

Estimation des incertitudes du bruit éolien : méthodes et outils

Bill Kayser

bill.kayser@cerema.fr



Table des matières

Contexte

Modélisation de l'émission acoustique

Modélisation des effets propagatifs

Analyse de sensibilité

Propagation d'incertitudes

Contexte

- ▶ Actuellement, peu de méthodologies sont disponibles pour évaluer les incertitudes des niveaux sonores.
- ▶ Comment se prononcer sur la **fiabilité** des résultats et les **risques de dépassement** ?
- ▶ Il existe 2 sources d'incertitudes dans le contexte éolien :
 1. l'imprécision des **modèles numériques** et des méthodes de prévision.
 2. la variabilité des **paramètres environnementaux** (sol, vent, température, etc...) qui influencent les niveaux sonores chez le riverain.

Contexte

- ▶ Actuellement, peu de méthodologies sont disponibles pour évaluer les incertitudes des niveaux sonores.

- ▶ Comment se prononcer sur la **fiabilité** des résultats et les **risques de dépassement** ?

- ▶ Il existe 2 sources d'incertitudes dans le contexte éolien :
 1. l'imprécision des **modèles numériques** et des méthodes de prévision.
 2. la variabilité des **paramètres environnementaux** (sol, vent, température, etc...) qui influencent les niveaux sonores chez le riverain.

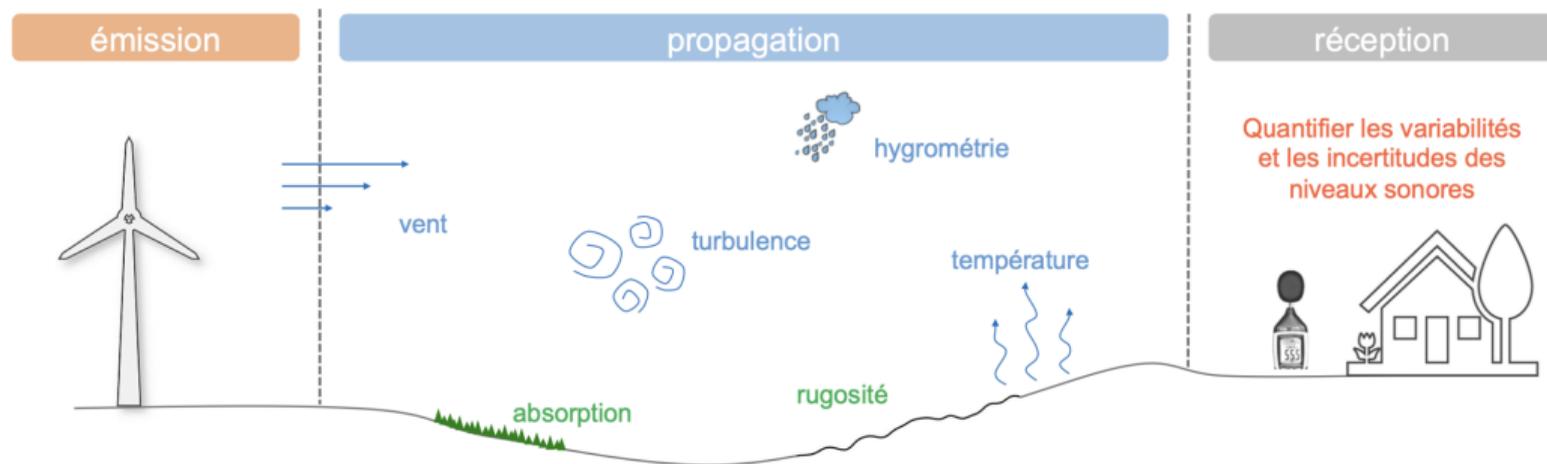
Contexte

- ▶ Actuellement, peu de méthodologies sont disponibles pour évaluer les incertitudes des niveaux sonores.

- ▶ Comment se prononcer sur la **fiabilité** des résultats et les **risques de dépassement** ?

- ▶ Il existe 2 sources d'incertitudes dans le contexte éolien :
 1. l'imprécision des **modèles numériques** et des méthodes de prévision.
 2. la variabilité des **paramètres environnementaux** (sol, vent, température, etc...) qui influencent les niveaux sonores chez le riverain.

Les différentes sources d'incertitudes



$$L_p = \Delta_{source} + \Delta_{atmosphere} + \Delta_{sol}$$

Démarche scientifique

1. Développer un **modèle numérique de référence** pour la prévision du bruit éolien.
2. Déterminer les **paramètres** de l'environnement **influentes**, fixer ceux d'influence **négligeable**.
3. Développer un **métamodèle** basé sur le modèle de référence, réduisant drastiquement les temps de calcul, permettant des simulations nombreuses pour l'**estimation des incertitudes**.
4. Développer une **interface en ligne libre d'accès** mettant en oeuvre le métamodèle.

