

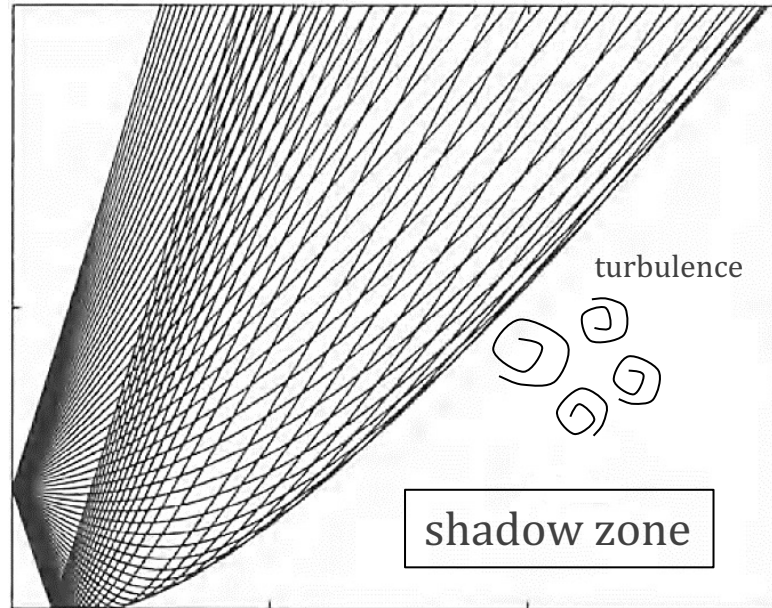
Influence de la turbulence atmosphérique sur la propagation du bruit des éoliennes

Bill Kayser, David Ecotière, Benoit Gauvreau

Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale



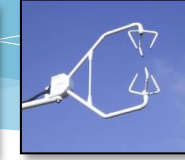
Contexte :



Quel enjeu pour le bruit éolien ?

Objectifs :

- Quantifier l'impact (en dB) de la turbulence atmosphérique sur la propagation du bruit éolien.
- Donner des critères pratiques pour l'acousticien de l'environnement.



Modèle de bruit éolien : Modèle de source (théorie d'Amiet) couplé à un modèle de propagation (WAPE).

Eolienne moderne 'moyenne' : 80 m hub, 45 m de pale, 2.3 MW puissance

Conditions de l'environnement typiques :

- Vitesse de vent 12 m.s^{-1} au niveau du hub.
- Température $T_0 = 10^\circ \text{ C}$.
- Résistivité du sol de 1000 kN.s.m^{-4} (e.g. *terre compactée*).
- Hygrométrie 80%.
- Angle de propagation $\theta \in [0; 180]^\circ$
- Turbulence atmosphérique : perturbation de la partie aléatoire μ de l'indice de réfraction acoustique
$$n = \langle n \rangle + \mu \quad \text{via modes de Fourier aléatoires}^{[1-2]}. \text{ On considère une turbulence forte, } \mu^2 = 10^{-5}$$

[1] Chevret, P., Blanc-Benon, P., and Juvé, D. (1996). A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground. The Journal of the Acoustical Society of America, 100(6):3587–3599.

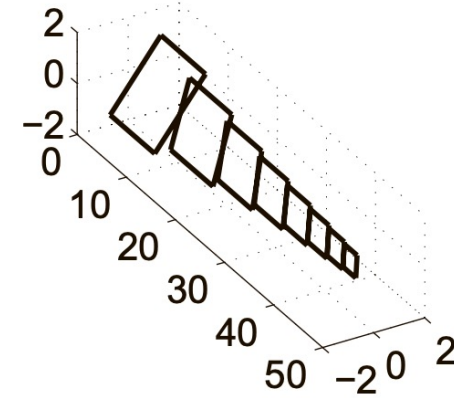
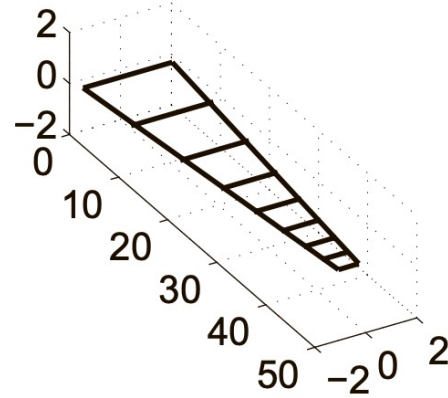
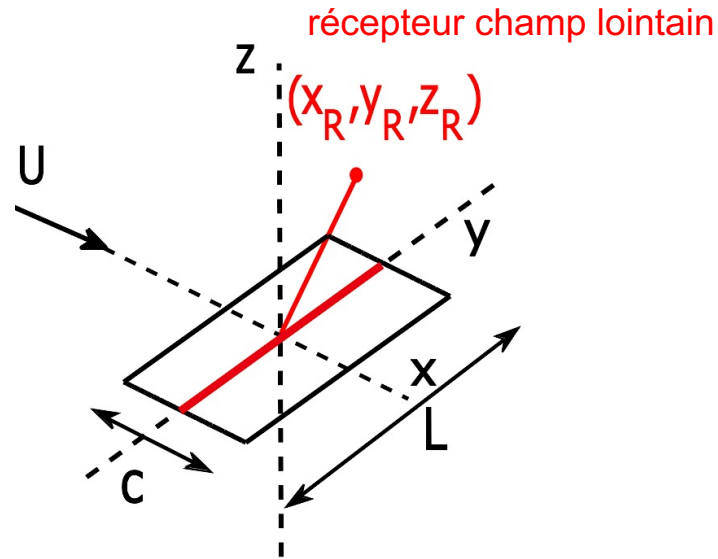
[2] Salomons, E. M. (2001). Computational Atmospheric Acoustics. Kluwer Academic, Netherlands, kluwer academic edition.

Biais : erreur de prédiction si on ne prend pas en compte la turbulence atmosphérique.

Estimation du biais *via* la différence entre les simulations avec turbulence, et sans turbulence.

→ Evaluation de l'incertitude associée.

