



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



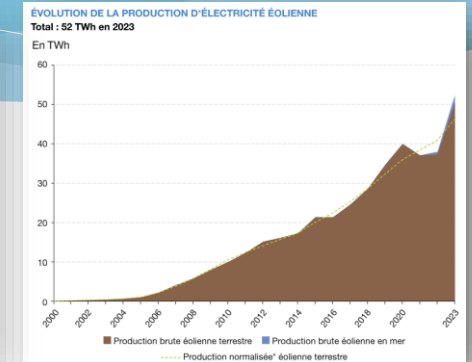
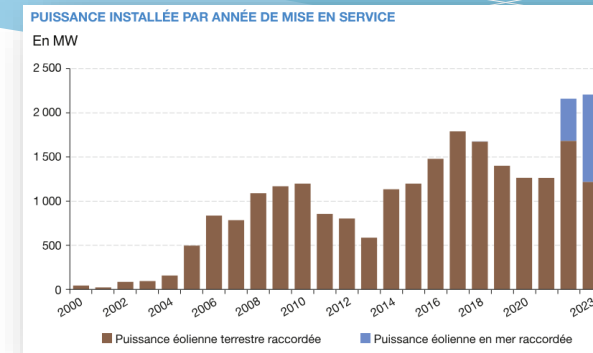
Présentation du projet PIBE

D. Ecotière (UMRAE/Cerema), B. Gauvreau (UMRAE/UGE), B. Cotté (ENSTA), M. Roger (ECL),
I. Schmich Yamane (EDF DTG), F. Junker (EDF Ren.)

ANR-18-CE04-0011



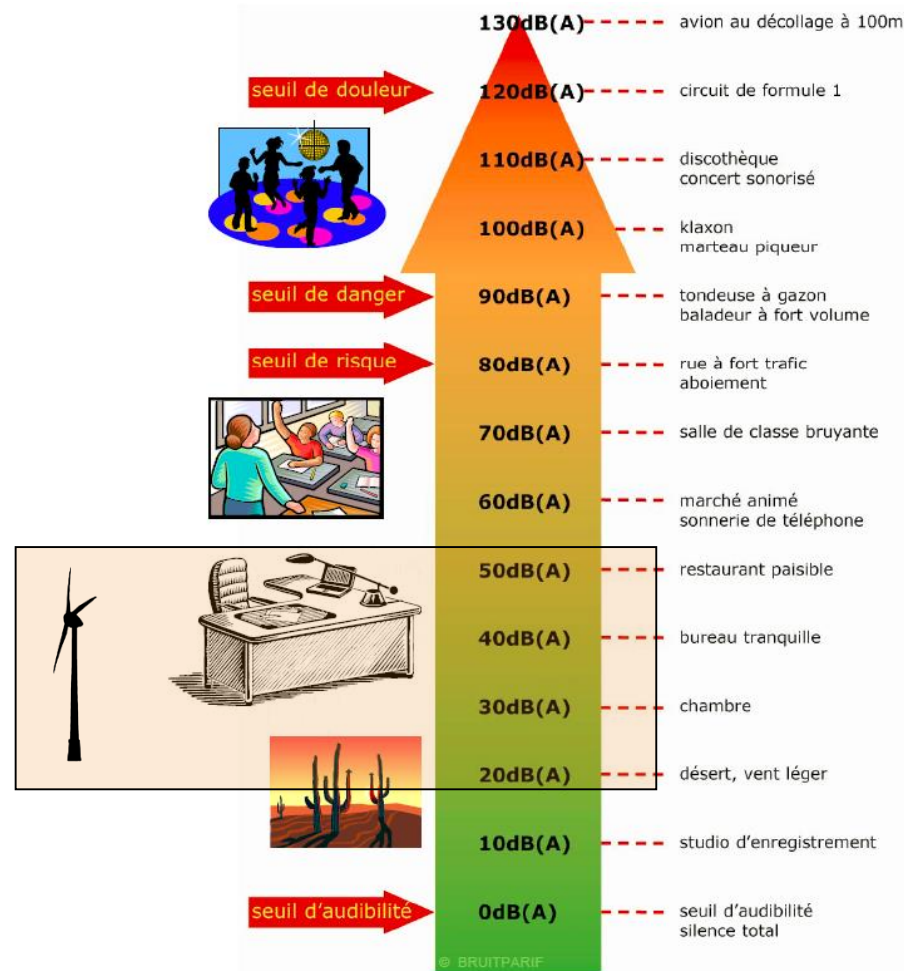
- **Transition énergétique**
 - Essor des énergies renouvelables
 - Fort développement de la filière éolienne
- **Un contexte sociétal complexe**
 - Le bruit mis en avant comme un frein au développement
 - Des informations disparates et controversées
- **Peu de recherche française sur le sujet (en 2019)**
- **Nombreux verrous scientifiques**
 - Source de bruit complexe
 - Propagation à grande distance
 - Gêne spécifique (BF, AM, ...)