Démarche scientifique

1. Développer un **modèle numérique de référence** pour la prévision du bruit éolien.
2. Déterminer les **paramètres** de l'environnement **influent**s, fixer ceux d'influence **négligeable**.
3. Développer un **métamodèle** basé sur le modèle de référence, réduisant drastiquement les temps de calcul, permettant des simulations nombreuses pour l'**estimation des incertitudes**.
4. Développer une **interface en ligne libre d'accès** mettant en oeuvre le métamodèle.

Démarche scientifique

1. Développer un **modèle numérique de référence** pour la prévision du bruit éolien.
2. Déterminer les **paramètres** de l'environnement **influent**s, fixer ceux d'influence **négligeable**.
3. Développer un **métamodèle** basé sur le modèle de référence, réduisant drastiquement les temps de calcul, permettant des simulations nombreuses pour **l'estimation des incertitudes**.
4. Développer une **interface en ligne libre d'accès** mettant en oeuvre le métamodèle.

Démarche scientifique

1. Développer un **modèle numérique de référence** pour la prévision du bruit éolien.
2. Déterminer les **paramètres** de l'environnement **influent**s, fixer ceux d'influence **négligeable**.
3. Développer un **métamodèle** basé sur le modèle de référence, réduisant drastiquement les temps de calcul, permettant des simulations nombreuses pour l'**estimation des incertitudes**.
4. Développer une **interface en ligne libre d'accès** mettant en oeuvre le métamodèle.

Contexte

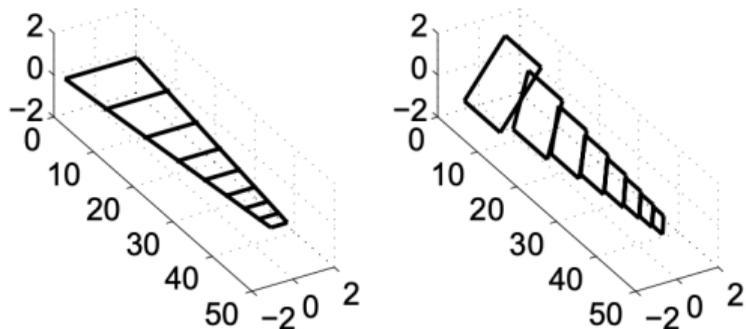
Modélisation de l'émission acoustique

Modélisation des effets propagatifs

Analyse de sensibilité

Propagation d'incertitudes

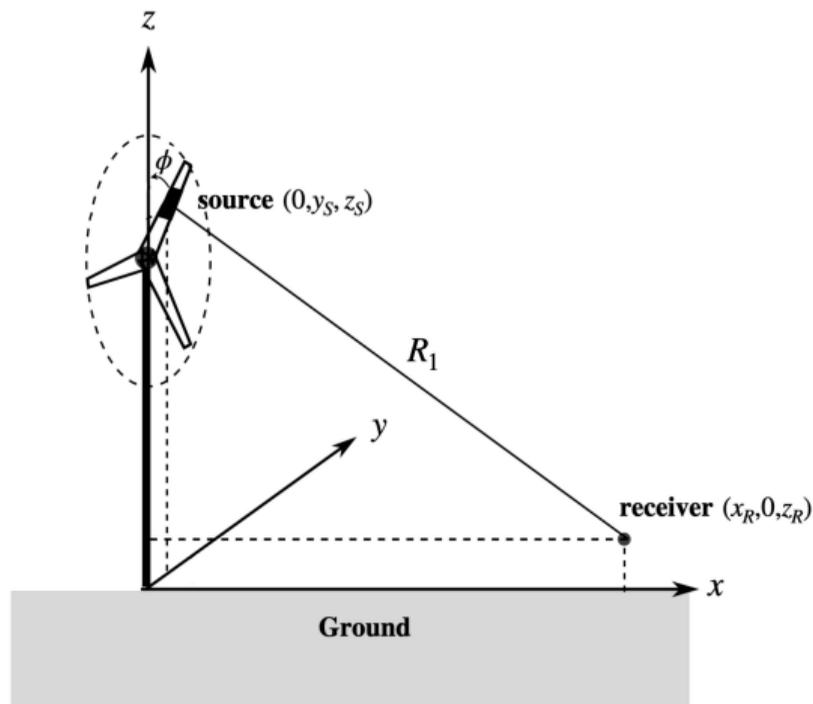
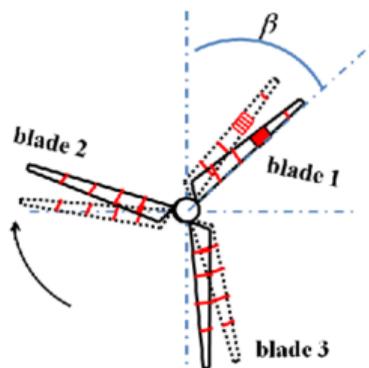
Emission - *strip theory*



La pale est découpée en 8 segments pour tenir compte de la géométrie variable de la pale, ainsi que de son "pitch". Cela permet également de tenir compte du flux d'air non-uniforme le long de la pale.

Emission - application à une pale tournante - cf [Cotté, 2018]

- ▶ Pour chaque segment, et à chaque position angulaire β , on calcule le bruit rayonné à l'aide de la **théorie d'Amiet**.
- ▶ On somme les contributions de chaque segment à la position d'un récepteur.