Modélisation : la source



I. Bruit d'impact de turbulence

II. Bruit de bord de fuite

U : vitesse d'écoulement amont

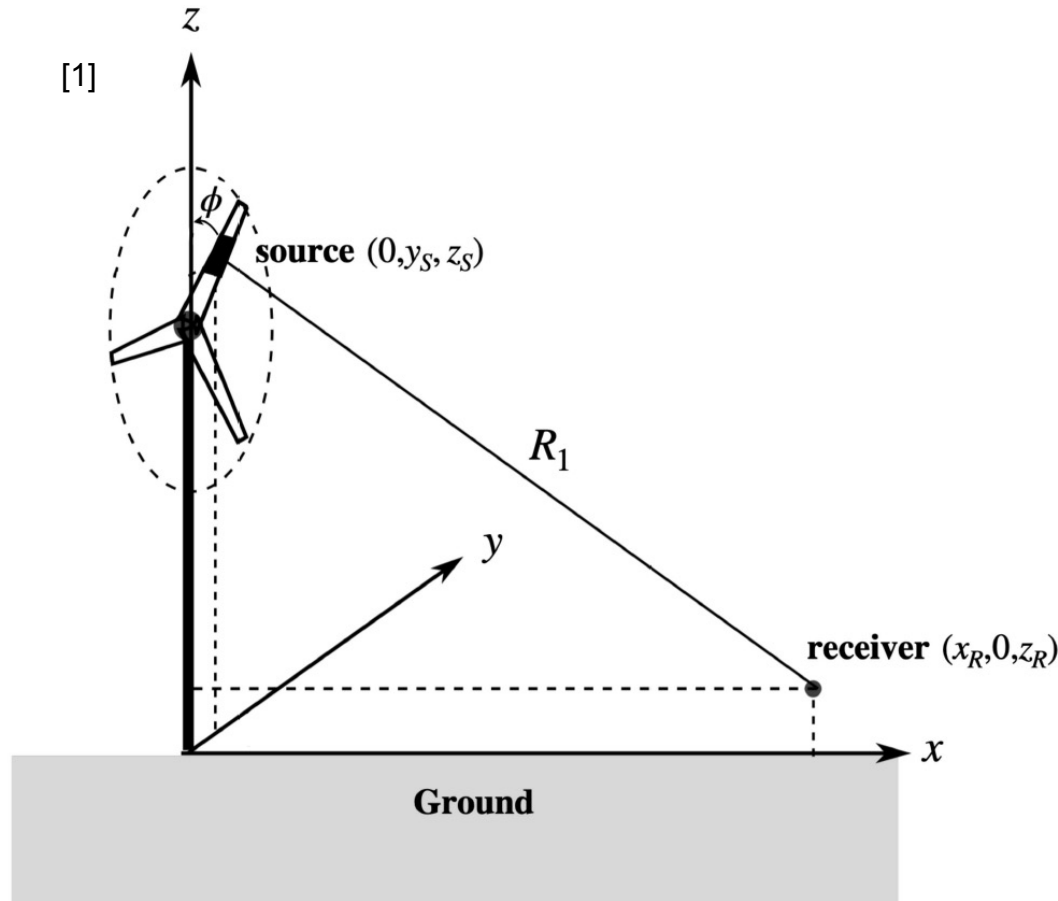
c : corde de la pale

L : envergure de la pale

$L/c > 3$: rapport d'envergure

Strip theory : découpe la pale en $S = 8$ segments

- Tenir compte de la géométrie variable de la pale
- Tenir compte du flux d'air incident non uniforme



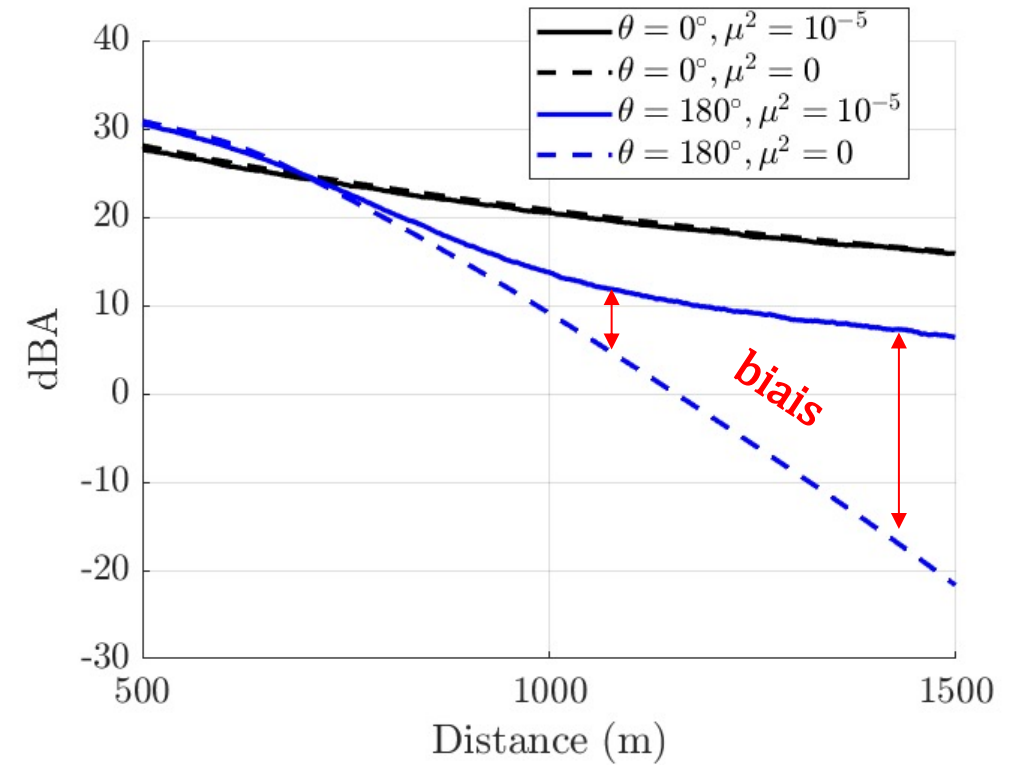
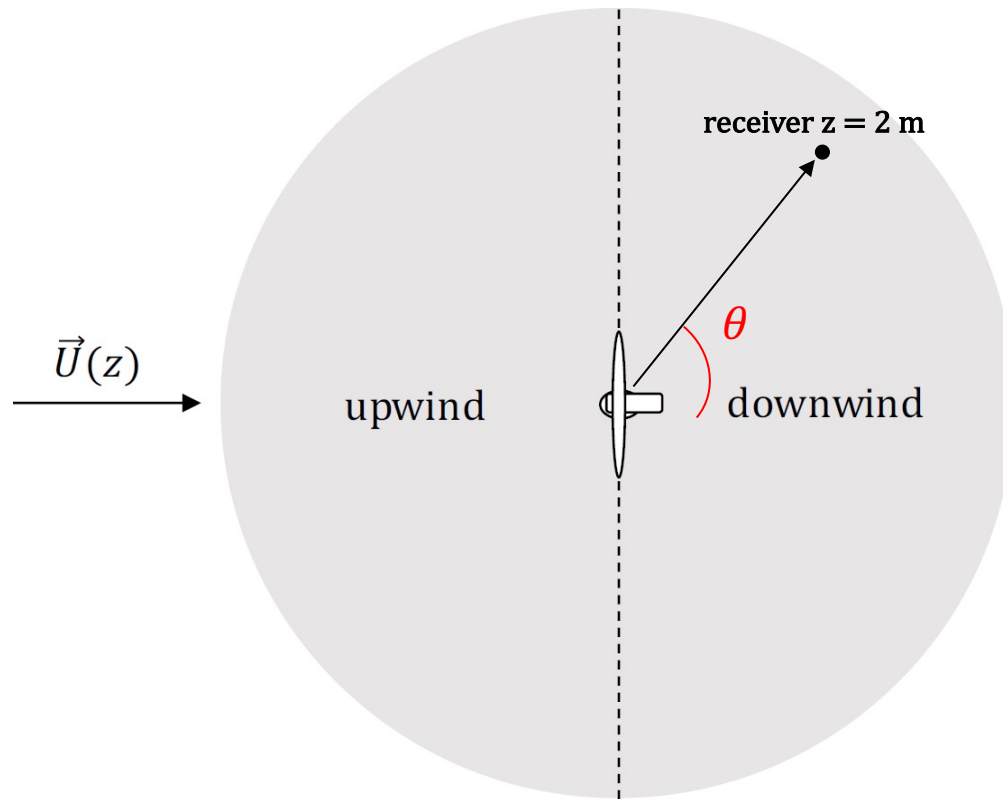
Le SPL_{total} est estimé pour une **rotation** de pale **complète**, en sommant la contribution de **chacun des segments** de pale. Hypothèse de **sources non cohérentes**^[2]

