



Modélisation et auralisation du bruit éolien

Benjamin Cotté, David Mascarenhas et Olivier Doaré

Institute of Mechanical Sciences and Industrial Applications (IMSIA)
ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris
benjamin.cotte@ensta-paris.fr

Assises nationales de la qualité de l'environnement sonore
27 septembre 2022, Paris

Contexte : auralisation des éoliennes

- Bruit éolien : signature acoustique particulière
- Auralisation : procédé visant à recréer un environnement sonore
 - ▶ permet de réaliser des tests perceptifs
 - ▶ peut être utilisée dans des applications de réalité virtuelle
- Thèse de David Mascarenhas : fait partie du réseau européen VRACE : *Virtual Reality Audio for Cyber Environments*



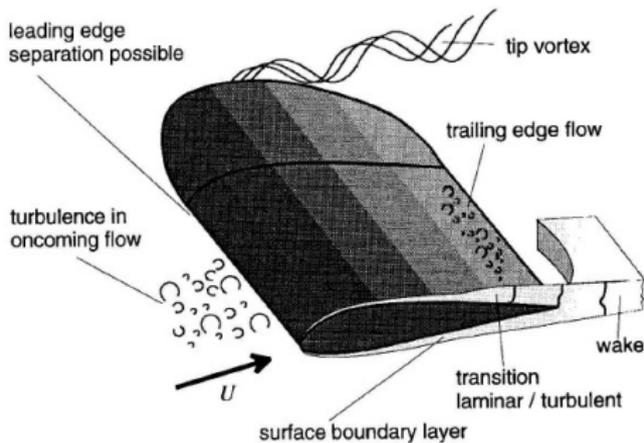
Objectifs

- Développer un outil de synthèse du bruit éolien par modélisation physique
- des sources de bruit d'origine aérodynamique
 - de la propagation du son dans l'atmosphère

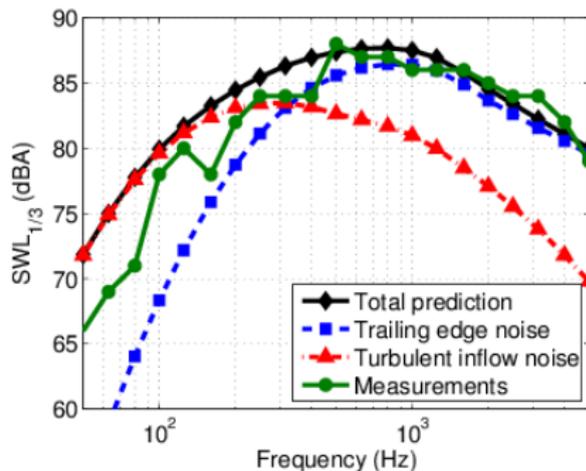
Modélisation des sources aérodynamiques

Sources de bruit d'origine aérodynamique calculées avec la théorie d'Amiet :

- bruit d'impact de turbulence (bruit de bord d'attaque) :
paramètre d'entrée : spectre de turbulence en amont
- bruit de bord de fuite pour une couche limite turbulente
paramètres d'entrée : paramètres de couche limite



Wagner [1996]

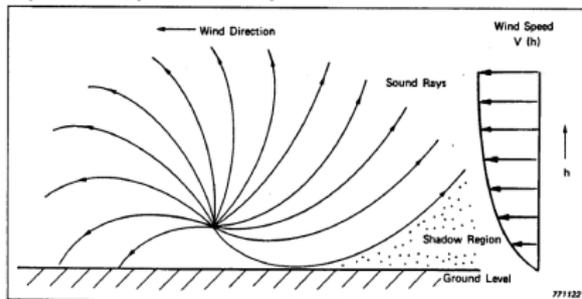


Tian et Cotté [2016]

Modélisation de la propagation dans l'atmosphère

Phénomènes physiques calculés par un code d'équation parabolique :

- réflexion sur un sol absorbant
- réfraction due aux gradients verticaux de température et de vent
- absorption atmosphérique
- diffusion par la turbulence atmosphérique (modèle semi-empirique Harmonoise)