Contexte

Modélisation de l'émission acoustique

Modélisation des effets propagatifs

Analyse de sensibilité

Propagation d'incertitudes

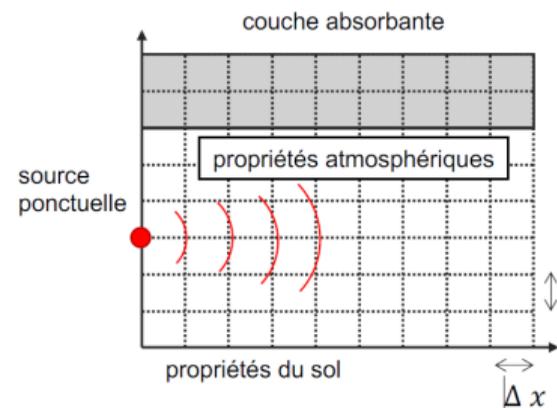
Effets propagatifs - Modèle équation parabolique

► Effets de sol :

- Absorption acoustique au travers du modèle d'impédance de Miki.
- Diffusion au travers d'un spectre de rugosité gaussien.

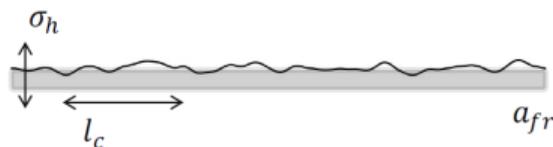
► Effets de l'atmosphère :

- Réfraction induite par les gradients verticaux de vent et de température.
- Absorption atmosphérique qui dépend de la température et de l'hygrométrie.
- Diffusion acoustique par la turbulence atmosphérique



Effets propagatifs - Modèle d'impédance de sol

Modèle d'admittance effective de sol : $\beta = \frac{1}{Z} + \beta_{rough}$.



Effets d'absorption à l'aide du modèle d'impédance de Miki :

$$Z(f) = \rho_0 c_0 \left[1 + 5.5 \left(\frac{f}{a_{fr}} \right)^{-0.632} + i8.43 \left(\frac{f}{a_{fr}} \right)^{-0.632} \right]$$

Effets de diffusion *via* spectre de rugosité gaussien :

$$W(k) = \frac{\sigma_h^2 l_c \frac{-k^2 l_c^2}{4}}{2\sqrt{\pi}}$$

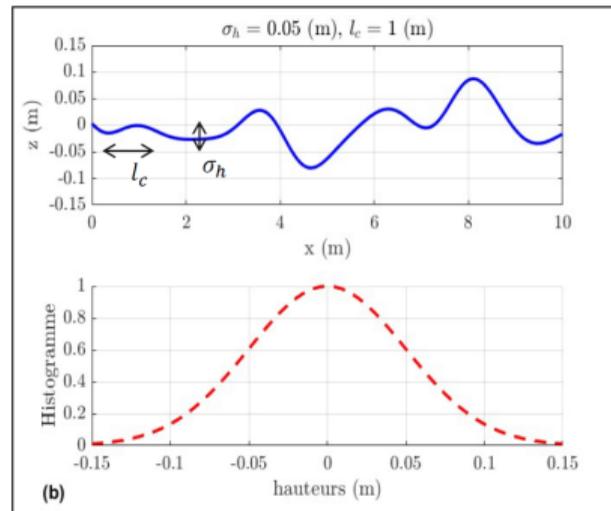
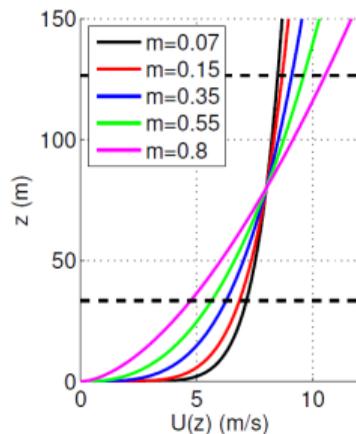


Figure – Exemple de sol rugueux.

Effets propagatifs - profil de vent

profil en loi de puissance

$$U(z_2) = U(z_1) \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha$$

avec α le *shear exponent*.

classe de stabilité	<i>shear exponent</i>
instable	$\alpha < 0.1$
neutre	$0.1 < \alpha < 0.2$
peu stable	$0.2 < \alpha < 0.4$
très stable	$\alpha > 0.4$