Calcul pour chaque segment :

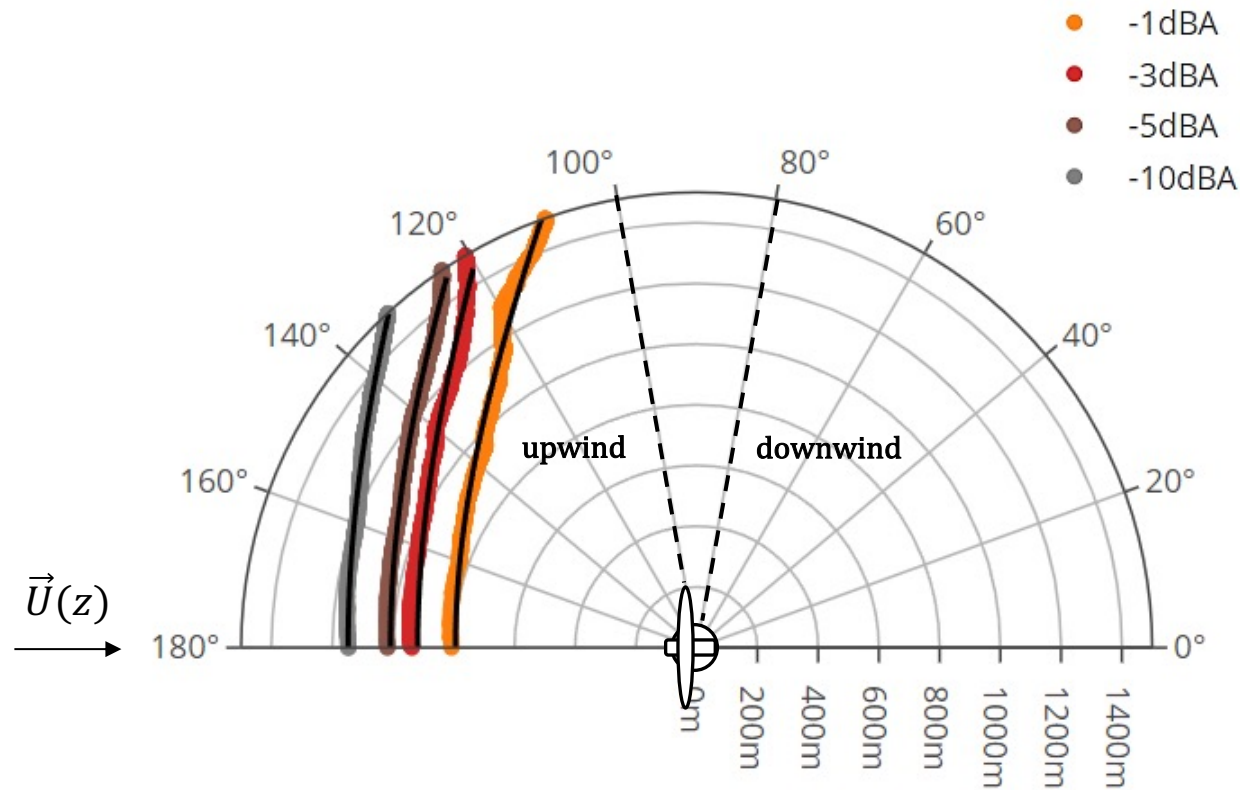
$$SPL_{seg}(\omega, \Phi) = \overbrace{SWL(\omega, \Phi)}^{\text{émission}} - \overbrace{10 \log 4\pi R_1^2}^{\text{div. géométrique}} + \underbrace{\Delta L(\omega, \Phi)}_{\text{effets de l'atmosphère}} - \underbrace{\alpha(\omega) R_1}_{\text{effets de sol}}$$

[1] Cotté, B. (2019). Extended source models for wind turbine noise propagation. The Journal of the Acoustical Society of America, 145(3):1363–1371.