Source : MTECT



○ Quelques caractéristiques du bruit éolien



○ Quelques caractéristiques du bruit éolien

- Bruit large bande (origine aérodynamique) 
- Bruit majoritairement basses fréquences + infrasons
- Tonalités marquées (origine mécanique ou non)
- Modulation d'amplitude 
- Bruit parfois impulsif (interaction avec le mat)
- Variabilité temporelle du bruit 
- Directivité spécifique
- Source étendue et en hauteur 
- Propagation longue distance
- Caractérisation expérimentale complexe
- Méthodes de prévision du bruit non harmonisées
- Effets sanitaires en questionnement (mais non démontrés)



PIBE = 1er projet français de recherche collaborative sur le bruit des éoliennes

- **Titre** : Prévoir l'Impact du Bruit des Eoliennes
- **Partenaires** : UMRAE (Cerema-UGE), IMSIA (ENSTA-ParisTech), LMFA (ECL), EDF Renouvelables, EDF DTG (+ Cerema CE, Cerema NC)
- **Durée** : 2019-2024 (4+1 ans)
- **Budget** : 1 360 k€ dont 702 k€ aide ANR + 50 k€ Carnot Climadapt
- **Instrument ANR** : PRCE - Défi 1 : Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique / Axe 2 : Innovations scientifiques et technologiques pour accompagner la transition écologique
- **Pôle de compétitivité** : Pôle Mer Bretagne Atlantique



Vidéo : <https://www.anr-pibe.com/presentations-videos>

○ Objectifs : Développer des outils de prévision et des solutions de réduction du bruit des éoliennes

■ Axe 1 : Modélisation des sources de bruit

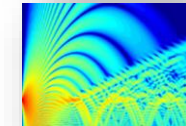
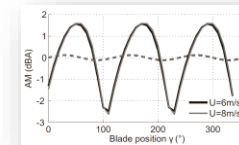
- Modulations d'amplitude : décrochage dynamique
- Expérimentations en soufflerie anéchoïque

■ Axe 2 : Incertitudes des modèles de prévision du bruit

- Propagation d'incertitudes (émission + propagation)
- Campagne expérimentale in situ 1 an

■ Axe 3 : Solutions de réduction du bruit à la source

- Définition de nouveaux dispositifs
- Expérimentations en soufflerie anéchoïque

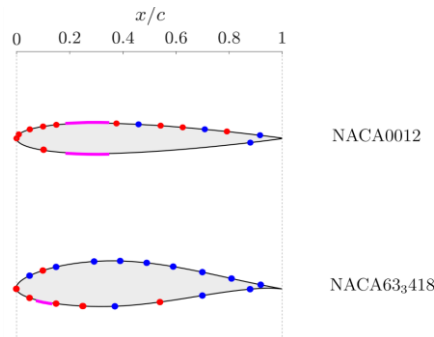
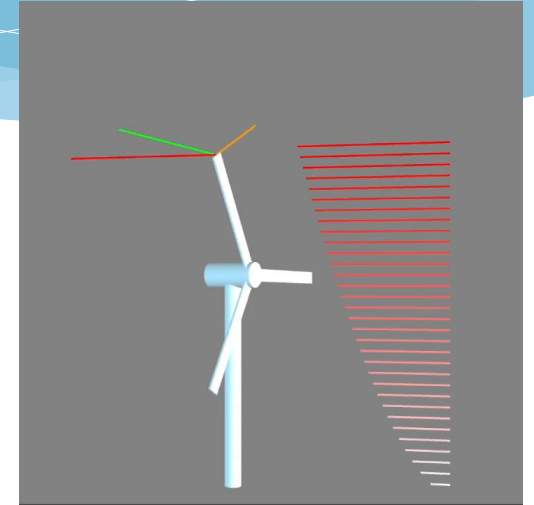


Axe 1

Caractériser les modulations d'amplitudes du bruit éolien

Axe 1 : modulations d'amplitude

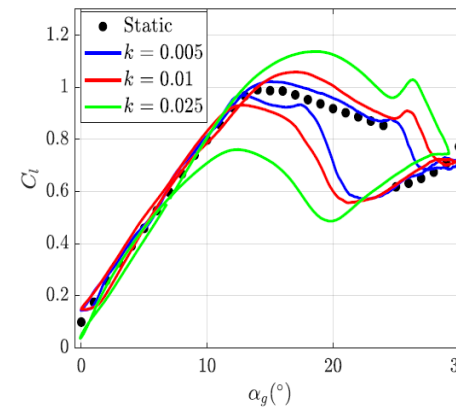
- Bruit de décrochage dynamique (ENSTA, ECL)
 - Variations cycliques de l'angle d'attaque des pales
 - Tests en soufflerie anéchoïque



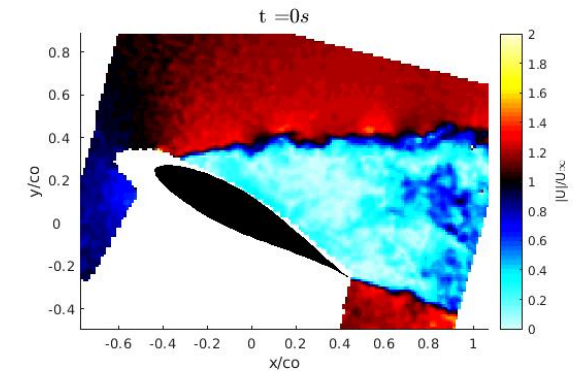
Axe 1 : modulations d'amplitude

○ Bruit de décrochage dynamique

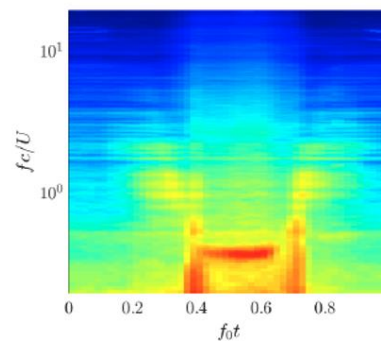
- Analyses aérodynamiques
 - Coefficient de portance
 - Imagerie PIV