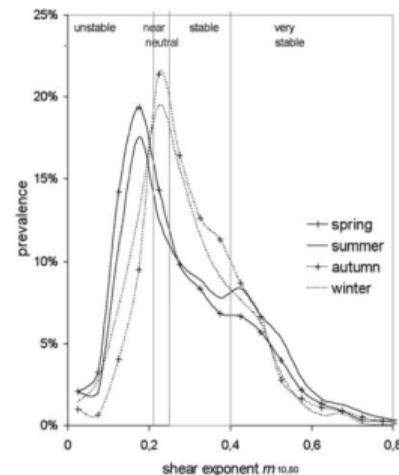
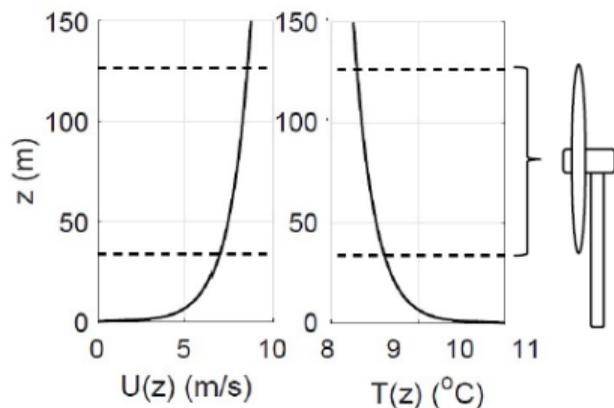


Figure – [van den Berg, 2008]

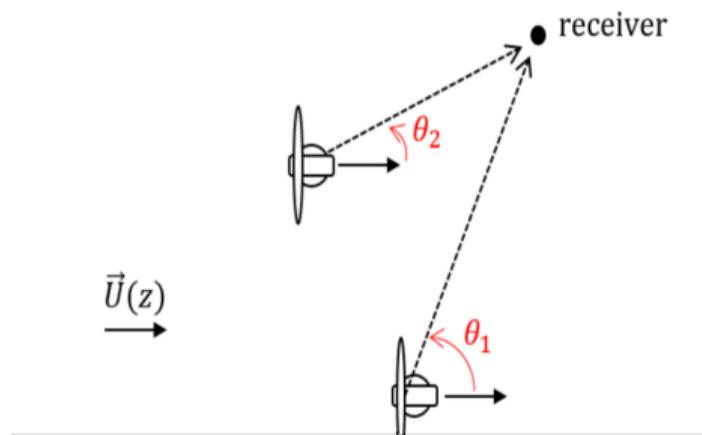
Effets propagatifs - profil thermique - angle de propagation

Hypothèse pour l'atmosphère

Les profils de vent et de température sont invariants avec la distance de propagation.

Angle de propagation θ

L'angle de propagation (source-récepteur / direction du vent) pondère l'effet du vent.



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

<> Code Issues Pull requests Actions Projects Security Insights

main 1 branch 0 tags

Go to file

Code

bkayser13 Update README.md		d27b43b on Apr 27	22 commits
DeltaL.eps	Add files via upload		8 months ago
LICENCE.md	Create LICENCE.md		9 months ago
Mach.m	Add files via upload		9 months ago
Miki.m	Add files via upload		9 months ago
README.md	Update README.md		5 months ago
SPL.eps	Add files via upload		8 months ago
SetAtmos.m	Add files via upload		9 months ago
Wgauss.m	Add files via upload		9 months ago
amort.m	Add files via upload		9 months ago
atmos.m	Add files via upload		9 months ago
fast_turb.m	Add files via upload		9 months ago
image.png	Add files via upload		9 months ago
initialisation_WAPE.m	Add files via upload		9 months ago
interpolation.m	Add files via upload		9 months ago
main.m	Add files via upload		9 months ago
roughness.m	Add files via upload		9 months ago
sourceSalomons_order2.m	Add files via upload		9 months ago
thickness.m	Add files via upload		9 months ago

About

No description, website, or topics provided.

Readme

EUPL-1.2 license

Activity

0 stars

1 watching

0 forks

Report repository

Releases

No releases published

Packages

No packages published

Languages

MATLAB 100.0%

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

☰ README.md

```

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 profil
v_ref = 5; % wind speed (m/s) measured at z_ref height, for power-law wind profile
z_ref = 80; % 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
gamT = 0; % turbulence strength

%% 2D Spatial domain (x,z)
dim_x = 3000; % horizontal dimension x of the domain (m)
dim_z = 300; % vertical dimension z of the domain (m)

haut_a = 0.8; % where the absorbing layer starts at the top of the domain, according to z axis (0.8
coeff_a = 10; % damping rate

discrx = 10; % discretization x = lambda/discrx
discrz = 10; % discretization z = lambda/discrz

z_r = 1.5; % receiver height for plotting (m)

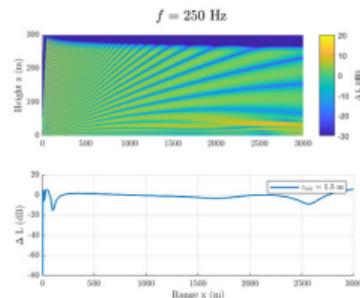
%% Ground properties
hv = 0; % vegetation height (m), it affects the shape of atmospheric profiles
z0 = 0.13*hv + 0.00001; % atmospheric roughness length (m), can't be null
d = 0.66*hv; % displacement height of flux profiles (m), it's directly linked to vegetation height

lc = 0; % correlation length (m) (ground roughness parameter), if 0 : no ground rugosity, [0
sigmah = 0; % standard deviation of roughness height (m) (ground roughness parameter), [0.01-0.05
sigma = 10000000; % airflow resistivity of the ground (kN.s.m-4)
h = 0; % thickness of ground surface layer (m), if h = 0 no layer

```

Post-processing

When the simulation has completed there will be 'DeltaL.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 exemple of output:



Warning

Instabilities can occur with PE simulations if:

- the spatial steps are too large,
- the absorbent 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.