[2] Christophe, J., J. Anthoine et S. Moreau (2009). « Amiet's Theory in Spanwise-Varying Flow Conditions ». In : AIAA Journal 47.3, p. 788-790. issn : 0001-1452. doi : 10.2514/1.37502.



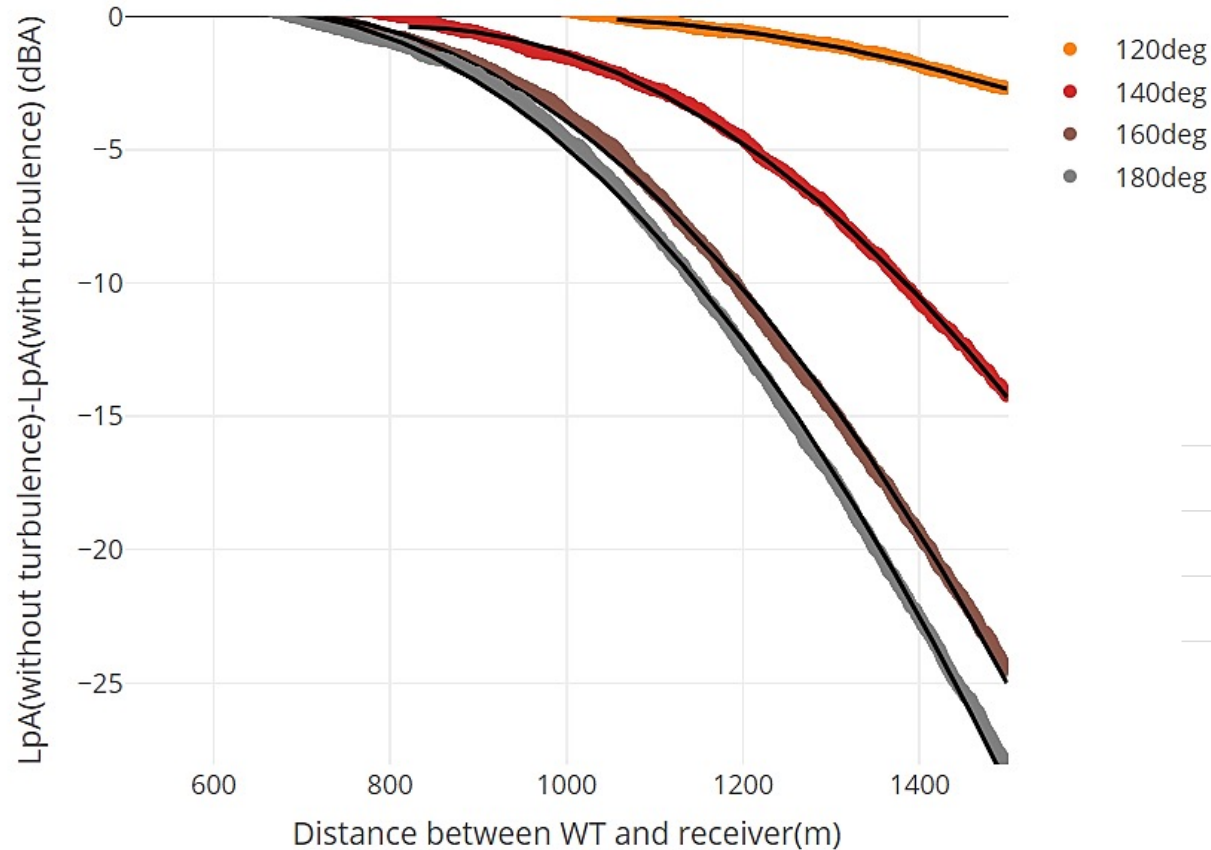
Résultats – début de la zone d'ombre



$$d_{\text{shadowzone}} = \frac{p}{1 - e \cos(\theta \frac{\pi}{180})}$$

biais (dB)	p	e	R ²	pvalue
-1.0	2780	2.50	0.999	0.00
-3.0	3580	2.90	0.999	0.00
-5.0	3530	2.50	0.999	0.00
-10.0	4130	2.60	0.999	0.00

