^*, et la longueur de Monin-Obukhov L^* qui détermine la stabilité de l'atmosphère. En suivant la classification de Barthlott *et al.* [9] on a les stratifications atmosphériques suivantes :

- $|L^*| \geq 1000$ m : atmosphères neutres (N) ;
- $-1000\,m < L^* \leq -200$ m : atmosphères instables (I) ;
- $-200\,m < L^* < 0$ m : atmosphères très instables (TI) ;
- $0 \leq L^* < 200$ m : atmosphères très stables (TS) ;
- $200\,m \leq L^* < 1000$ m : atmosphères stables (S).

Nous nous focalisons dans un premier temps sur des périodes où la couverture nuageuse est faible avec un vent de secteur ouest. En effet, avec des directions de vent entre 250° et 320°, Barthlott *et al.* [9] ont montré que l'on peut considérer le terrain plat et homogène, avec une longueur de rugosité z_0 d'environ 10 cm. Cela permet d'utiliser la théorie de la similitude de Monin-Obukhov (MOST) afin d'obtenir les profils verticaux de vent et de température dans la couche de surface de l'atmosphère [10]. Nous avons sélectionné 5 types de stratification atmosphérique entre 13h le 19/10/2011 et 8h30 le 20/10/2011 (voir tableau 2).

Les profils verticaux de vent calculés avec les relations de similitude et mesurés au SIRTA sont comparés sur la figure 2. On observe un bon accord entre prédictions et mesures pour les atmosphères 1, 2 et 4. Par contre, les prédictions sous-estiment fortement les vitesses de vent mesurés par lidar pour les atmosphères 3 et 5. Pour ces deux atmosphères, un profil

Tableau 2 – Conditions atmosphériques (C.A.) mesurées sur le site du SIRTA.

C.A.	Période	U(80m) (m/s)		u^*	T^*	L^*
		lidar	MOST	(m/s)	(K)	m
1 (TI)	13h30	7,2	6,7	0.47	-0.11	-141
2 (I)	14h40	8,2	7,6	0.51	-0.05	-330
3 (TS)	20h00	7,3	4,0	0.06	0.05	5.7
4 (TS)	6h40	6,8	6,5	0.17	0.07	32
5 (TI)	8h10	4,6	3,4	0.25	-0.05	-84

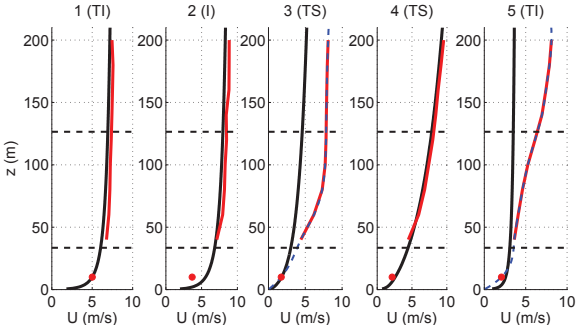

Figure 2 – Profils de vent calculés avec les relations de similitude (noir), mesurés au SIRTA (rouge) et obtenus par interpolation à partir des mesures (bleu) pour les conditions atmosphériques du tableau 2.

expérimental est obtenu par interpolation cubique (spline) à partir des données du lidar et de la mesure à 10 m ; ces profils sont tracés en bleu sur la figure 2.