Contexte

Modélisation de l'émission acoustique

Modélisation des effets propagatifs

Analyse de sensibilité

Propagation d'incertitudes

Analyse de sensibilité - principe

→ Les méthodes d'analyse de sensibilité permettent de déterminer les entrées qui contribuent le plus sur la variabilité de la sortie (ici le niveau sonore).

→ L'intérêt est certain car cela permet de :

1. mieux comprendre les phénomènes modélisés
2. concentrer les efforts sur les variables influentes
3. simplifier le modèle en excluant (ou fixant) les variables négligeables.

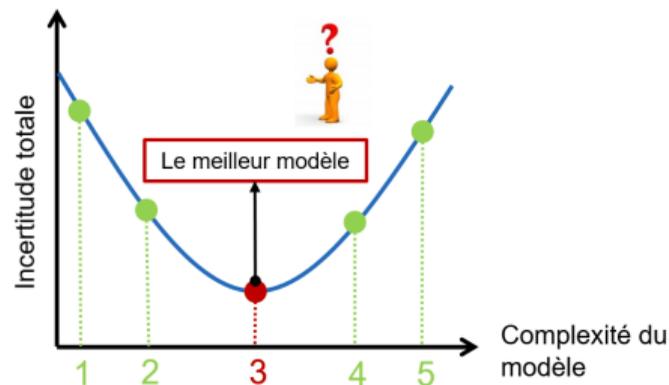
Analyse de sensibilité - principe

→ Les méthodes d'analyse de sensibilité permettent de déterminer les entrées qui contribuent le plus sur la variabilité de la sortie (ici le niveau sonore).

→ L'intérêt est certain car cela permet de :

1. mieux comprendre les phénomènes modélisés
2. concentrer les efforts sur les variables influentes
3. simplifier le modèle en excluant (ou fixant) les variables négligeables.

Analyse de sensibilité - principe



Rasoir d'Ockham :
 « pourquoi faire
 compliqué quand on
 peut faire simple ? »
 « it is vain to do with
 more what can be done
 with fewer »

Quel est le meilleur modèle ?

- plus le modèle est complexe, plus la variabilité de sortie est grande.
- plus le modèle est simple, plus les hypothèses sont grossières.

Analyse de sensibilité - cf [Kayser et al., 2020]

Utilisation de la méthode d'analyse de sensibilité de Morris.



Propriétés du sol

Propriétés de l'atmosphère



Paramètres	Description	Intervalle variation des paramètres			
		ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4
a_{fr} ($\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}$)	resistivité du sol	50	500	1000	5000
l_c (m)	longueur de corrélation de la rugosité de sol	0.05	0.37	0.68	1
σ_h (m)	écart-type des hauteurs de rugosité de sol	0.01	0.023	0.037	0.05
h_r (%)	hygrométrie de l'air	40	60	80	100
T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	température atmosphérique de surface	0	10	20	30
a_T ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$)	coefficient du gradient thermique	-0.5	-0.25	0	0.25
a_u ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	coefficient du gradient aérodynamique	0.67	0.98	1.33	1.67
h_v (m)	hauteur de végétation	0	0.33	0.66	1
θ ($^{\circ}$)	angle entre source-récepteur et le vent	0	30	60	90

Analyse de sensibilité - exemple de résultats

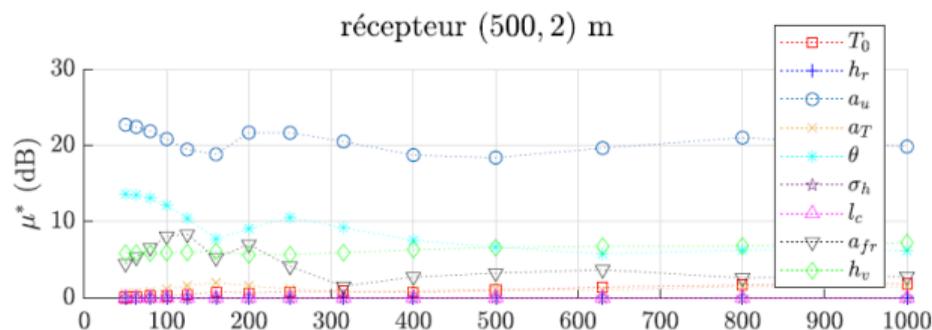


Figure – Effets sur la sortie (dB) des paramètres d'entrée du modèle. Estimation *via* méthode de Morris.