Résultats - effet de la turbulence avec la distance



Biais (dB) : $b(\theta) = b_0(\theta) + b_1(\theta)r + b_2(\theta)r^2$

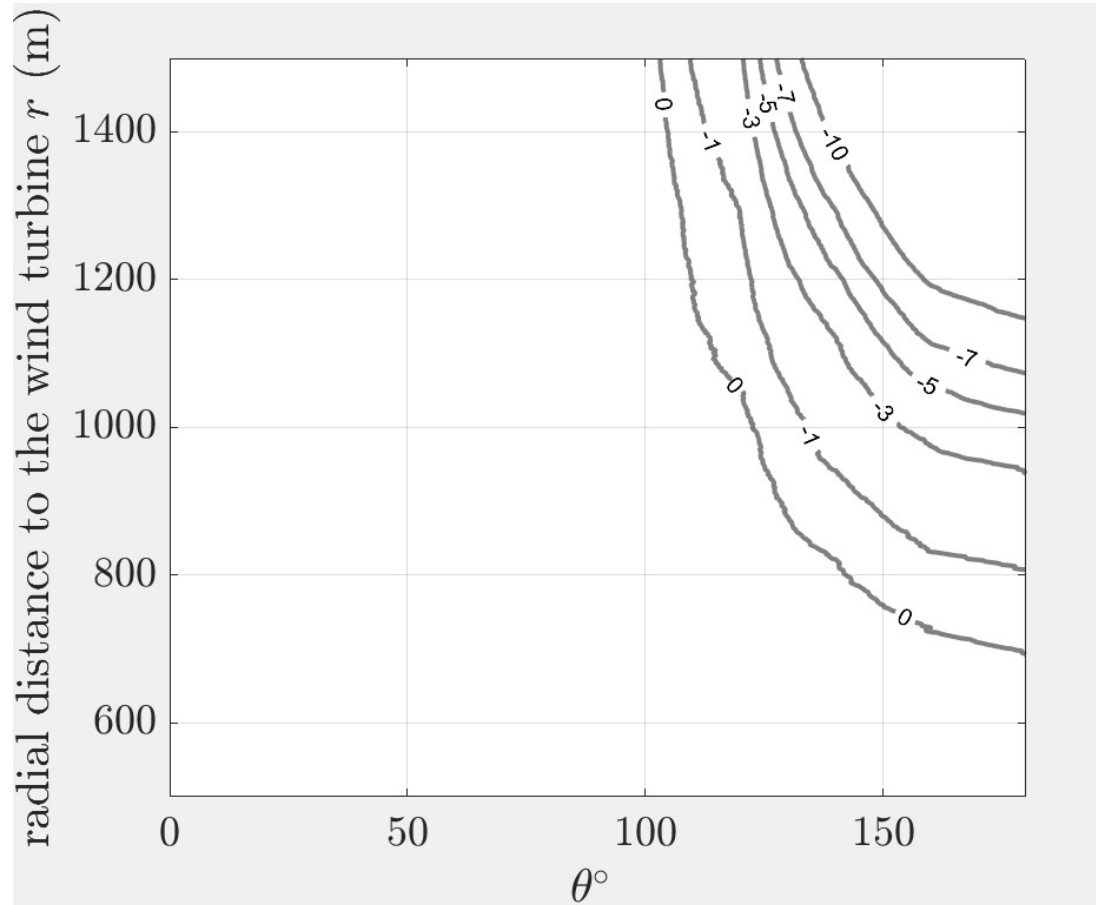
Incertitude type (dB) : u_b

θ	b_0	b_1	b_2	R^2	u_b
120	-8.39	0.0175	-9.16E-06	0.998	0.0377
140	-20.4	0.0490	-2.99E-05	0.999	0.130
160	-15.6	0.0477	-3.60E-05	0.999	0.232
180	-15.8	0.0501	-3.92E-05	0.999	0.276

Intervalle de confiance 95% (dB) :

$$L_{pA} \in [L_{pA,noturb} - b - 2u_b; L_{pA,noturb} - b + 2u_b]$$

Global A



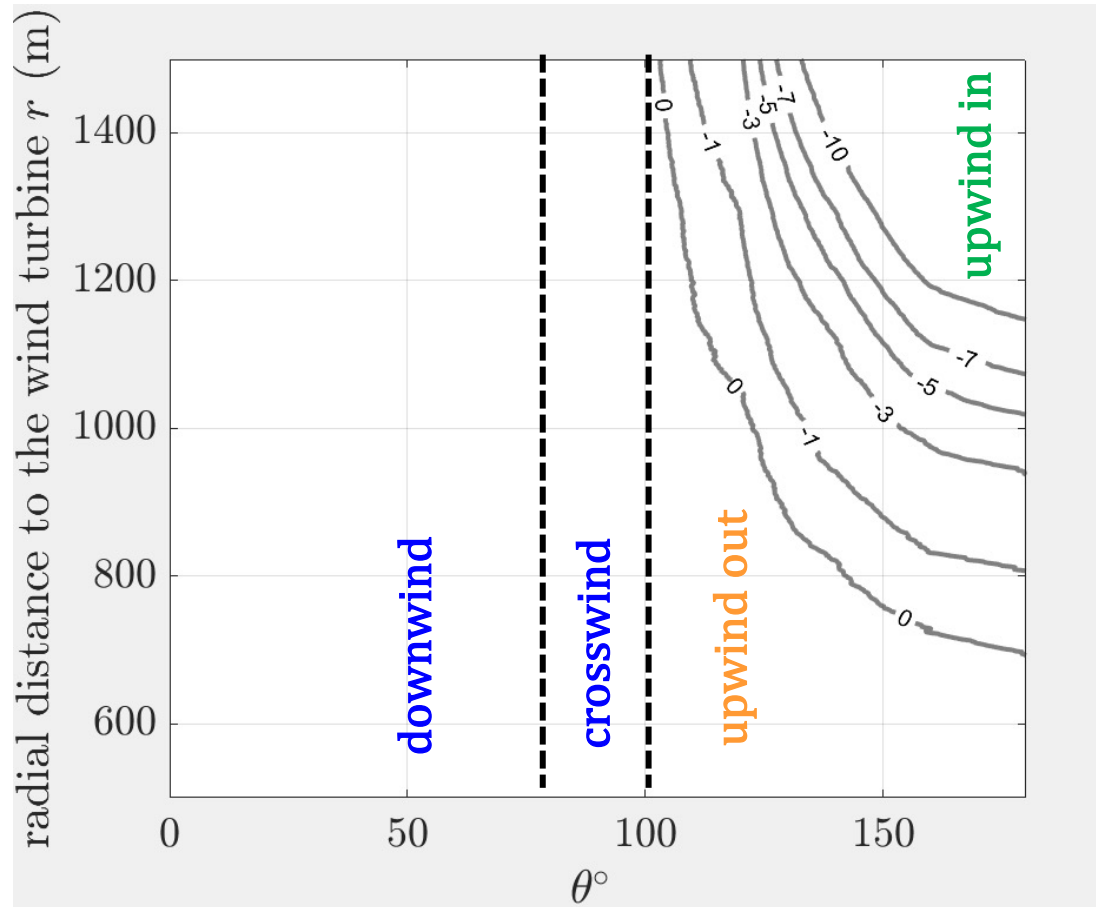
Effet de la turbulence :

- $120^\circ > \theta > 180^\circ$

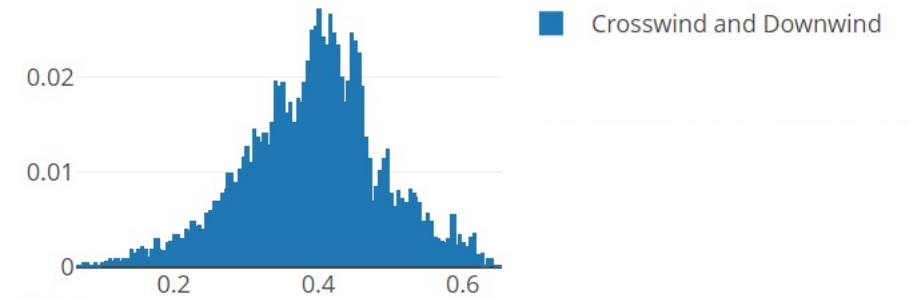
Turbulence négligeable (< 0.1 dBA) :