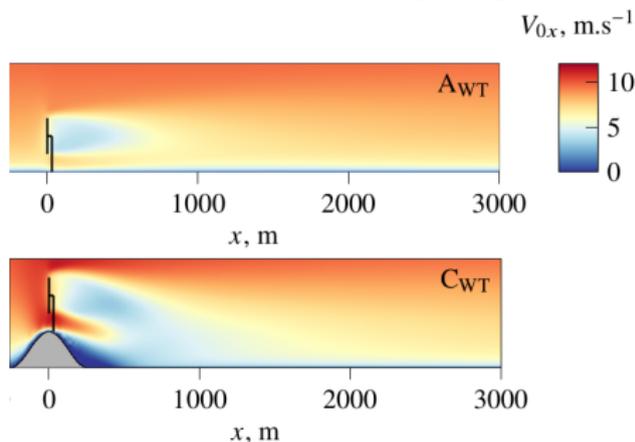


Lamancusa [2009]

Hypothèses :

- Sol plan et homogène
- On néglige l'effet du sillage sur la propagation (sous le vent)

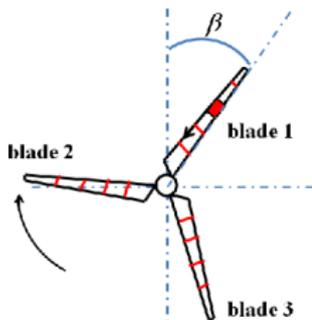
Colas *et coll.* [2022]



Modèle de source étendu (monopôles en rotation)

- Chaque pale est divisée en N_s segments
- Contribution d'un segment à la position angulaire β :

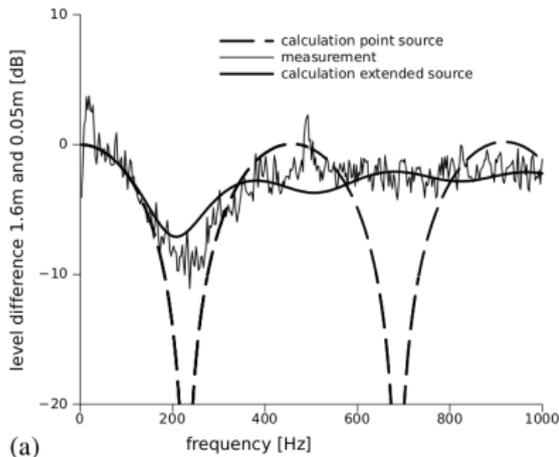
$$L_p(f, \beta) = \underbrace{L_W(f, \beta)}_{\text{source}} - \underbrace{10 \log_{10}(4\pi R(\beta)^2) + \Delta L(f, \beta) - \alpha(f)R(\beta)}_{\text{propagation}}$$



- effet de rotation pris en compte (Doppler et amplification convective)

Modèle de source étendu nécessaire :

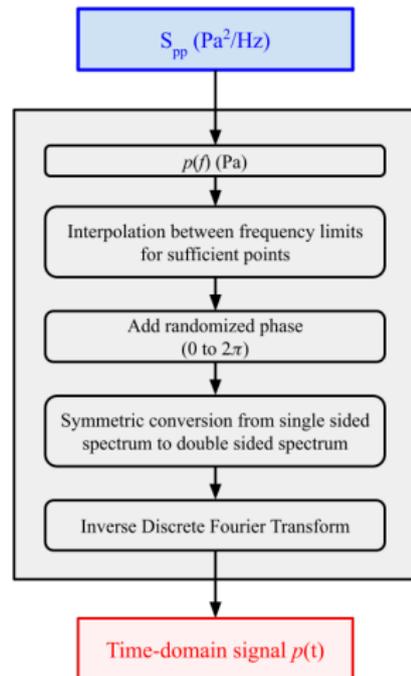
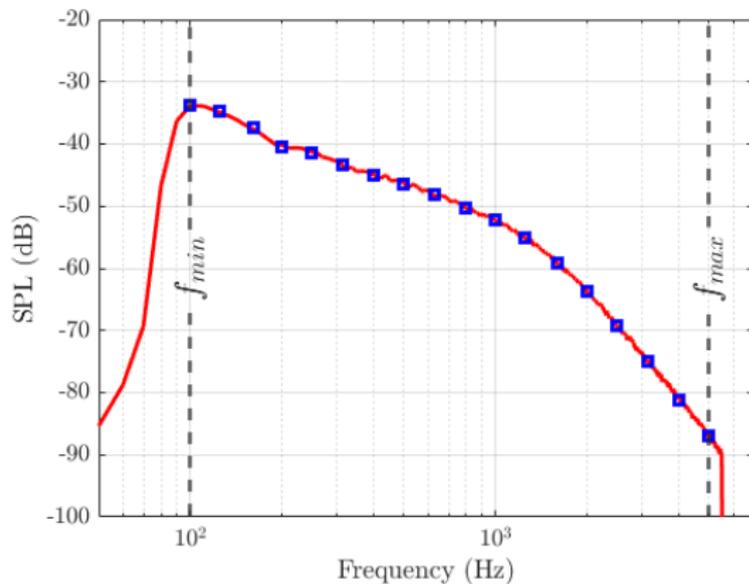
- pour calculer correctement l'effet du sol
- pour obtenir les bonnes distances à la zone d'ombre contre le vent