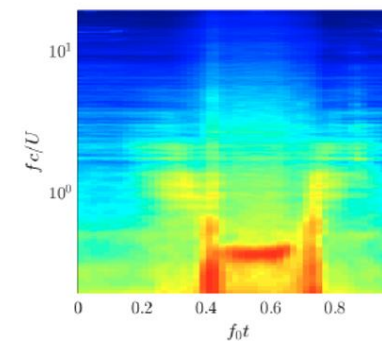
(b) $U = 50$ m/s



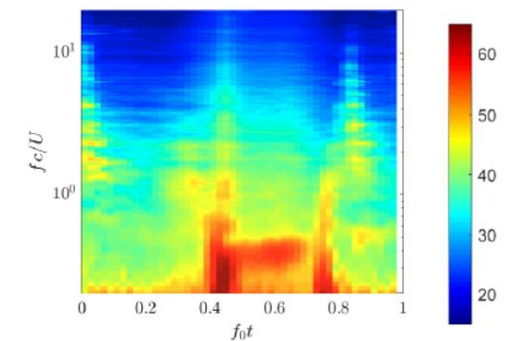
- Analyses acoustiques



(a) $k = 0.005$



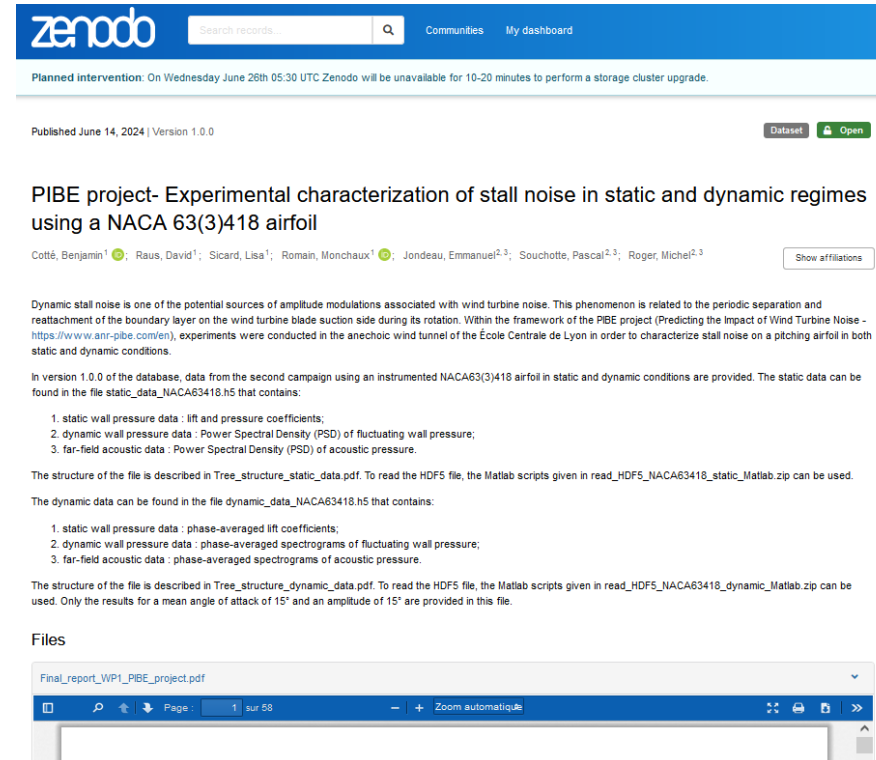
(b) $k = 0.01$



(c) $k = 0.025$



- Bruit de décrochage dynamique
 - Base de données en ligne



The screenshot shows the Zenodo record page for the PIBE project dataset. The title is "PIBE project- Experimental characterization of stall noise in static and dynamic regimes using a NACA 63(3)418 airfoil". The authors listed are Cotté, Benjamin¹; Raus, David¹; Sicard, Lisa¹; Romain, Monchaux¹; Jondeau, Emmanuel^{2,3}; Soucotte, Pascal^{2,3}; Roger, Michel^{2,3}. The page includes a description of the dataset, which contains static and dynamic wall pressure data and far-field acoustic data. It also provides instructions on how to access the data files and read the HDF5 files using MATLAB scripts.



<https://zenodo.org/records/10638882>



Axe 2

Estimer la variabilité des niveaux sonores et leurs incertitudes associées

○ Campagne expérimentale *in situ* (UMRAE, Cerema, EDF)

- Site
 - Parc de la Beauce
 - 8 éoliennes (3 MW, h=80m, R=45m)
- Période d'observation de long terme
 - 5 points acoustiques
 - 410 jours (2020-21)
- Périodes d'observation de court terme
 - 1 semaine en été
 - 1 semaine en hiver
 - LT + 10 points acoustiques + 2 points IEC



Axe 2 : variabilité et incertitudes

○ Long terme

■ Acoustique

- 5 points (h=1,5m)
- -1400m à +1300m
- Leq(100ms)
- [6,3Hz; 20kHz]
- 2min toutes les 10min



■ Météo

- Lidar météo : 10 min profils verticaux de vent (vit., dir.) (11 hauteurs, 10m-185 m)
- mât météo 80m
 - * Profil T° (4 hauteurs, 6m-80m)
 - * 3 sonic anemo 3D : profil de turbulence (3 hauteurs, 10m-80m)
- Vent à hauteur de nacelle



■ Impedance acoustique de sol

- 2 localisations
- 1 mes/mois

■ Données éoliennes (SCADA)

- Production, pitch, vitesse rotation...