Classement par ordre d'influence :

1. a_u : coeff aéro, puissance source et réfraction
2. θ : angle propa, directivité et réfraction
3. a_{fr} : resistivité du sol, absorption
4. h_v : hauteur de végétation, déplacement des profils (vent et température)
5. T_0 : température atm surface, profil thermique & abs atm
6. a_T : coeff thermique ; réfraction
7. h_r : hygrométrie, abs atm
8. σ_h, l_c : paramètres de rugosité de sol, diffusion

Analyse de sensibilité - exemple de résultats

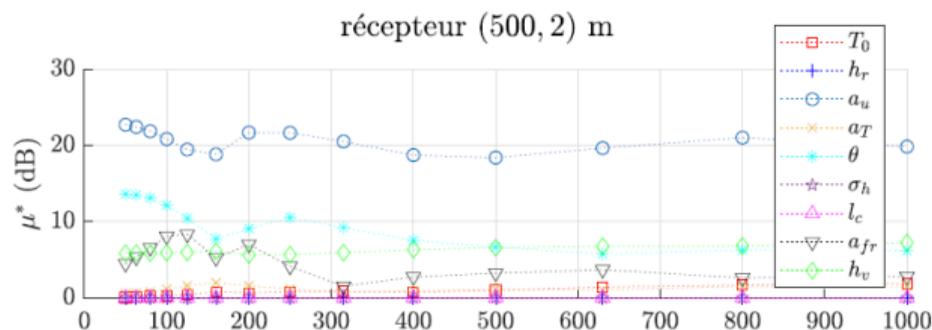


Figure – Effets sur la sortie (dB) des paramètres d'entrée du modèle. Estimation *via* méthode de Morris.

Classement par ordre d'influence :

1. a_u : coeff aéro, puissance source et réfraction
2. θ : angle propa, directivité et réfraction
3. a_{fr} : resistivité du sol, absorption
4. h_v : hauteur de végétation, déplacement des profils (vent et température)
5. T_0 : température atm surface, profil thermique & abs atm
6. a_T : coeff thermique ; réfraction
7. h_r : hygrométrie, abs atm
8. σ_h, l_c : paramètres de rugosité de sol, diffusion

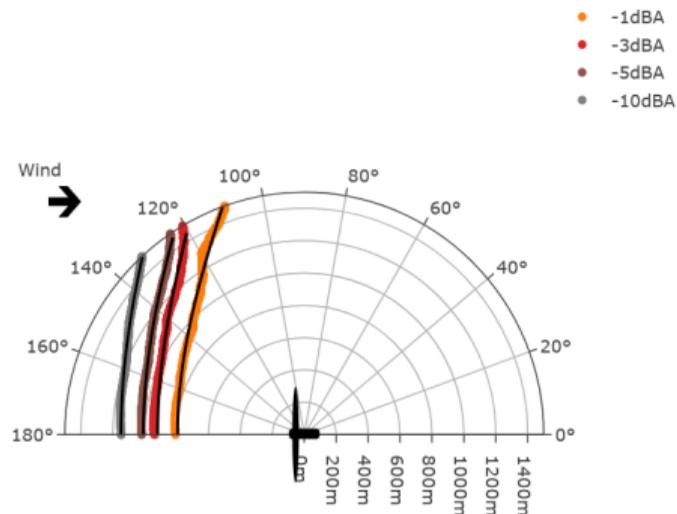
Analyse de sensibilité - turbulence atmosphérique

Quid de la turbulence atmosphérique ?

Analyse de sensibilité - turbulence atmosphérique cf [Kayser et al.,2023]

A partir de quelle distance la turbulence atmosphérique joue un rôle non-négligeable sur les niveaux sonores ?