Heutschi *et coll.* [2014]

Méthode de synthèse sonore

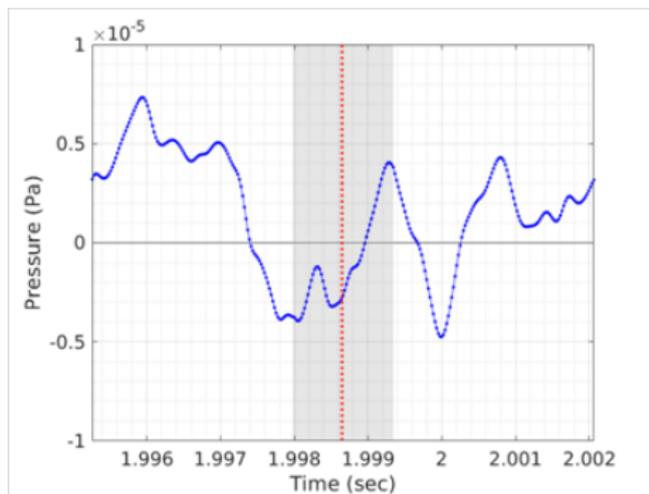
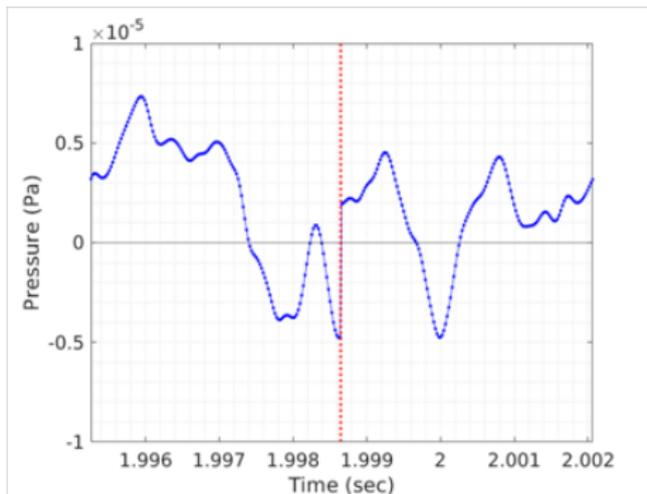
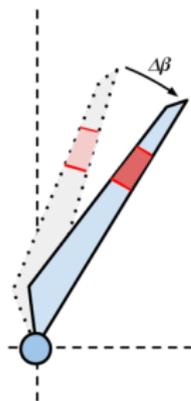
Conversion d'un spectre dans le domaine fréquentiel à un signal temporel



Mascarenhas *et coll.* [JASA-EL 2022]

Méthode de synthèse sonore

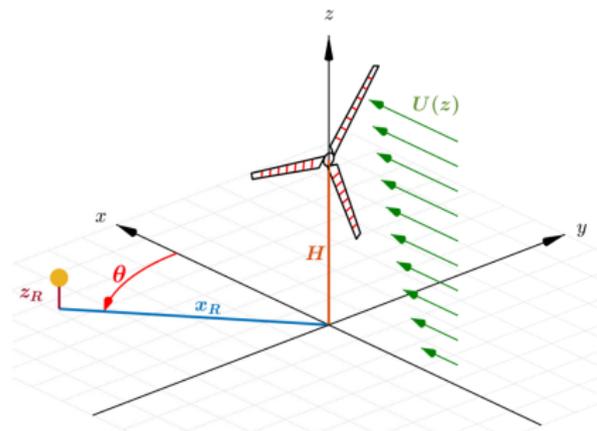
- 1 grain = 1 segment pour un pas angulaire $\Delta\beta$
- Présence de clics entre 2 grains \Rightarrow technique de fondu-enchaîné pour lisser les transitions entre les grains



