

INTRODUCTION DES INCERTITUDES DANS LES ÉTUDES D'INGÉNIERIE ACOUSTIQUE

Jean Ripolles, Thibaud Thénint, Isabelle Schmich-Yamane
EDF DTG



CONFIDENTIALITÉ



Chaque salarié s'engage à traiter de façon responsable les informations qu'il détient dans le cadre de son travail et respecter les règles de sécurité et de confidentialité, en particulier concernant les données sensibles.

CHARTRE ÉTHIQUE GROUPE



- ☒ ▪ Accessibilité libre
- ☐ ▪ Accessibilité interne limitée au Groupe EDF ou à certaines de ses composantes
- ☐ ▪ Accessibilité restreinte à des personnes ou fonctions ayant à en connaître
- ☐ ▪ Accessibilité très limitée (confidentiel)

SOMMAIRE

1. OUTILS NUMÉRIQUES

CODE_TYMPAN

OUTIL DE CALCUL PARAMÉTRIQUE (OCP)

2. UTILISATION DE L'OCP SUR UN SITE ÉOLIEN

DESCRIPTION DU PROBLÈME ACOUSTIQUE

PROPAGATION DES INCERTITUDES

ANALYSE DE SENSIBILITÉ

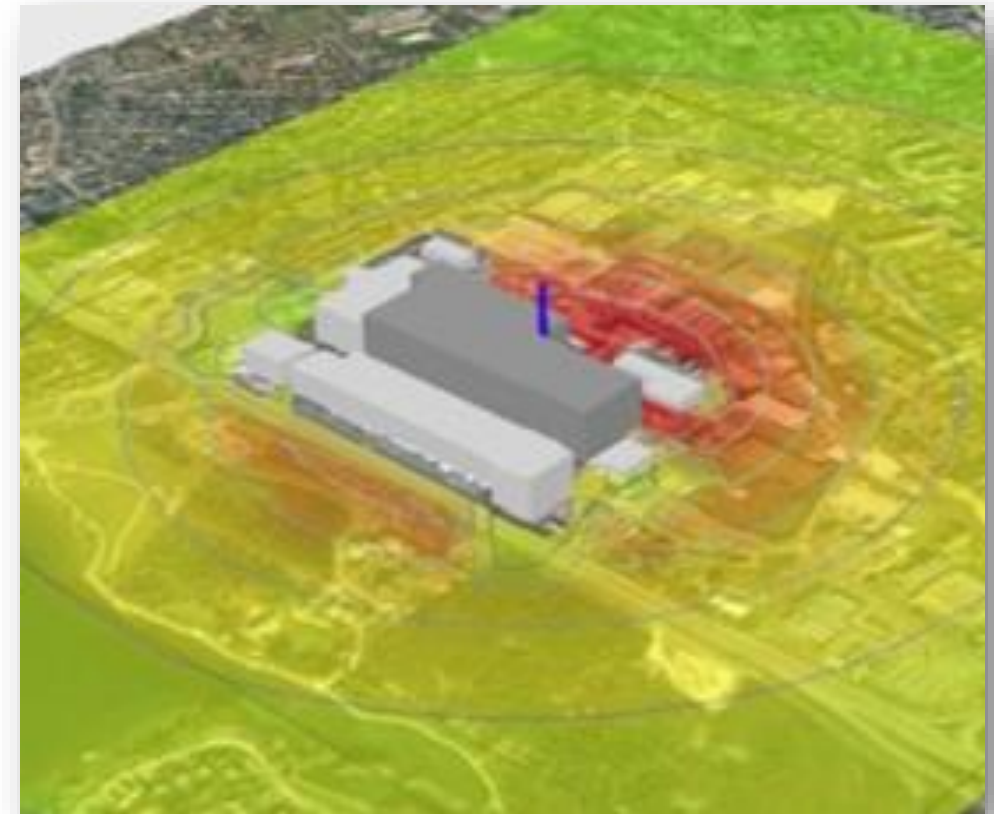
3. CONCLUSIONS



1. OUTILS NUMÉRIQUES: CODE_TYMPAN

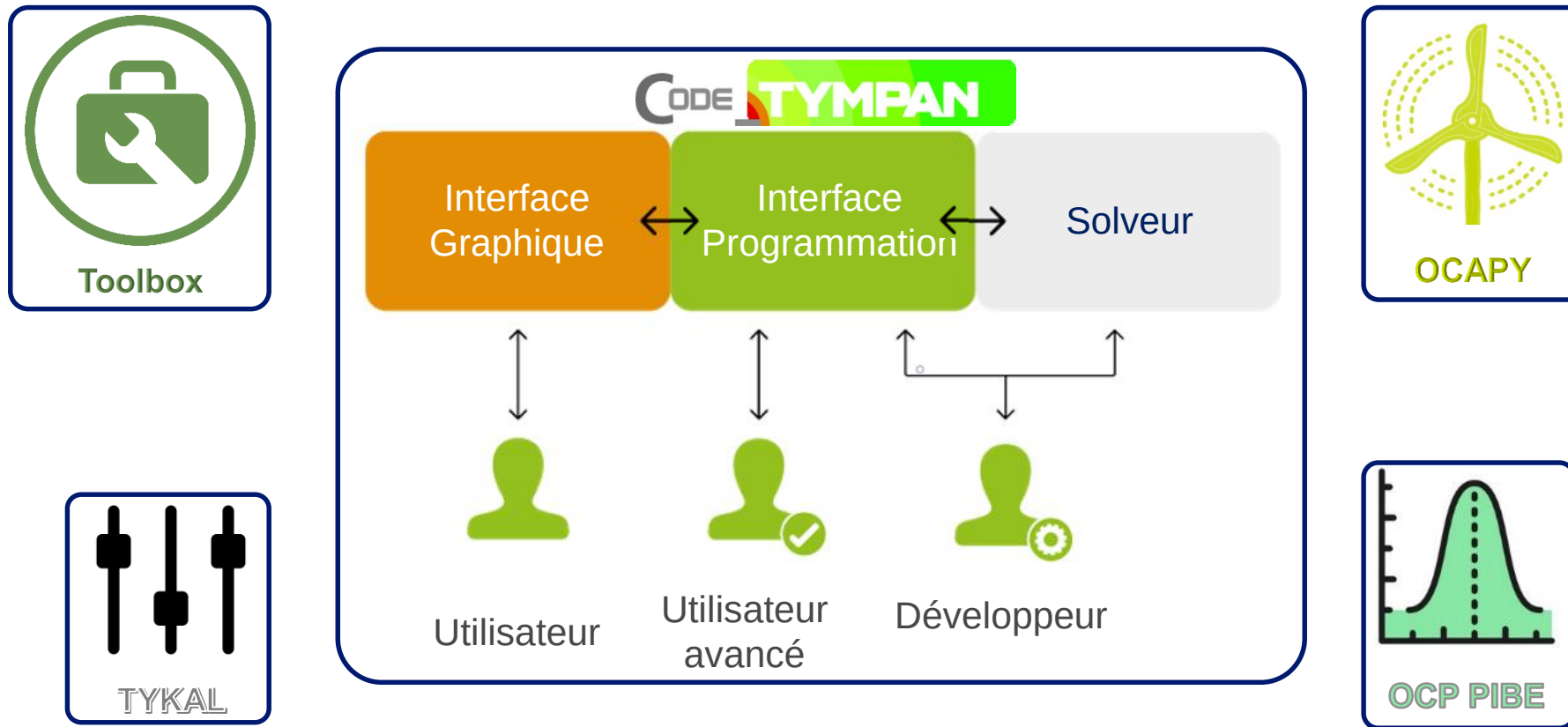


- Logiciel open-source de propagation acoustique dans des scènes 3D complexes permettant d'évaluer et de prédire l'impact acoustique des sources industrielles dans l'environnement
 - Solveur d'ingénierie
 - Propagation basée sur la norme ISO 9613-2
 - Atténuation atmosphérique conforme à la norme ISO 9613-1
 - Atténuation due à l'effet de sol basée sur un calcul d'impédance
 - Principaux usages
 - Évaluer la conformité réglementaire des installations industrielles
 - Bénéficier d'arguments techniques et d'une aide à la décision
 - Réduire les coûts d'insonorisation



1. OUTILS NUMÉRIQUES: ÉCOSYSTÈME CODE_TYMPAN

- Modules métier grâce à son architecture ouverte
 - Interface de programmation en Python