- Jusqu'à 750 m pour toutes les directions (upwind & downwind)
- Jusqu'à 1000 m pour -120° to 120°
- + Quantification (dB)

Global A

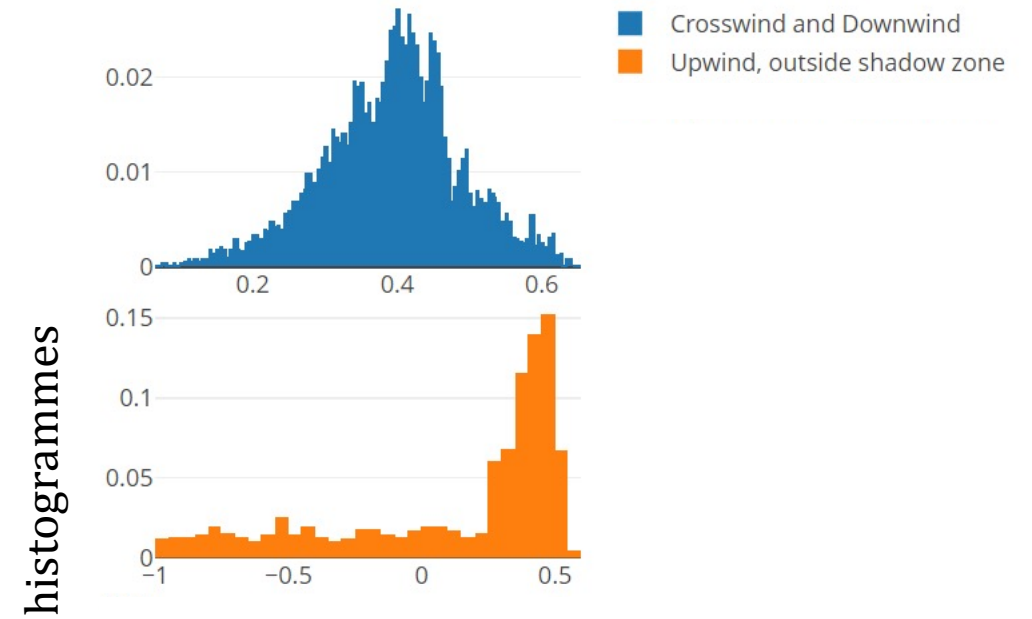
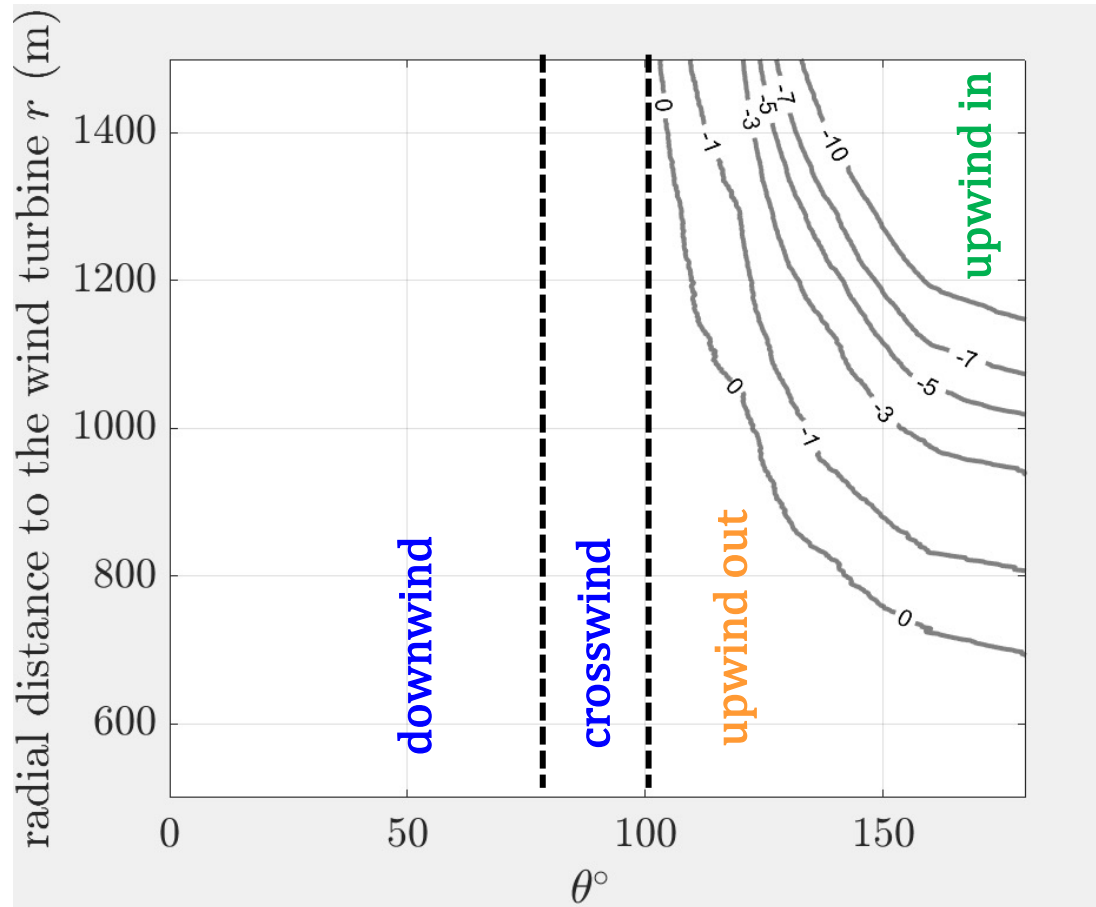