Axe 2 : variabilité et incertitudes

○ Court terme =

Long terme +

- Acoustique (+ 10 points)

- -2000m to +2000m

- Lw éolienne

- 2 points IEC 61400-11 points

- Meteo

- Hiver : 2e Lidar météo : profil vertical vent 10 min (vit., dir.) (11 hauteurs, 10m-185 m)

- 2 sonic anemo 3D : flux vent et T° (MOST theorie) -> profil vertical de vitesse du son



Axe 2 : variabilité et incertitudes



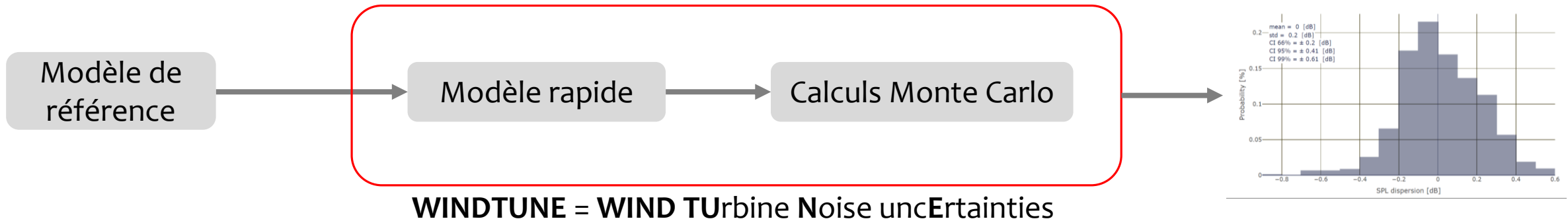
- Acoustique
 - > 57 millions données individuelles, >57 600 échantillons audio (2min)
- Météo
 - Profil vertical de vent (vit., dir.) (11 hauteurs, 10m-185 m)
 - Profil vertical de température (4 hauteurs, 6m-80m)
 - Profil vertical de turbulence de vent (3 hauteurs, 10m-80m)
 - Vent hauteur nacelle
- Données complémentaires
 - Données parc éolien (prod. elec., pitch, rotation...)
 - Informations sur sources parasites : train, avions, bruit du vent au microphone.
- Base de données via un outil dédié (indexation, requêtes) Elasticsearch+Shiny



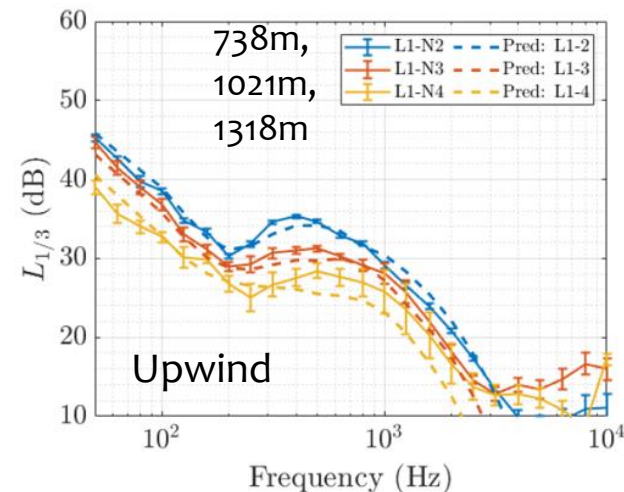
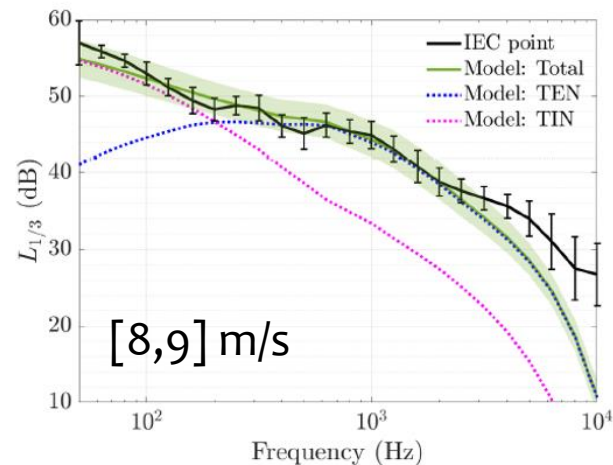
<https://cerema-med.shinyapps.io/pibe-app/>



- Modèle d'incertitudes de la prévision du bruit éolien (UMRAE)



- Modèle de référence de prévision du bruit éolien (ENSTA, UMRAE)
 - Emission : bruit de bord d'attaque + bord de fuite (modèle Amiet)
 - Propagation : effets météorologiques + effets de sol (modèle WAPE)





Modèle de propagation de référence disponible en ligne

main 1 Branch 0 Tags		
Go to file Code		
bkayser13 Update README.md d27b43b · last year 22 Commits		
DeltaLeps	Add files via upload	last year
LICENCE.md	Create LICENCE.md	2 years ago
Mach.m	Add files via upload	2 years ago
Miki.m	Add files via upload	2 years ago
README.md	Update README.md	last year
SPL.m	Add files via upload	last year
SetAtmos.m	Add files via upload	2 years ago
Wgauss.m	Add files via upload	2 years ago
amort.m	Add files via upload	2 years ago
atmos.m	Add files via upload	2 years ago
fast_turb.m	Add files via upload	2 years ago
image.png	Add files via upload	2 years ago
initialisation_WAPE.m	Add files via upload	2 years ago
interpolation.m	Add files via upload	2 years ago
main.m	Add files via upload	2 years ago
roughness.m	Add files via upload	2 years ago
sourceSalomons_order2.m	Add files via upload	2 years ago
thickness.m	Add files via upload	2 years ago

README

EUPL-1.2 license

Wide Angle Parabolic Equation model with arbitrary Mach number

The WAPE model proposed here is an implementation of the work of [Ostashev et al 2020]. The WAPE is developed using a Padé(1,1) series expansion. A Crank-Nicholson algorithm is used to reduce the equation into a matrix system. Then, the 2D acoustic pressure field is calculated using a second-order centered finite difference scheme on velocity potential.