3.2 Résultats en champ proche

Les résultats du modèle d'Amiet du bruit de bord de fuite calculés à 100 m de l'éolienne sont utilisées pour estimer le spectre de puissance en tiers d'octave pour les 5 conditions atmosphériques. Les spectres pour les atmosphères 1, 3 et 4 sont tracés sur la figure 3, et les niveaux globaux de puissance sont donnés dans le tableau 3. La figure 3(a) illustre la différence entre conditions stables et instables. En effet, la vitesse du vent est très proche pour les profils MOST des atmosphères 1 (6,7 m/s) et 4 (6,5 m/s). Avec les conditions très instables de l'atmosphère 1, le spectre de puissance suit la même tendance que les spectres avec un vent constant, tracés en tirets noirs sur la figure 3(a). Avec les conditions très stables de l'atmosphère 6, par contre, les niveaux de puissance sont plus élevés au-dessus 400 Hz. Cela peut être attribué aux variations du vent entre le haut et le bas du rotor, la vitesse du vent passant de 4,5 m/s à 8 m/s du bas au haut du rotor dans le cas stable, alors qu'elle n'augmente que de 6 à 7 m/s dans le cas instable.

La figure 3(b) illustre le fort écart, de l'ordre de 10 dB, qui peut exister entre les spectres de puissance calculés avec le profil de la théorie de la similitude en utilisant les données de l'anémomètre sonique à 10 m, et le profil issu des mesures. Le niveau global de puissance est de 84,1 dB(A) avec le profil théorique, et de 94,7 dB(A) avec le profil mesuré.

Enfin, la directivité horizontale du niveau de pression et de l'amplitude de modulation de l'éolienne à une distance de 100 m est tracée sur la figure 4. L'amplitude de modulation correspond à l'écart en décibels entre le maximum et le minimum du niveau de pression lors d'une rotation de l'éolienne. On observe que le minimum du niveau de pression n'est pas exactement obtenu à $\theta = \pm 90^\circ$, et que ce minimum est inférieur de moins de 10 dB(A) au maximum de pression, ce qui diffère légèrement des résultats théoriques de Lee *et al.* [2] pour une éolienne comparable. On retrouve par contre que l'amplitude de modulation minimale dans les directions $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$, et qu'elle est maximale proche de $\theta = \pm 90^\circ$. Cette modulation d'amplitude est sensiblement plus forte en conditions stables qu'en conditions instables, avec des variations d'amplitude qui peuvent dépasser les 15 dB(A).

3.3 Résultats en champ lointain

On s'intéresse tout d'abord au spectre en tiers d'octave du terme $\Delta L - \alpha(f)R_1$ dans l'équation (2), correspondant aux effets de sol, de réfraction et d'absorption atmosphérique ; la hauteur du récepteur est fixée à 1,5 m dans cette partie. Le terme d'absorption atmosphérique augmente avec la fréquence et varie sensiblement entre les cinq atmosphères en fonction de la température et de l'humidité relative ; $\alpha(f)$ compris entre 15 dB pour l'atmosphère 5 et 20 dB pour l'atmosphère 1 à 2715 Hz, la fréquence maximale considérée dans les calculs. Le spectre en tiers d'octave de $\Delta L - \alpha(f)R_1$ en $x = 500$ m et $x = 1000$ m pour les atmosphères 1 et 4 sont tracées sur la figure 5 pour différentes directions de propagation. À 500 m, on remarque une modification de l'effet de sol en fonction de la direction de propagation θ. En effet, comme l'ont montré Prospathopoulos et Voutsinas [11] avec un modèle de tracé de rayons, tant que le récepteur est en dehors de la zone d'ombre acoustique il n'y a que deux rayons qui contribuent au récepteur, même en conditions favorables, car la source est loin du sol. Ainsi, le principal effet des gradients verticaux de célérité du son est la modification de l'angle d'incidence par rapport à des conditions homogènes, ce qui est visible sur la figure 5(a). À 1 km, par contre, le récepteur est dans la zone d'ombre pour $\theta = 180^\circ$, ce qui se traduit par une forte atténuation aux hautes fréquences. Notons enfin que les spectres pour $\theta = 90^\circ$, où seuls les gradients verticaux de température interviennent dans l'équation (1), est en bon accord avec le résultats en conditions homogènes ($c(z) = c_0$), en raison des faibles gradients thermiques présents dans la journée étudiée ($|dT/dz| < 0.2$ K/m en $z = 80$ m).