histogrammes



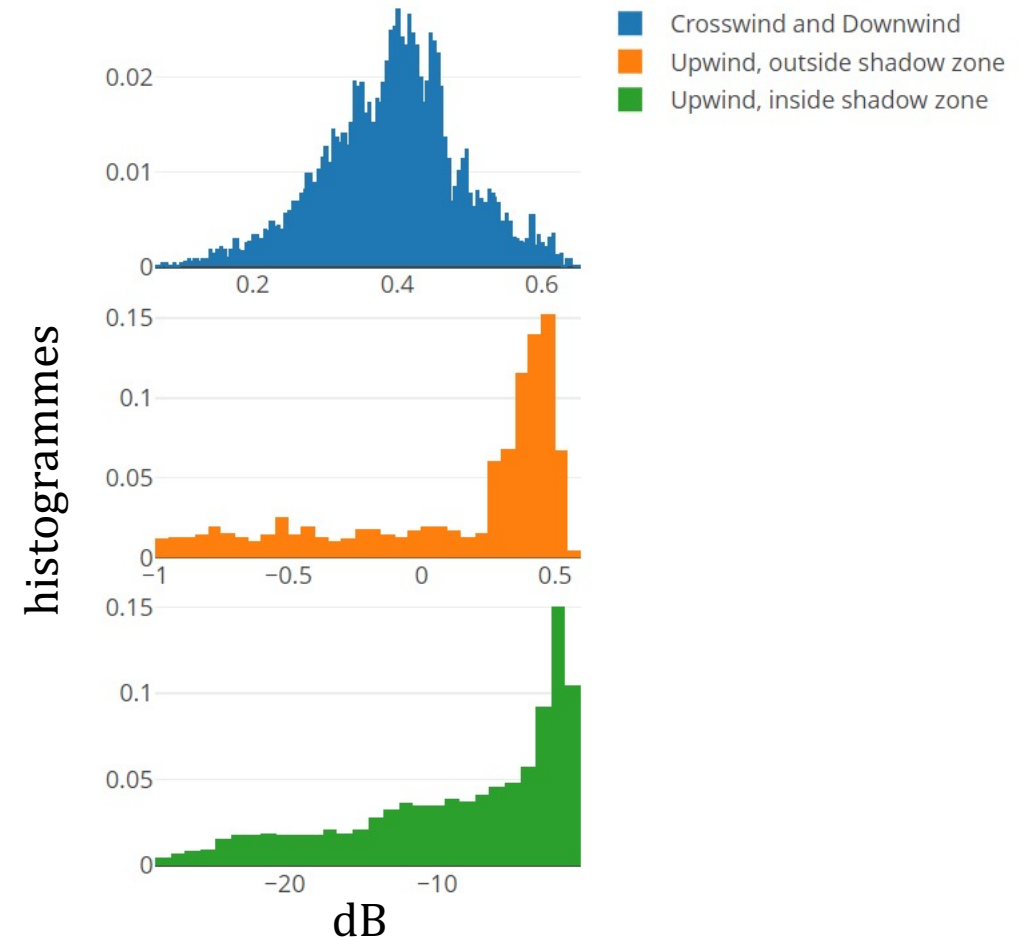
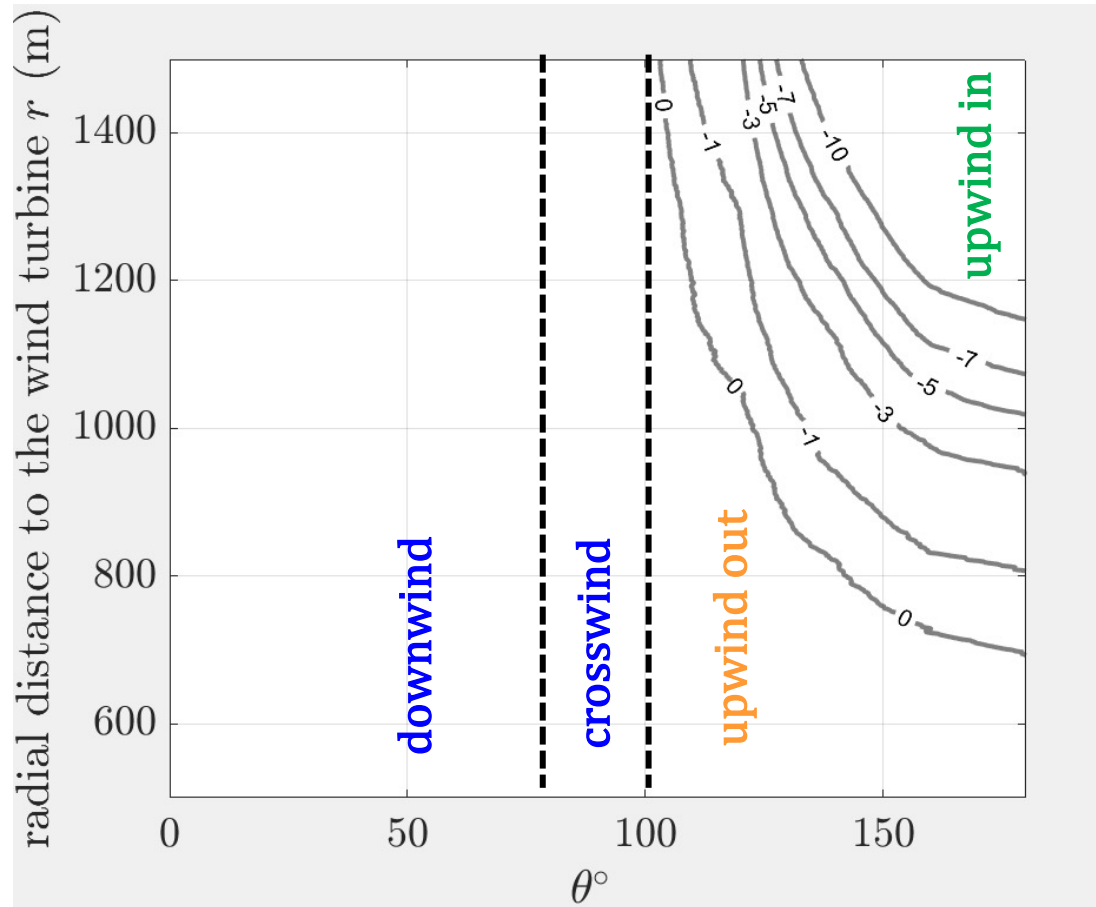
dB