Cas-tests

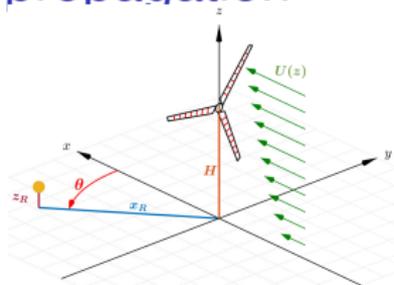
Paramètres de calcul pour les synthèses sonores :

- 1 seule éolienne de 2,3 MW :
 $H = 80$ m et $RD = 93$ m
- spectres calculés entre 50 Hz et 5 kHz
- $x_R \in [500, 1000]$ m et $z_R = 2$ m
- impédance de sol herbeux (Miki)
- profil de vent $U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^m$
avec $U_{ref} = 8$ m/s à $z_{ref} = 80$ m et $m = 0,3$
- 3 niveaux de turbulence



Cas-test A : avec et sans les effets de propagation

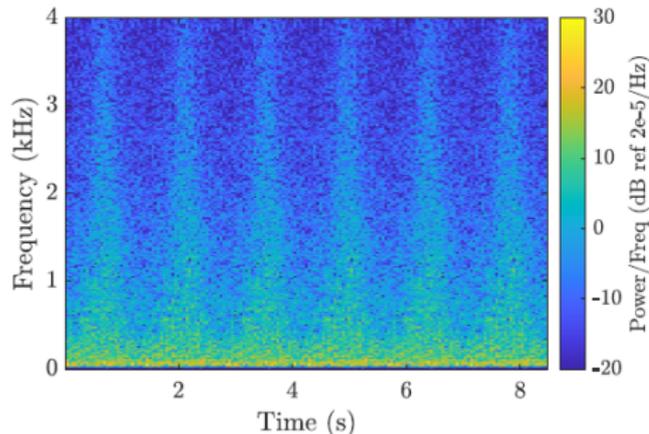
$x_R = 500$ m, turbulence modérée



A1-1 : $\theta = 0^\circ$ en champ libre

A1-2 : $\theta = 80^\circ$ en champ libre

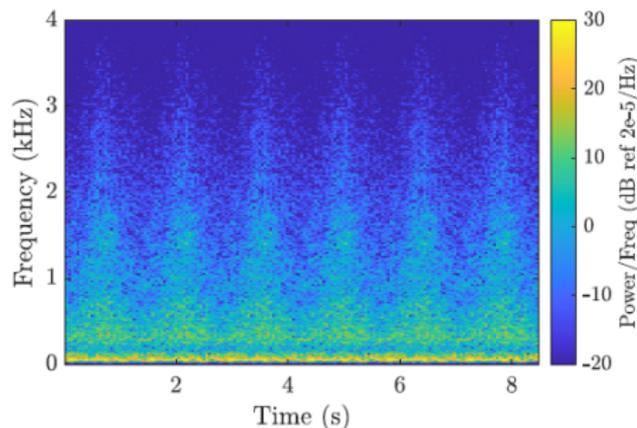
A1-3 : $\theta = 180^\circ$ en champ libre



A2.1 : $\theta = 0^\circ$ avec effets de propagation

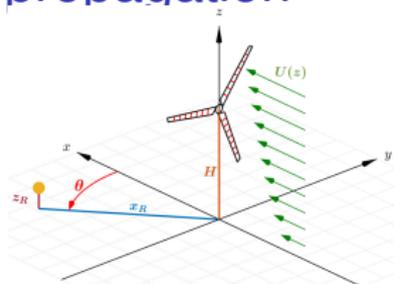
A2-2 : $\theta = 80^\circ$ avec effets de propagation