La conséquence de ces effets de propagation est visible sur les spectres du niveau de pression en dB(A) de la figure 6 pour les mêmes conditions atmosphériques. Il est intéressant de noter que les fréquences qui dominent le spectre ne sont pas les mêmes selon les directions de propagation. Les niveaux sont importants autour de 400 Hz pour $\theta = 0^\circ$. Dans la direction perpendiculaire au vent ($\theta = 90^\circ$), les fréquences autour de 500 Hz dominent à 500 m, alors que ce sont les fréquences entre 630 Hz et 1 kHz qui dominent à 1000 m. Dans la direction opposée au vent, les fréquences autour de 1 kHz dominent à 500 m, alors que ce sont celles proches de 100 Hz qui dominent à 1000 m.

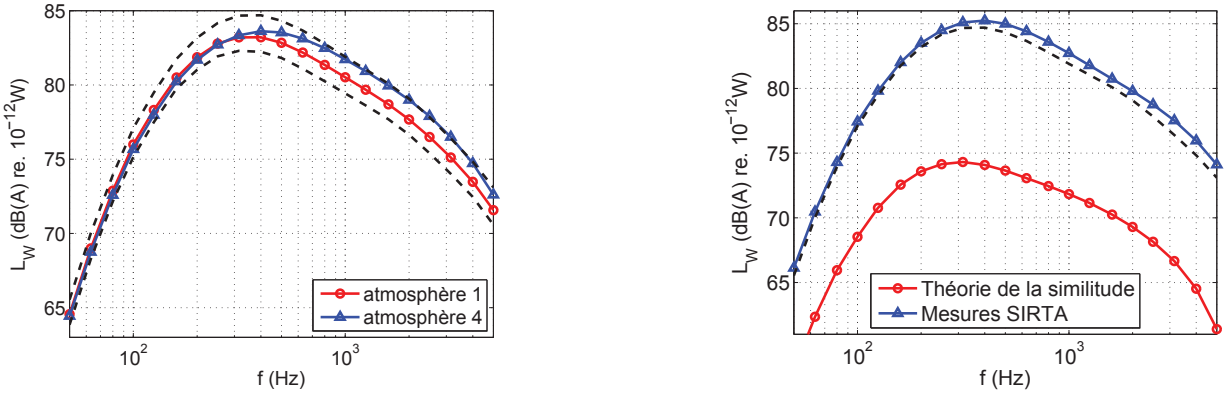

FIGURE 3 – Spectres en tiers d'octave du niveau de puissance calculés pour les atmosphères 1 et 4 avec la théorie de la similitude (gauche), et pour l'atmosphère 3 avec la théorie de la similitude et le profil issu des mesures SIRTA (droite). Les résultats pour un vent constant de (a) 6 m/s et de 7 m/s, et (b) de 7 m/s sont également tracés en tirets.