1. OUTILS NUMÉRIQUES: OUTIL DE CALCUL PARAMÉTRIQUE (OCP)

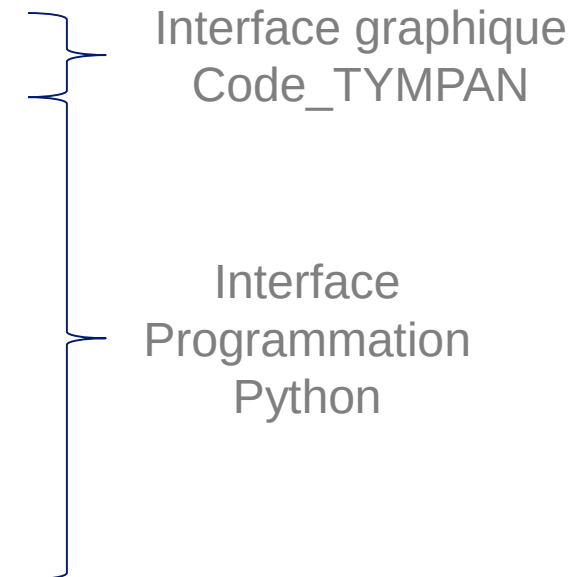
- Solution spécifique développée en Python (NumPy, SciPy et SALib)

- Deux modes:

- Propagation des incertitudes (basée sur des tirages Monte-Carlo)
 - Standard (valeurs des variables calculées selon les lois paramétrées)
 - Défini par l'utilisateur (valeurs des variables en entrée fournies par l'utilisateur)
- Analyse de sensibilité (basée sur les indices de Sobol et les séquences de Sobol)

- Étapes:

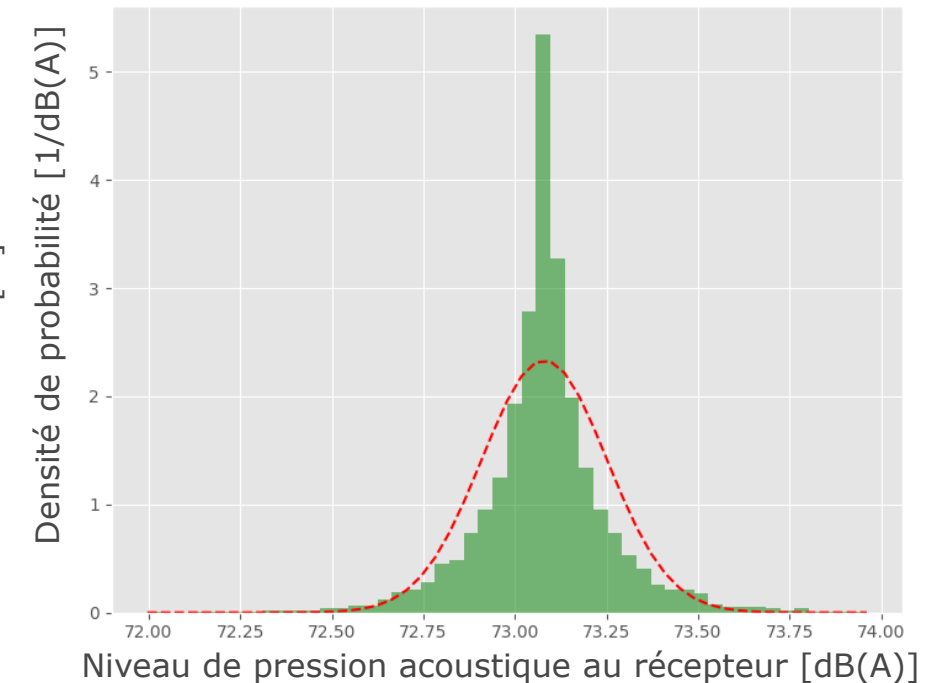
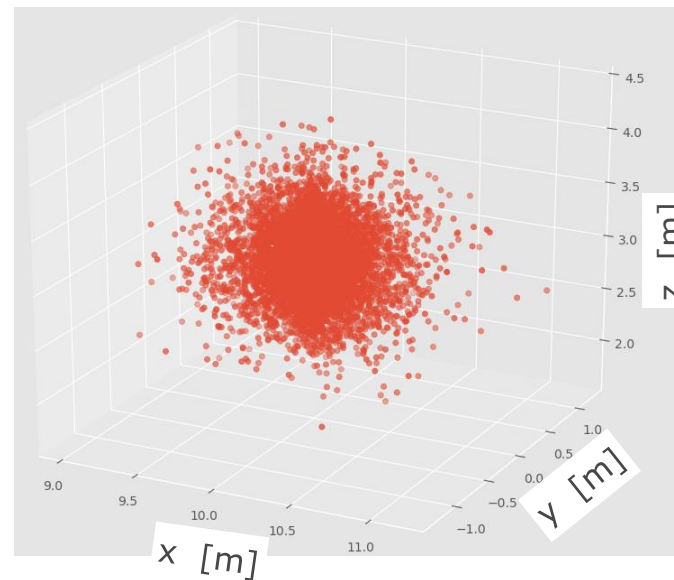
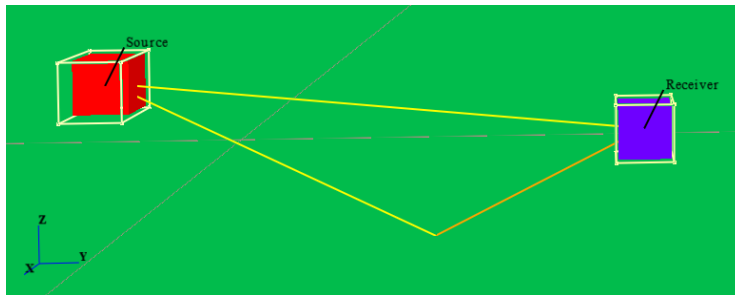
- Définition de la modélisation acoustique
- Choix du mode d'utilisation
- Sélection des variables d'entrée, avec lois de probabilité associées
- Choix du nombre d'échantillons
- Tirage aléatoire
- Résolution de chaque problème acoustique individuel
- Post-traitement des variables de sortie