This code is intended to be shared with the research community.

Installation

This WAPE model is designed to run with [Matlab](#), without any additional toolbox.

Run a calculation

To run a calculation you need to open "initialisation_WAPE.m", set parameters values, and run the script. It is indicated which parameter can be modified and which can not.

The input parameters are:

```

%% Source parameters
freq = 250; % source frequency (Hz)
Hs = 35; % source height (m)

%% Medium properties
T = 10; % atmospheric temperature at the surface (°C)
Tlog = 0.2; % temperature coefficient for the vertical gradient

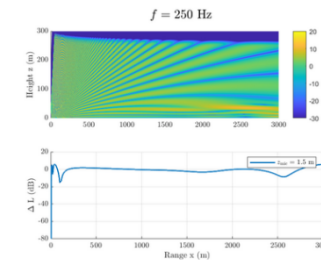
shear_exp = 0.15; % wind shear exponents (scalar) for power-law wind profile
v_ref = 5; % wind speed (m/s) measured at z_ref height, for power-law wind profile
z_ref = 10; % reference height for wind speed v_ref
theta = 0; % propagation angle with respect to the source (0° : downwind, 180° : upwind)

f_turb_ind = true; % logical 'true' or 'false' to account for turbulence or not
gwt = 0; % turbulence strength

```

Post-processing

When the simulation has completed there will be 'Delta.mat' and 'normalized_SPL.mat' files which correspond respectively to attenuation to free field (dB), and sound pressure level field (dB) which is normalized by the maximum amplitude. You can post-process these signals to your liking. Here is an example of output:



Warning

Instabilities can occur with PE simulations if:

- the spatial steps are too large,
- the absorber layer at the top of the domain is not thick enough.

Calculation time can be really long and take a lot of memory if:

- the spatial steps are too small,
- the domain is too big,
- the frequency is too high.

License

This code is released under the EUPL license.

Credits

The development of this code took part into the french [PIBE project](#).



<https://github.com/Universite-Gustave-Eiffel/WAPE>



WindTUNE : outil web incertitudes (UMRAE)

Input parameters

Receiver height [m]:

 Dispersion

Wind speed U_{ref} [m/s]:

 Dispersion

Wind direction [°]:

 Dispersion

Shear factor α [m/s]:

 Dispersion

Atmospheric turbulence γ_T :

 Dispersion

Temperature T_0 [°C]:

 Dispersion

Temp Gradient T_{log} [°C.m⁻¹]:

 Dispersion

Ground absorption σ [kN.s.m⁻¹]:

 Dispersion

Wind farm geometry

Coordinates type
☒ GPS
☐ Cartesian

Receiver GPS Latitude

Receiver GPS Longitude

GPS Coordinates File

Turbine GPS Latitudes

Turbine GPS Longitudes

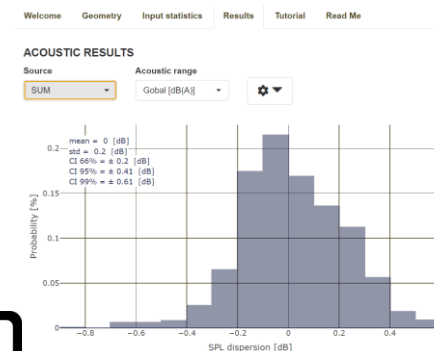
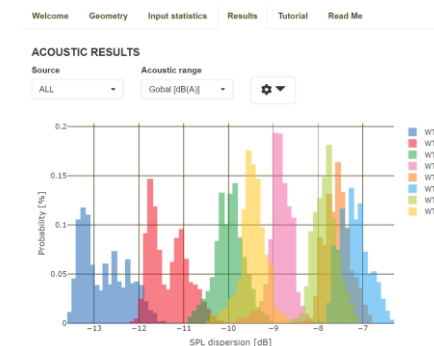
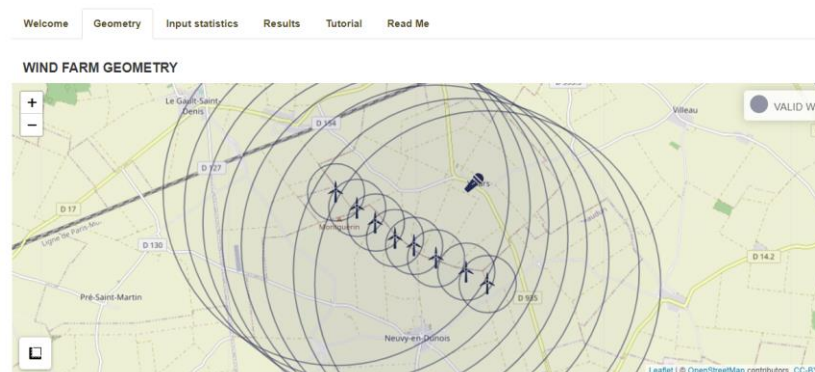
Input parameters

Receiver height [m]:

 Dispersion

Wind speed U_{ref} [m/s]:

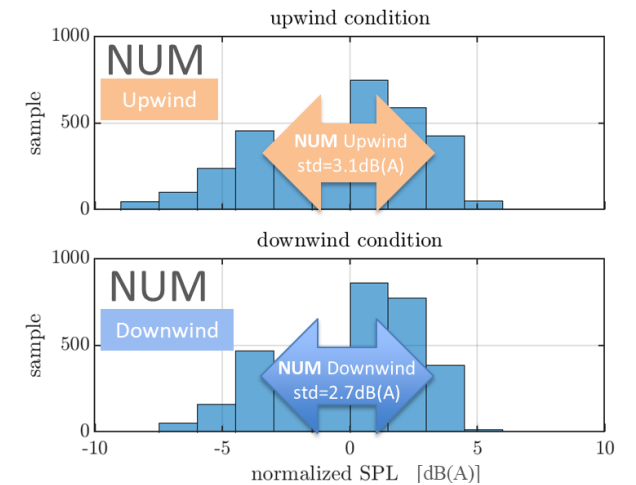
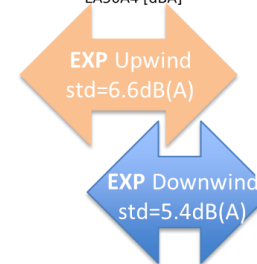
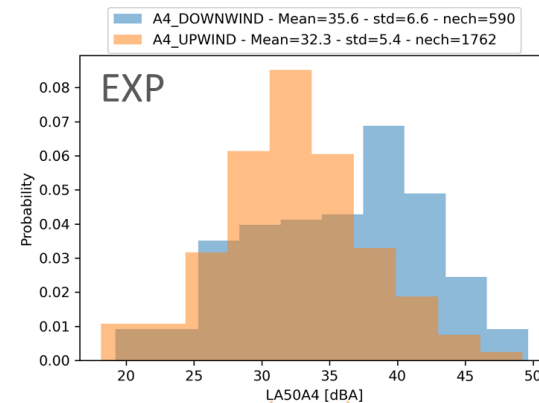
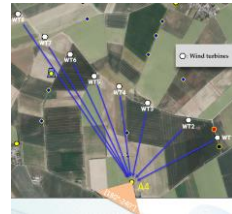
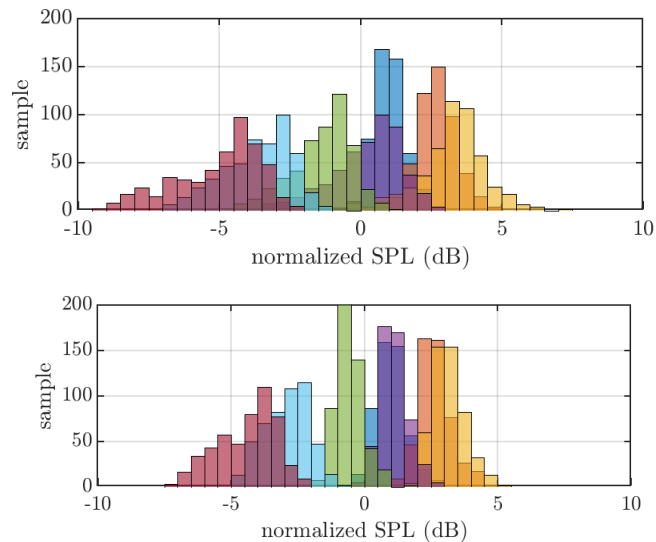
 Dispersion



<https://cerema-med.shinyapps.io/WindTUNE/>



○ Premières validations WindTUNE vs exp.

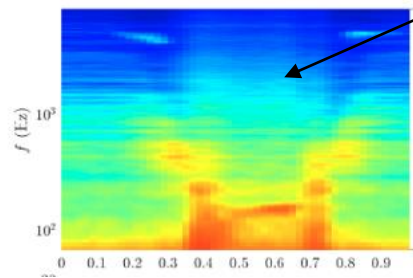
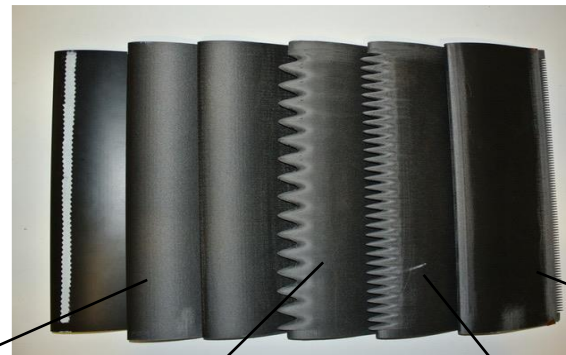
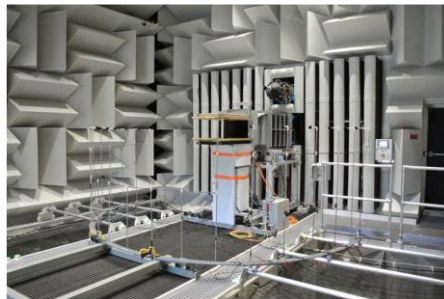


Axe 3

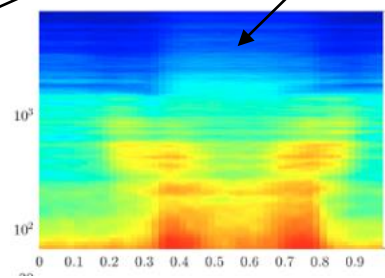
Etudier de nouvelles solutions de réduction du bruit à la source