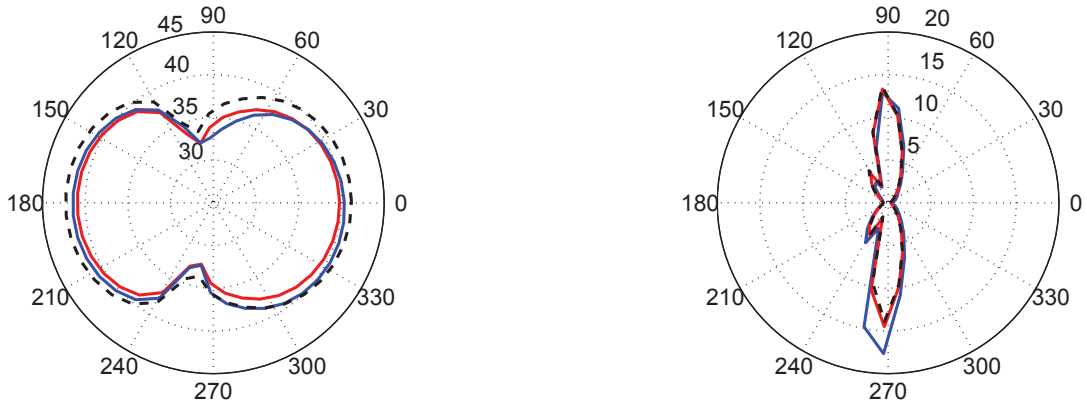

FIGURE 4 – Directivité horizontale à 100 m pour les atmosphères 1 (en rouge) et 4 (en bleu) du niveau de pression en dB(A) (gauche), et de l'amplitude de modulation en dB(A) (droite). Les courbes en tirets noirs correspondent aux résultats pour un vent constant de 7 m/s. Le vent souffle de la gauche vers la droite.

TABLEAU 3 – Niveaux de bruit globaux calculés entre 50 Hz et 2500 Hz à un récepteur à 1 km de l'éolienne et à 1,5 m de hauteur pour différentes conditions atmosphériques.

Conditions atmosphériques		1 (TI) MOST	2 (I) MOST	3 (TS) MOST	3 (TS) Mesuré	4 (TS) MOST	5 (TI) MOST	5 (TI) Mesuré
$\theta = 0^\circ$	L_W (dBA)	92,8	95,4	84,1	94,7	93,3	80,5	87,7
	L_p(x=500 m) (dBA)	26,0	28,6	17,4	28,6	26,9	14,0	21,1
	L_p(x=1000 m) (dBA)	17,3	19,8	9,1	18,6	18,8	5,8	13,2
$\theta = 90^\circ$	L_W (dBA)	86,8	89,4	76,6	87,1	85,6	73,7	78,9
	L_p(x=500 m) (dBA)	20,8	23,4	10,2	20,7	19,5	7,6	12,8
	L_p(x=1000 m) (dBA)	13,3	15,8	2,3	12,7	11,9	0,2	5,3
$\theta = 180^\circ$	L_W (dBA)	93,9	96,5	85,2	95,8	94,4	81,6	88,8
	L_p(x=500 m) (dBA)	30,9	33,9	19,7	30,0	29,5	16,6	24,2
	L_p(x=1000 m) (dBA)	8,6	8,1	7,9	10,9	8,8	5,0	4,2