1. OUTILS NUMÉRIQUES: OUTIL DE CALCUL PARAMÉTRIQUE (OCP)

■ Exemple de cas d'usage

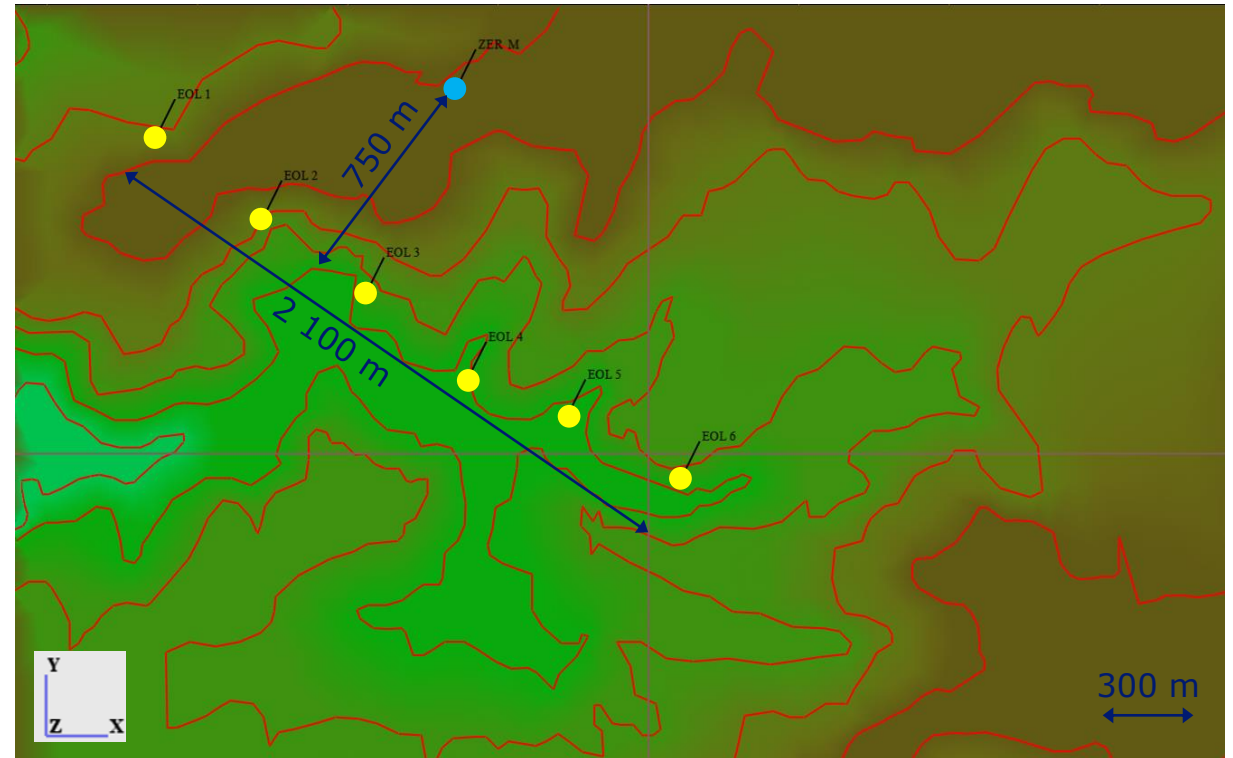
- Propagation d'incertitudes, 10 000 échantillons
- Source ponctuelle “mobile” autour de (10, 0, 3), loi demi-normale sur le rayon avec $\sigma = 0.4$
- Effet sur le niveau de pression acoustique d'un récepteur ponctuel situé à (10, 10, 2)