Axe 3 : réduire le bruit à la source

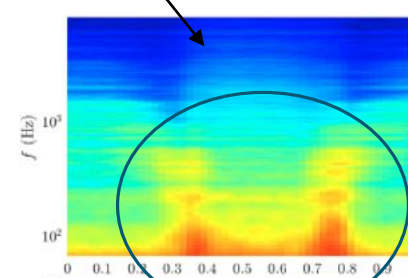
- Réduction du bruit de bord d'attaque (ECL)
 - Bio-inspiré : ondulations de bord d'attaque
 - Essais en soufflerie anéchoïque



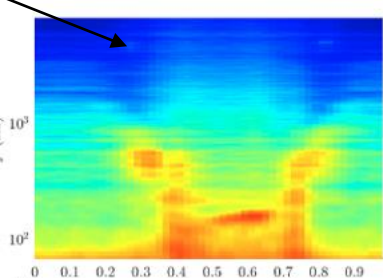
Référence



Ondulations 20mm



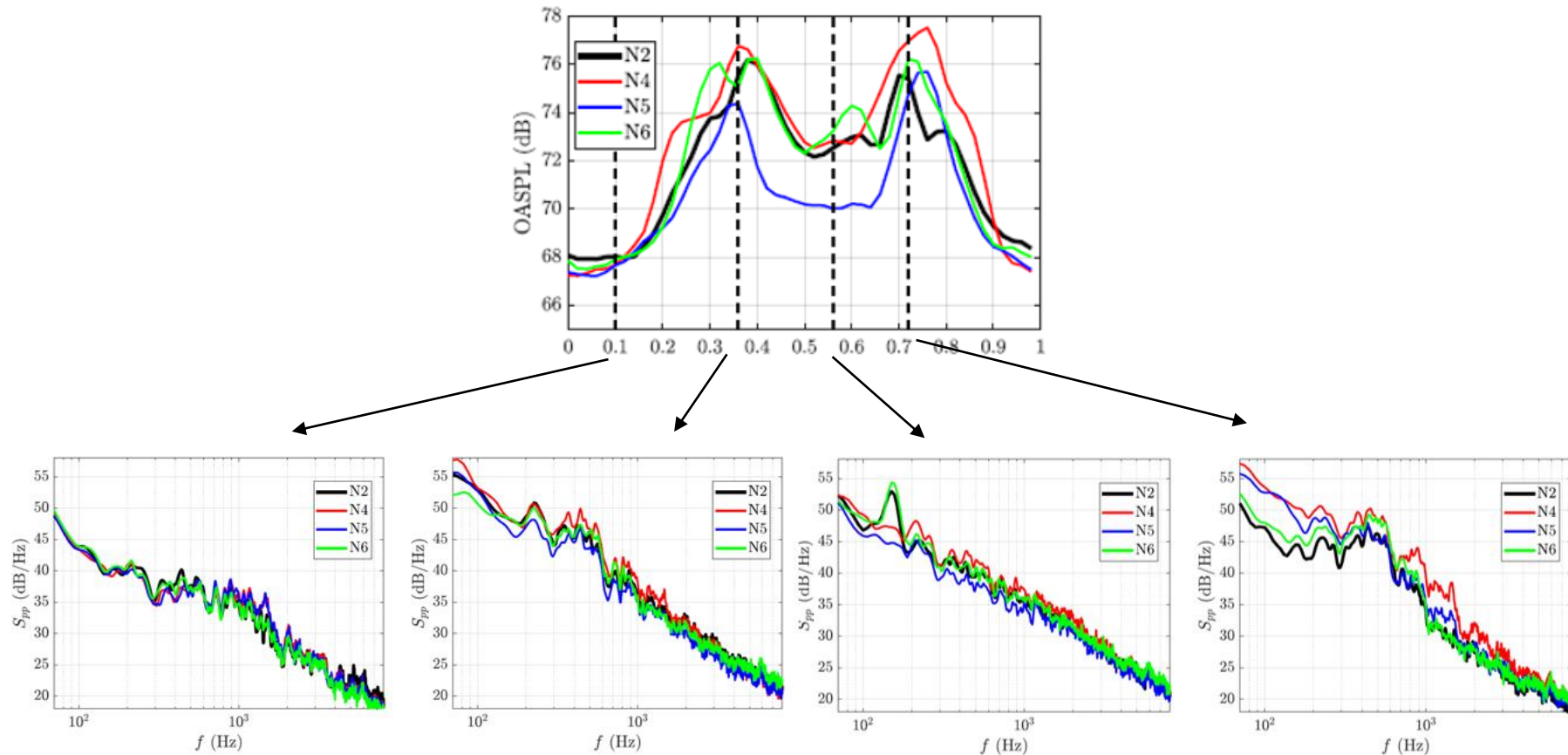
Ondulations 10mm



Serrations

Axe 3 : réduire le bruit à la source

○ Réduction du bruit de bord d'attaque (ECL)



- Modèle de propagation du bruit éolien
- Base de données expérimentales du bruit de décrochage dynamique
- Base de données expérimentales de longue durée du bruit d'un parc éolien
- Application web de calcul des incertitudes des prévisions du bruit éolien (WindTUNE)
- Application web d'évaluation de l'influence de la turbulence sur la propagation du bruit éolien (ShadZapp)
- Bibliothèque de calcul des incertitudes de prévisions par modèle d'ingenierie du bruit éolien (package OCP-Tympan)
- Evaluations de nouvelles solutions de réduction du bruit à la source
- Publications : 4 articles, 15 com. internationales, 1 thèse