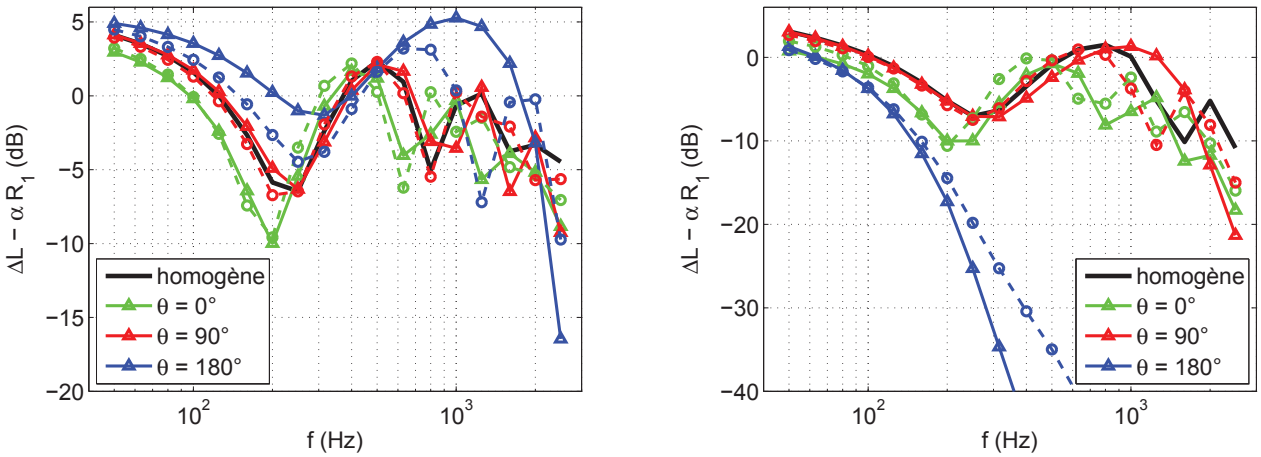

FIGURE 5 – Spectres en tiers d'octave de $\Delta L - \alpha R_1$ pour les atmosphères 1 (triangles) et 4 (cercles) et pour différents angles de propagation θ en $z = 1,5$ m et en (a) $x = 500$ m et (b) $x = 1000$ m.

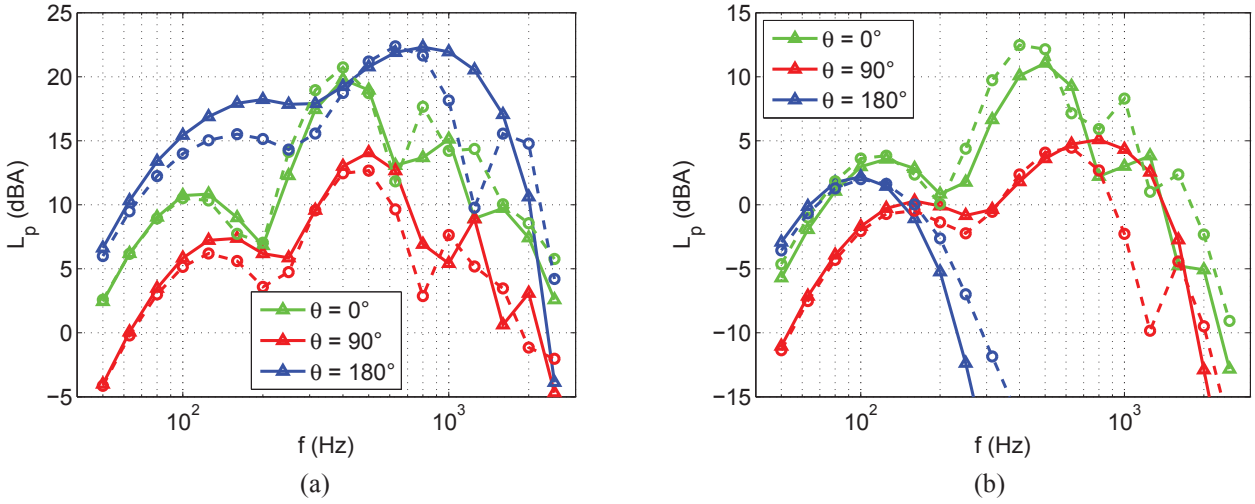

FIGURE 6 – Spectres en tiers d'octave du niveau de pression en dB(A) pour les atmosphères 1 (triangles) et 6 (cercles) et pour différents angles de propagation θ en $z = 1,5$ m et en (a) $x = 500$ m et (b) $x = 1000$ m.