2. UTILISATION DE L'OCP: DESCRIPTION DU PROBLÈME ACOUSTIQUE

■ Modélisation du site éolien PIBE

- 6 éoliennes, modélisées comme des sources ponctuelles à une hauteur de moyeu de 80 m
- Le niveau de puissance acoustique dépend de la vitesse du vent
- Focus sur un récepteur
- Paramètres variables:
 - Vitesse du vent (niveau de puissance)
 - Température
 - Pression
 - Hygrométrie
 - Résistivité du sol au flux d'air

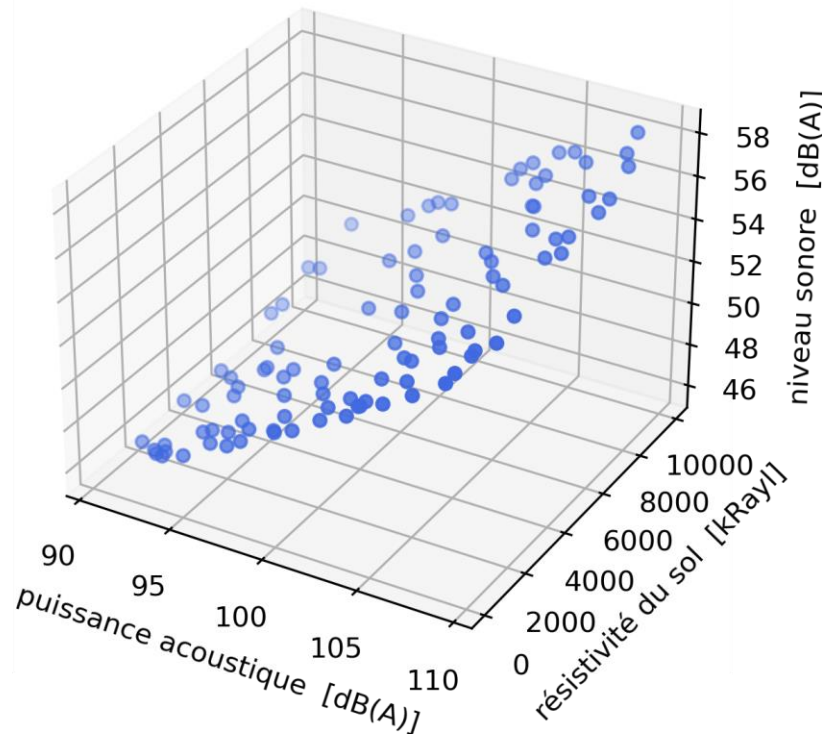


2. PRINCIPE DE LA PROPAGATION D'INCERTITUDES

■ Variation de paramètres d'un modèle et constat de la dispersion du résultat

□ Exemple fictif liant puissance d'une source, résistivité du sol et niveau sonore à un récepteur

- $Niveau\ sonore = 50 + \frac{1}{2}(Puissance - 100) + 3 \cdot \left(\frac{Résistivité}{10000}\right)^2 + \sqrt{\frac{Puissance}{100} \cdot \frac{Résistivité}{10000}}$
- La puissance varie entre 90 et 100 dB(A) ; la résistivité du sol entre 100 et 10 000 kRayl