A2-3 : $\theta = 180^\circ$ avec effets de propagation



Cas-test A : avec et sans les effets de propagation

$x_R = 500$ m, turbulence modérée



A1-1 : $\theta = 0^\circ$ en champ libre

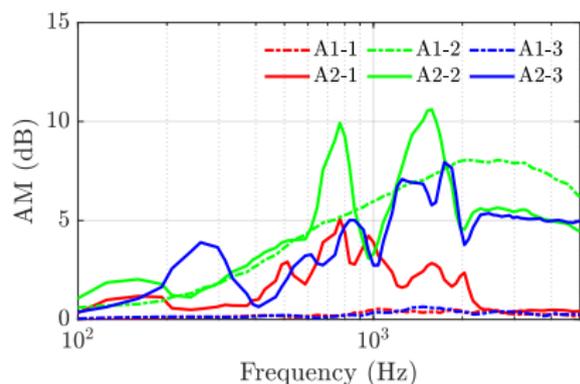
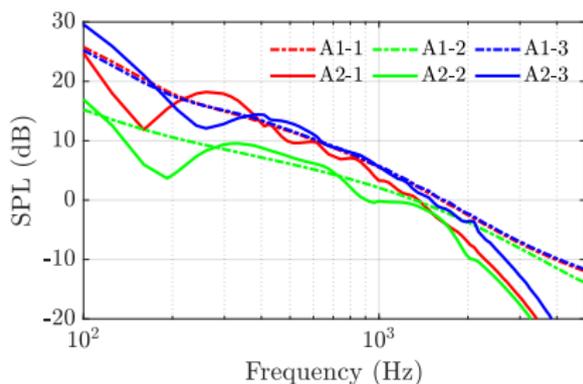
A1-2 : $\theta = 80^\circ$ en champ libre

A1-3 : $\theta = 180^\circ$ en champ libre

A2.1 : $\theta = 0^\circ$ avec effets de propagation

A2-2 : $\theta = 80^\circ$ avec effets de propagation

A2-3 : $\theta = 180^\circ$ avec effets de propagation



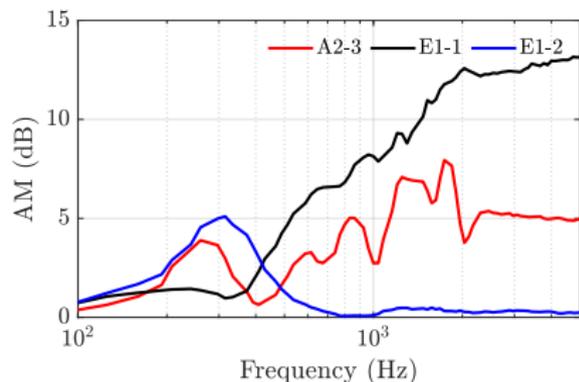
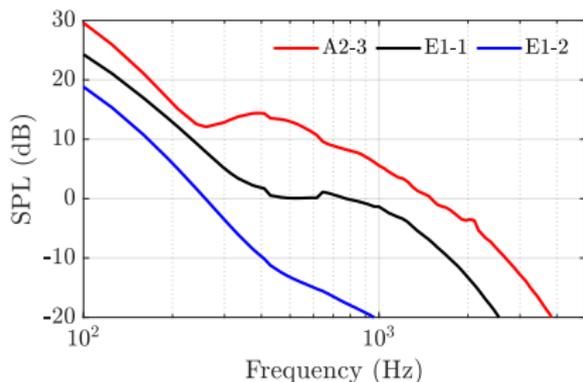
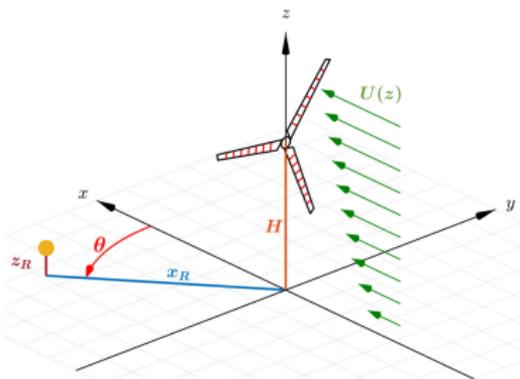
Cas-test E : effet de la zone d'ombre