Productions



- Kayser, B., Ecotière, D., Gauvreau, B., 2023. Criteria for the assessment of the influence of atmospheric turbulence on wind turbine noise propagation. *Acta Acustica* 7, 63.
- Kayser, B., Mascarenhas, D., Cotté, B., Ecotière, D., Gauvreau, B., 2023. Validity of the effective sound speed approximation in parabolic equation models for wind turbine noise propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 153, 1846–1854
- Raus, D., Cotté, B., Monchaux, R., Jondeau, E., Souchotte, P., Roger, M., 2022. Experimental study of the dynamic stall noise on an oscillating airfoil. *Journal of Sound and Vibration* 537, 117144
- Sicard, L., Monchaux, R., Cotté, B., Raus, D., Jondeau, E. *Experimental characterization of the airfoil stall noise at high angles of attack. Soumis à Journal of Fluid Mechanics 2024*



- Cotté, B., Sicard, L., Monchaux, R., Jondeau, E., Souchotte, P., Roger, M., 2024. Experimental characterization of stall noise on a pitching wind turbine blade section, in: *Proc. Inter-Noise 2024, Nantes*.
- Ecotière, D., Gauvreau, B., Cotté, B., Roger, M., Schmich-Yamane, I., Junker, F., 2024. Predicting the impact of wind turbine noise: general overview and results of the PIBE project, in: *Proc. Inter-Noise 2024,, Nantes*.
- Gauvreau, B., Alarcon, A., Bianchetti, S., Boittin, R., Brendel, L., Cotté, B., Gary, V., Guillaume, G., Junker, F., Kayser, B., Lefèvre, H., Litou, G., Mascarenhas, D., Ripolles, J., Schmich-Yamane, I., Ecotière, D., 2024. Uncertainties in numerical predictions and experimental characterization of wind farm noise, in: *Proc. Inter-Noise 2024, Nantes*.
- Guillaume, G., Cotté, B., Ecotière, D., Gauvreau, B., Lefèvre, H., Junker, F., Schmich-Yamane, I., 2024. Development and distribution of an in situ experimental wind turbine noise database, in: *Proc. Inter-Noise 2024, Nantes*.
- Ripolles, J., Thénint, T., Schmich-Yamane, I., 2024. Introducing uncertainties in acoustic engineering studies, in: *Proc. Inter-Noise 2024, Nantes*.
- Ecotière, D., 2023. Uncertainties of band sound levels when estimated from monochromatic outdoor sound propagation calculations, in: *Proc. Internoise, Chiba, Japan*.
- Kayser, B., 2023. Open access of a wide-angle parabolic equation model for sound propagation in a moving atmosphere above an absorbing and rough ground, in: *Proc. Forum Acusticum, Torino, Italy*.
- Bianchetti, S., Kayser, B., Guillaume, G., Gauvreau, B., Notarantonio A., Junker F., Ecotière, D., 2023. Variability and uncertainty of wind farm noise: A comparison between numerical predictions and in-situ measurements, in: *Proc. Forum Ac., Italy*.
- Cotté, B., Mascarenhas, D., Ecotière, D., Guillaume, G., Gauvreau, B., Junker, F., 2023. Validation of a wind turbine noise propagation model against field measurements, in: *Proc. Forum Ac., Torino, Italy*.
- Kayser, B., Bianchetti, S., Ecotière, D., Gauvreau, B., 2023. WindTUNE: a new tool for modelling wind farm noise uncertainties, in: *Proc.10th Int. Conf. on Wind Turbine Noise, Dublin, Ireland*
- Kayser, B., Ecotière, D., Gauvreau, B., 2022. Modelling the uncertainties of wind farm noise predictions, in: *Proceeding of Inter-Noise 2022, Glasgow, UK*.
- Ecotière, D., Gauvreau, B., Schmich-Yamane, I., Alarcon, A., Nessi, M.-C., Junker, F., Guillaume, G., Gary, V., Brendel, L., Litou, G., Boittin, R., Segaud, L., Lefèvre, H., 2022. A large-scale, long-term experimental campaign for the investigation of wind turbine noise fluctuations and amplitude modulation phenomena, in: *Proceeding of Inter-Noise 2022, Glasgow, UK*
- Mascarenhas, D., Cotté, B., Doaré, O., Ecotière, D., Guillaume, G., Gauvreau, B., Schmich-Yamane, I., Junker, F., 2022. Wind turbine noise modeling including aeroacoustic sources and propagation effects: comparison against field measurements, in: *Proceeding of Inter-Noise 2022, Glasgow, UK*
- Raus, D., Cotté, B., Monchaux, R., Lafoux, B., Jondeau, E., Souchotte, P., Roger, M., 2020. Experimental Investigation of the Acoustic Radiation of an Oscillating Airfoil, in: *Proc. 9th Forum Acusticum., Lyon, France*
- Raus, D., Sicard, L., Cotté, B., Monchaux, R., Jondeau, E., Souchotte, P., Roger, M., 2021. Experimental characterization of the noise generated by an airfoil oscillating above stall, in: *Proc. Aviation Forum. Online, pp. 2021–2291*
- Ecotière, D., Gauvreau, B., Cotté, B., Roger, M., Schmich, I., Nessi, M.-C., 2019. PIBE: a new French project for predicting the impact of wind turbine noise, in: *Proceeding of 8th Int. Conf. on Wind Turbine Noise, Lisbon, Portugal*.



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



Bilan scientifique

- Congrès Internoise 2024, Nantes (session «Wind turbine Noise»)
- 27-28 août 2024



Journée de restitution publique

- Cerema, Bron
- 21 janvier 2025



- Contact :
 - david.ecotiere@cerema.fr



www.anr-pibe.com