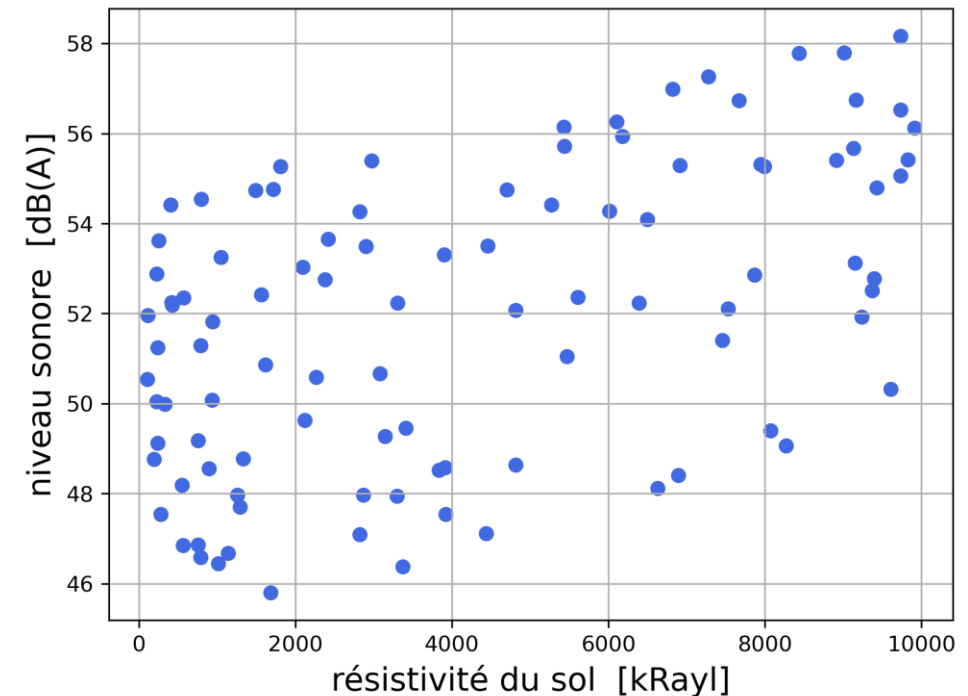
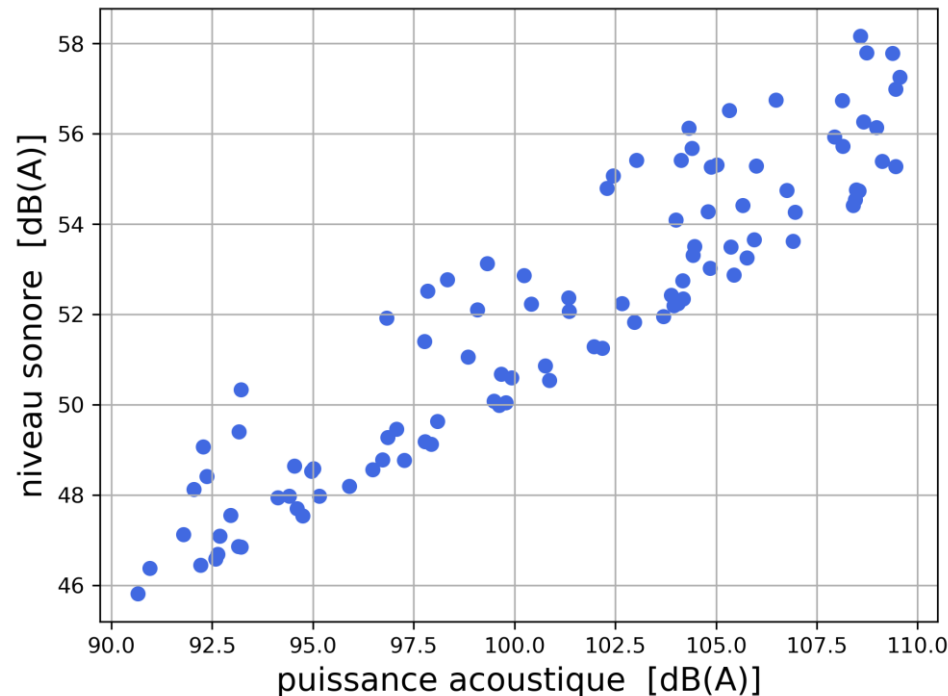


2. PRINCIPE DE LA PROPAGATION D'INCERTITUDES

■ Variation de paramètres d'un modèle et constat de la dispersion du résultat

□ Exemple fictif liant puissance d'une source, résistivité du sol et niveau sonore à un récepteur