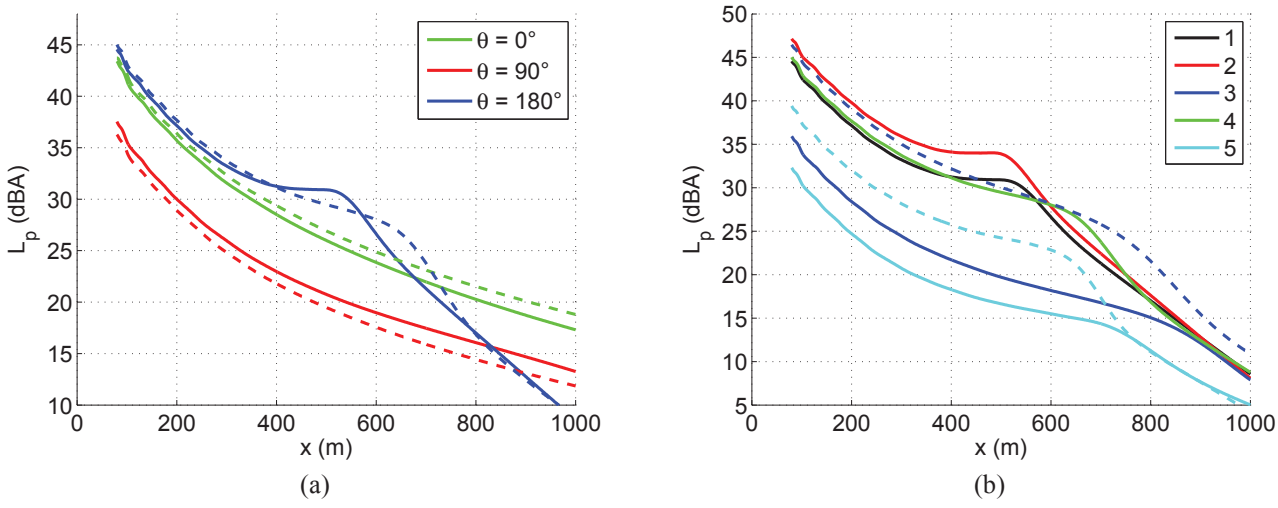

FIGURE 7 – Niveau de pression L_p en dB(A) en fonction de x pour $z = 1,5$ m (a) pour les atmosphères 1 (traits continus) et 6 (tirets) et pour différents angles de propagation θ, et (b) pour $\theta = 180^\circ$ pour toutes les atmosphères (traits continus pour les profils théoriques et tirets pour les profils mesurés).

Les niveaux globaux calculés en $x = 500\,\text{m}$ et $1000\,\text{m}$ sont donnés dans le tableau 3 pour les 5 atmosphères et pour les directions de propagation 0°, 90° et 180°, et sont également tracés en fonction de la distance de propagation x sur la figure 7 dans certaines configurations. Le tableau 3 montre que les niveaux de pression sont plus élevés dans la direction opposée au vent ($\theta = 180°$) en $x = 500\,\text{m}$, et sont plus élevés dans la direction du vent ($\theta = 0°$) en $x = 1000\,\text{m}$. La figure 7(a) montre qu'en effet les niveaux de pression sont supérieurs pour $\theta = 180°$ tant que le récepteur n'est pas dans la zone d'ombre, en raison d'un niveau de puissance légèrement supérieur et de la modification de l'effet de sol discutée précédemment. La figure 7(b) montre que la distance à laquelle débute la zone d'ombre varie fortement en fonction des conditions atmosphériques. La brusque décroissance commence dès 500 m pour les conditions instables des atmosphères 1 et 2, alors qu'elle est plus tardive et moins prononcée avec le profil mesuré de l'atmosphère stable 3.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié l'influence des conditions météorologiques sur le bruit rayonné par une éolienne de 2,3 MW en champ proche et en champ lointain (jusqu'à 1 km). Nous avons tout d'abord montré que les prédictions du bruit de bord de fuite avec la théorie d'Amiet sont en assez bon accord avec les mesures, même si les niveaux sont sous-estimés aux hautes fréquences. Cela confirme que le bruit de bord de fuite est la source dominante d'une éolienne en conditions "normales". Nous avons ensuite sélectionné différentes conditions atmosphériques à l'aide des données mesurées au SIRTA. La comparaison des profils de vent prédits par la théorie de la similitude de Monin-Obukhov, à l'aide des données de l'anémomètre sonique à 10 m, et des profils mesurés par lidar a montré que des différences importantes peuvent exister, même sur terrain plat et homogène. Ces différences peuvent causer des différences importantes dans les prédictions du niveau de bruit, à la fois en champ proche et en champ lointain.