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



Contexte

Modélisation de l'émission acoustique

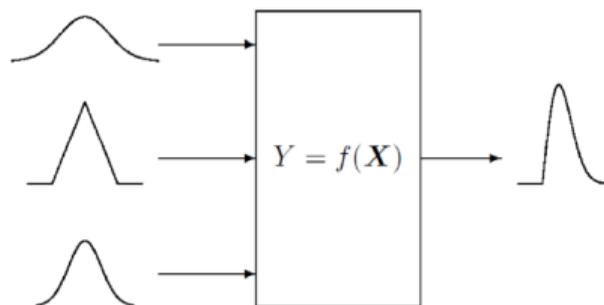
Modélisation des effets propagatifs

Analyse de sensibilité

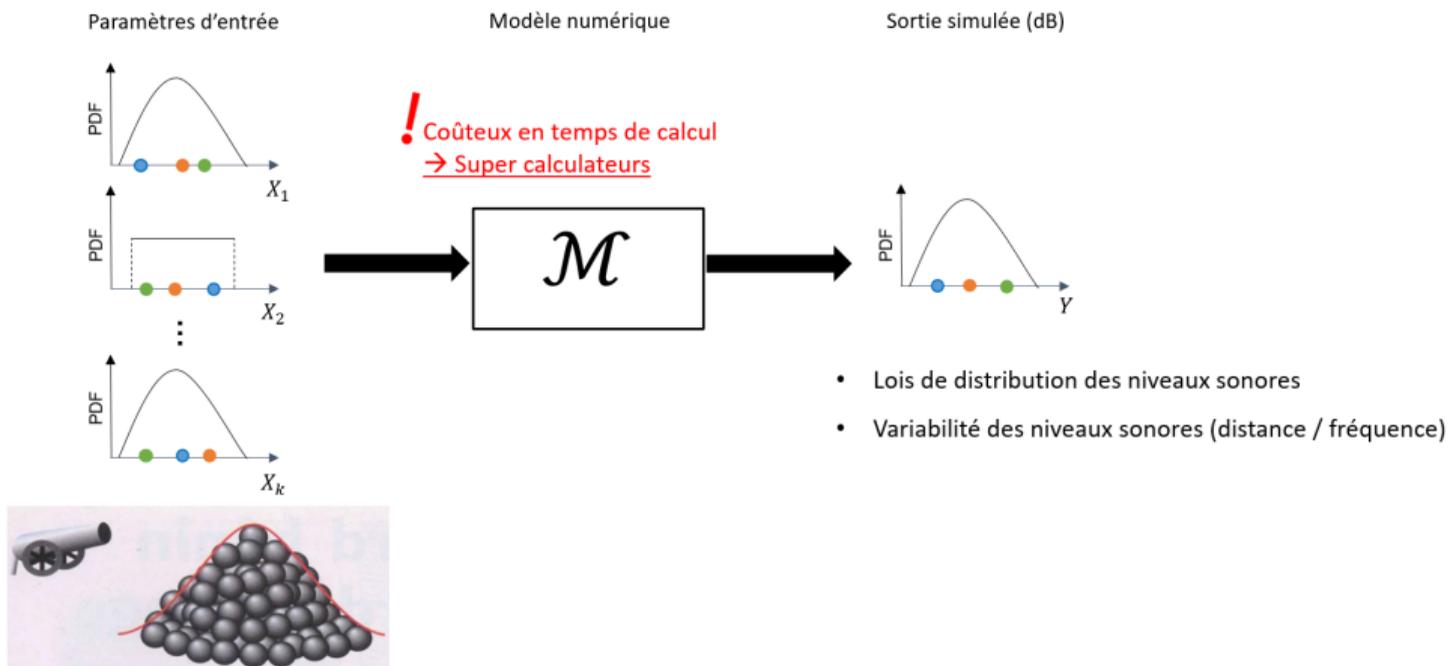
Propagation d'incertitudes

Propagation d'incertitudes - principe

→ Les méthodes de propagation d'incertitudes permettent de savoir quelle variabilité des niveaux sonores est liée à l'incertitude des paramètres d'entrée (*i.e.* vent, température, absorption du sol, etc).



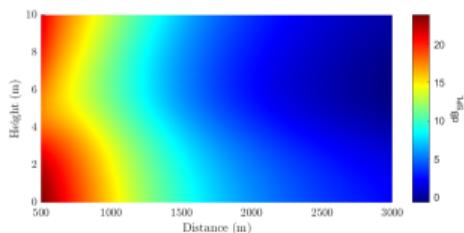
Propagation d'incertitudes - principe



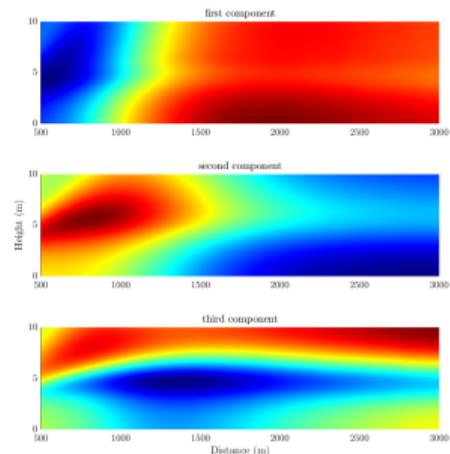
Propagation d'incertitudes - métamodélisation cf [Kayser et al., 2023bis]

Principe : Chaque carte de bruit est la somme de cartes de bruit élémentaires.

1. Les cartes élémentaires sont obtenues par *ACP* d'un jeu d'apprentissage.
2. Les poids de chaque carte sont ensuite calculés par *krigeage*.