Global A



dB

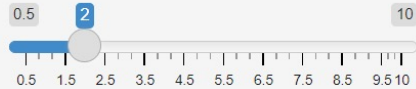
Global A



Influence of turbulence on wind turbine A-weighted SPL prediction

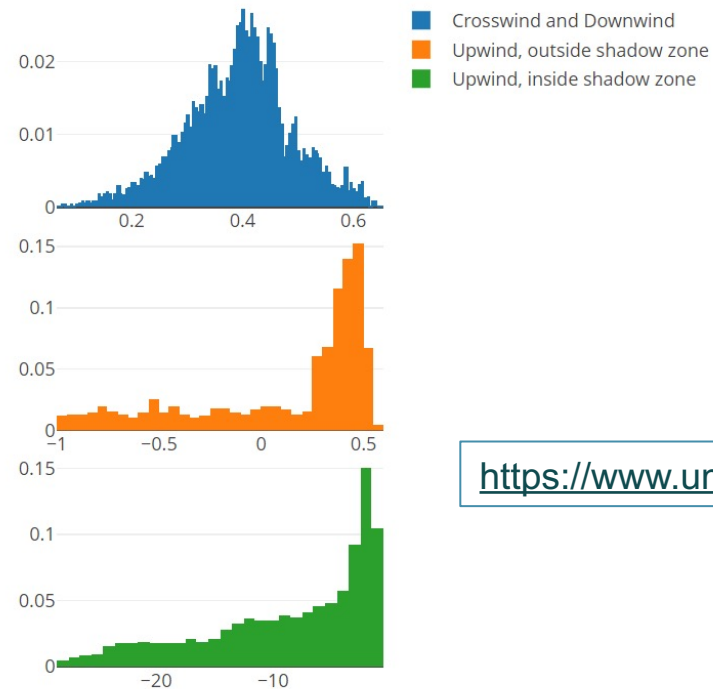
Parameters

Microphone height z (m)



[Read me](#) [Bias](#) [Bias histograms](#) [Shadow Zone boundary](#)

[Bias inside the shadow zone](#)



Méthode de quantification développée

D'autres résultats disponibles (1/3 octaves)

A disposition, notamment des BET :
→ Quantification de l'effet de la turbulence

<https://www.umrae.fr/productions/logiciels-applications-et-methodes-de-calcul/windtn/>

Merci de votre attention

- Contact :
 - bill.kayser@cerema.fr
- Link :
 - UMRAE : <http://www.umrae.fr/>
 - Projet PIBE : <https://www.anr-pibe.com/>



ANR-18-CE04-0011

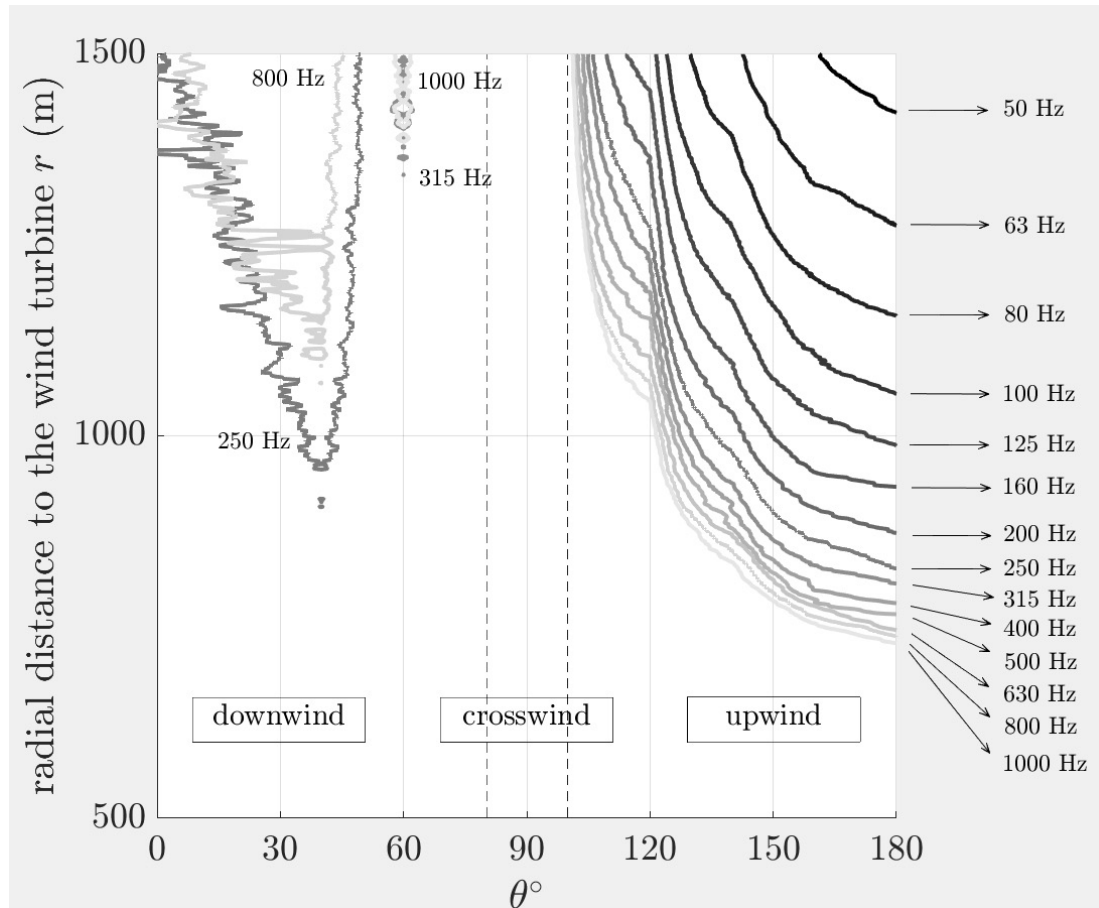


Prévoir l'Impact
du **Bruit des Éoliennes**



L'Unité Mixte de Recherche en
Acoustique
Environnementale (UMRAE)
est un laboratoire de recherche
commun entre l'Université
Gustave Eiffel et le Cerema,

Biais 5dB : Monochromatique



Upwind - Zone d'ombre :

- Dépend de la longueur d'onde acoustique

Downwind :

- Figures interférentielles