$\theta = 180^\circ$, turbulence modérée

A2-3 : $x_R = 500$ m avec effets de propagation

E1-1 : $x_R = 800$ m avec effets de propagation

E1-2 : $x_R = 1000$ m avec effets de propagation



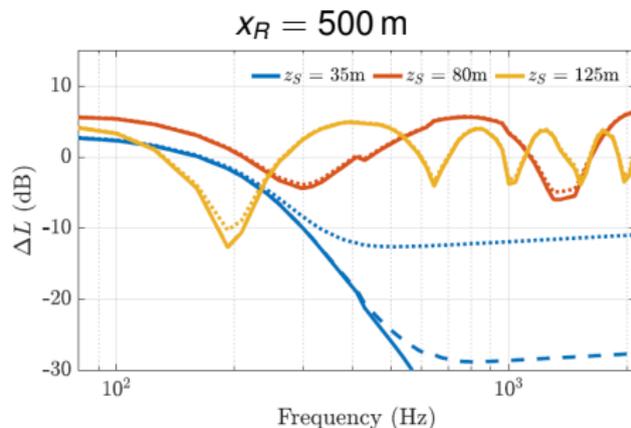
Cas-test E : effet de la zone d'ombre

Niveau de pression relatif au champ libre

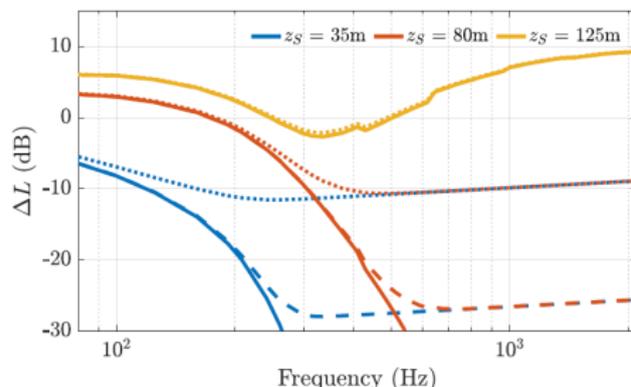
ΔL pour $\theta = 180^\circ$:

- tirets : faible niveau de turbulence
- points : fort niveau de turbulence

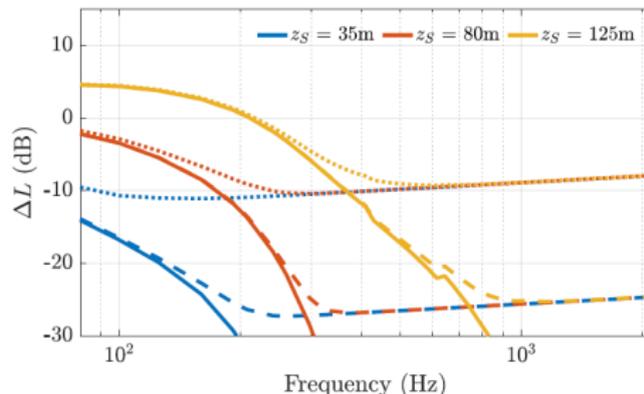
$$L_p(f, \beta) = L_W(f, \beta) - 10 \log_{10}(4\pi R(\beta)^2) + \boxed{\Delta L(f, \beta)} - \alpha(f)R(\beta)$$



$x_R = 800 \text{ m}$



$x_R = 1000 \text{ m}$



Quelques perspectives

- Validation physique du modèle par comparaison aux mesures du projet ANR PIBE
- Validation perceptive du modèle dans la cabine basse fréquence du LMA à Marseille dans le cadre du projet ANR RIBEOIH



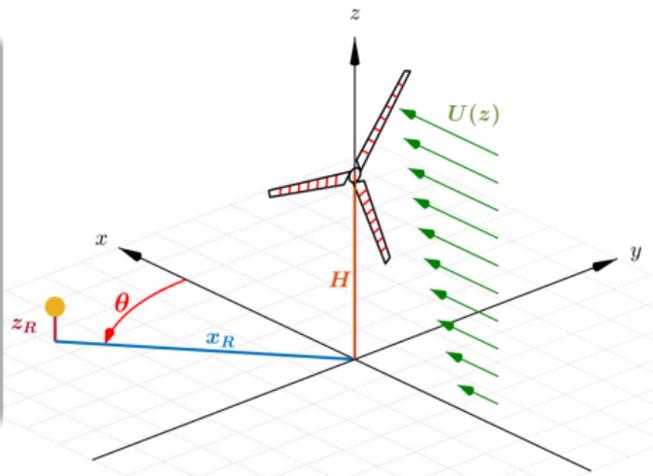
Vue du site éolien de la campagne du projet ANR PIBE
(Mascarenhas *et al.* [Internoise 2022])

Sound synthesis method

Grain duration $T_{\Delta\beta}$

$$T_{\Delta\beta} = \frac{\Delta\beta}{\Omega} + \frac{\Delta R}{c_0} = \frac{\Delta\beta}{\Omega} + \frac{R(\beta_n) - R(\beta_{n-1})}{c_0}$$

- $R(\beta_n)$: distance source-receiver at angular position β_n
- number of samples $N_{\Delta\beta}$ varies between grains



Overlap amount Ψ

$$\Psi = \frac{w_l}{\min(N_{\Delta\beta})} \quad \text{with} \quad 0 \leq w_l \leq \min(N_{\Delta\beta})$$

w_l : overlap length

Optimal values :

$$\Psi = 100\% \quad \text{and} \quad N_{\beta} = 36$$

(Mascarenhas *et al.* [JASA-EL 2022])