Les résultats en champ proche ont montré la forte dépendance du niveau de puissance rayonnée en fonction de la vitesse du vent en haut du mât, et également du profil de vent sur tout le rotor. À vitesse égale à 80 m, les niveaux de puissance sont plus importantes avec des conditions stables, comme l'illustre la figure 3(a). Les résultats en champ lointain ont quant à eux montré que les effets de propagation dépendent relativement peu de la direction de propagation, sauf lorsque le récepteur est dans la zone d'ombre acoustique. Ainsi, pour des distances de propagation supérieures à 800 m environ, les niveaux globaux les plus forts sont obtenus dans la direction du vent. Une étude plus approfondie devra être menée pour des distances de propagation entre -90° et 90°. En effet les diagrammes de directivité de la figure 4 tendent à montrer que le niveau de pression reste senseiblement les mêmes entre -60° et 60°, avec des amplitudes de modulation qui augmentent lorsque θ se rapproche de 90°.

On peut également noter que les niveaux globaux calculés sont globalement faibles dans cette étude ; ils sont inférieurs à 35 dB(A) au-delà de 500 m. Nous souhaitons étudier par la suite l'influence de conditions atmosphériques plus défavorables (vitesses de vent plus importantes, gradients verticaux de température plus prononcés). Nous souhaitons également prédire la contribution d'autres sources de bruit, comme le bruit d'impact de turbulence qui pourrait être significative aux basses fréquences, ou encore le bruit de décrochage qui est très intense lorsque les conditions atmosphériques et les conditions opérationnelles sont telles que la couche limite le long de la pale décolle.

Remerciements

Les auteurs remercient le SIRTA de leur avoir fourni les données utilisées dans cette étude, et plus spécifiquement Jean-Charles Dupont pour son aide dans la sélection et le traitement des données météorologiques. Benjamin Cotté remercie également Didier Dragna pour les discussions fructueuses sur les simulations de propagation acoustique avec l'équation parabolique.

Références

[1] S. Oerlemans, J. G. Schepers, Prediction of wind turbine noise and validation against experiment, *Int. J. Aeroacoustics* **8**(6), 555-584 (2009).

[2] S. Lee, S. Lee, S. Lee, Numerical modeling of wind turbine aerodynamic noise in the time domain, *J. Acoust. Soc. Am.* **133**(2), EL94-100 (2013).

[3] M. Stigwood, S. Large, D. Stigwood, Audible amplitude modulation, *5th Wind Turbine Noise Conference*, Denver, USA, 28-30 August (2013).

[4] Y. Tian, B. Cotté, A. Chaigne, Wind turbine noise modelling based on Amiet's theory, *5th Wind Turbine Noise Conference*, Denver, USA, 28-30 August (2013).

[5] Y. Rozenberg, G. Robert, S. Moreau, Wall-pressure spectral model including the adverse pressure gradient effects, *AIAA Journal* **50**(10), 2168-2179 (2012).

[6] G. Leloudas, *Optimization of wind turbines with respect to noise*, Master thesis DTU (2006).

[7] D. Dragna, *Modélisation par une approche temporelle de la propagation acoustique en milieu extérieur*, thèse de l'École Centrale de Lyon (2011).

[8] M. Haeffelin *et al.*, SIRTA, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosolresearch, *Annales Geophysicae* **23**, 1-23 (2005).

[9] C. Barthlott, P. Drobinski, C. Fesquet, T. Dubos, C. Pietras, Long-term study of coherent structures in the atmospheric surface layer, *Boundary-Layer Meteorology* **125**, 1-24 (2007).

[10] E. M. Salomons, *Computational atmospheric acoustics*, Kluwer Academics Publishers (2001).

[11] J.M. Prospathopoulos, S.G. Voutsinas, Noise propagation issues in wind energy applications, *J. Solar Energy Eng.* **127**, 234-241 (2005).