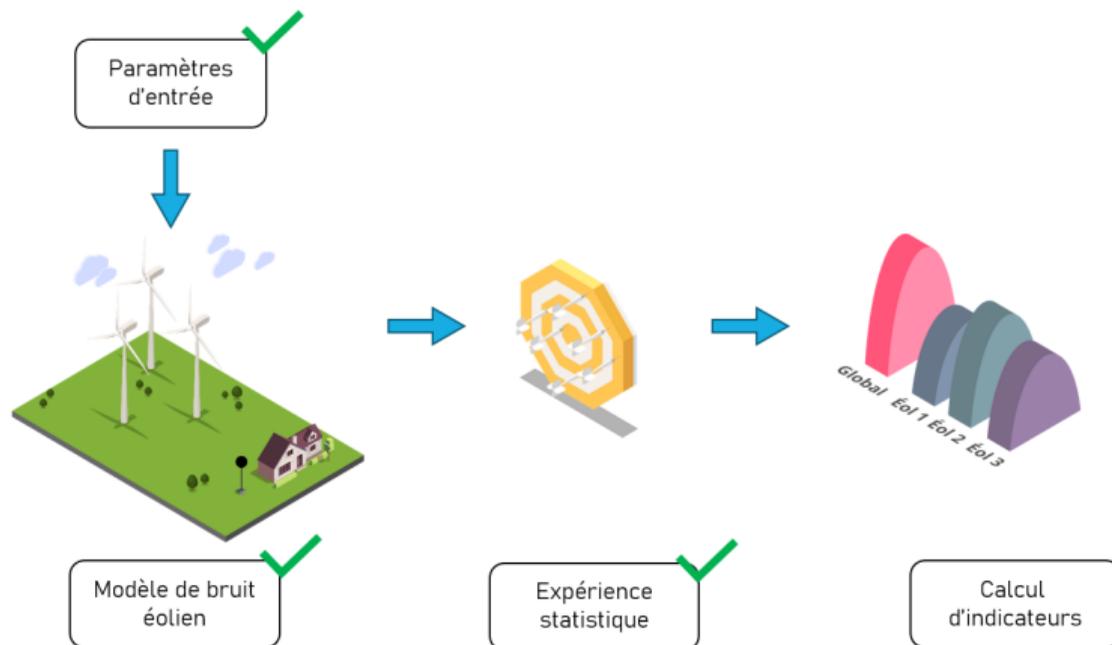
=



→ Au final, création d'un métamodèle par fréquence centrale de tiers d'octave [50Hz;1000Hz], puis calcul du SPL global.

Propagation d'incertitudes - présentation de *WindTune*

L'utilitaire WindTune met en oeuvre le métamodèle pour déterminer la variabilité du bruit éolien chez les riverains.



Propagation d'incertitudes - présentation de *WindTune*

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 :

 Dispersion ▼

Temperature T_0 [°C]:

 Dispersion ▼

Temp Gradient T_{lay} [°C.m⁻¹]:

 Dispersion ▼

Ground absorption σ [kN.s.m⁻¹]:

 Dispersion ▼

Wind farm geometry

Coordinates type
 GPS
 Cartesian

Receiver GPS
 Latitude
 Longitude

GPS Coordinates File

Turbine GPS
 Latitudes
 Longitudes

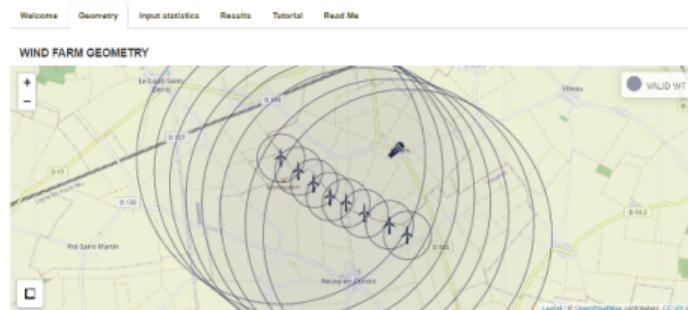
Input parameters

Receiver height [m]:

 Dispersion ▼

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

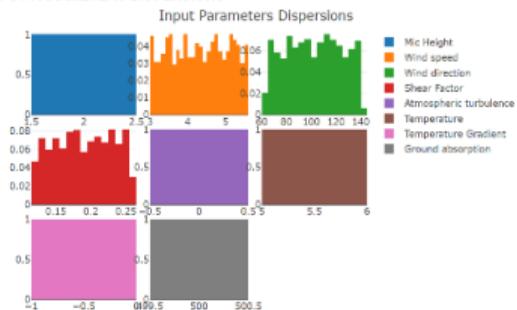
 Dispersion ▼



Propagation d'incertitudes - présentation de *WindTune*

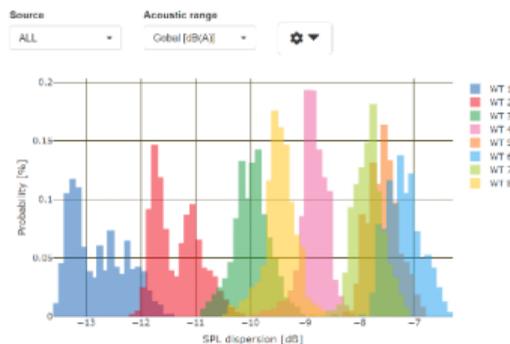
Welcome Geometry Input statistics Results Tutorial Read Me

INPUT PARAMETERS DISPERSIONS



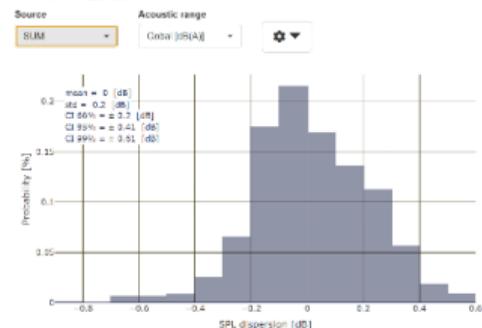
Welcome Geometry Input statistics Results Tutorial Read Me

ACOUSTIC RESULTS



Welcome Geometry Input statistics Results Tutorial Read Me

ACOUSTIC RESULTS



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