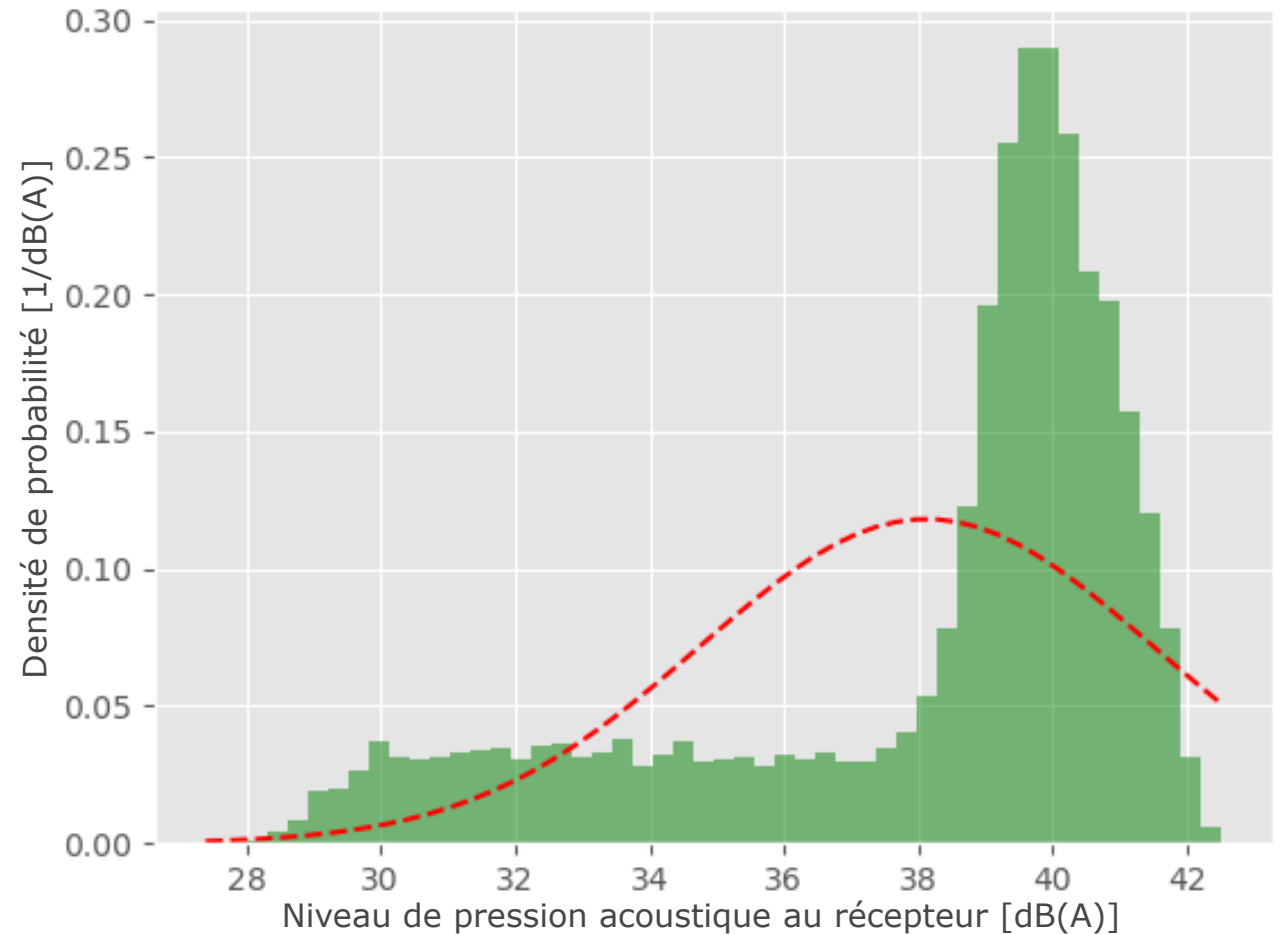
- $$\text{Niveau sonore} = 50 + \frac{1}{2}(\text{Puissance} - 100) + 3 \cdot \left(\frac{\text{Résistivité}}{10000}\right)^2 + \sqrt{\frac{\text{Puissance}}{100} \cdot \frac{\text{Résistivité}}{10000}}$$
- La puissance varie entre 90 et 100 dB(A) ; la résistivité du sol entre 100 et 10 000 kRayl



2. UTILISATION DE L'OCP: PROPAGATION DES INCERTITUDES

■ Cas avec variation de tous les paramètres

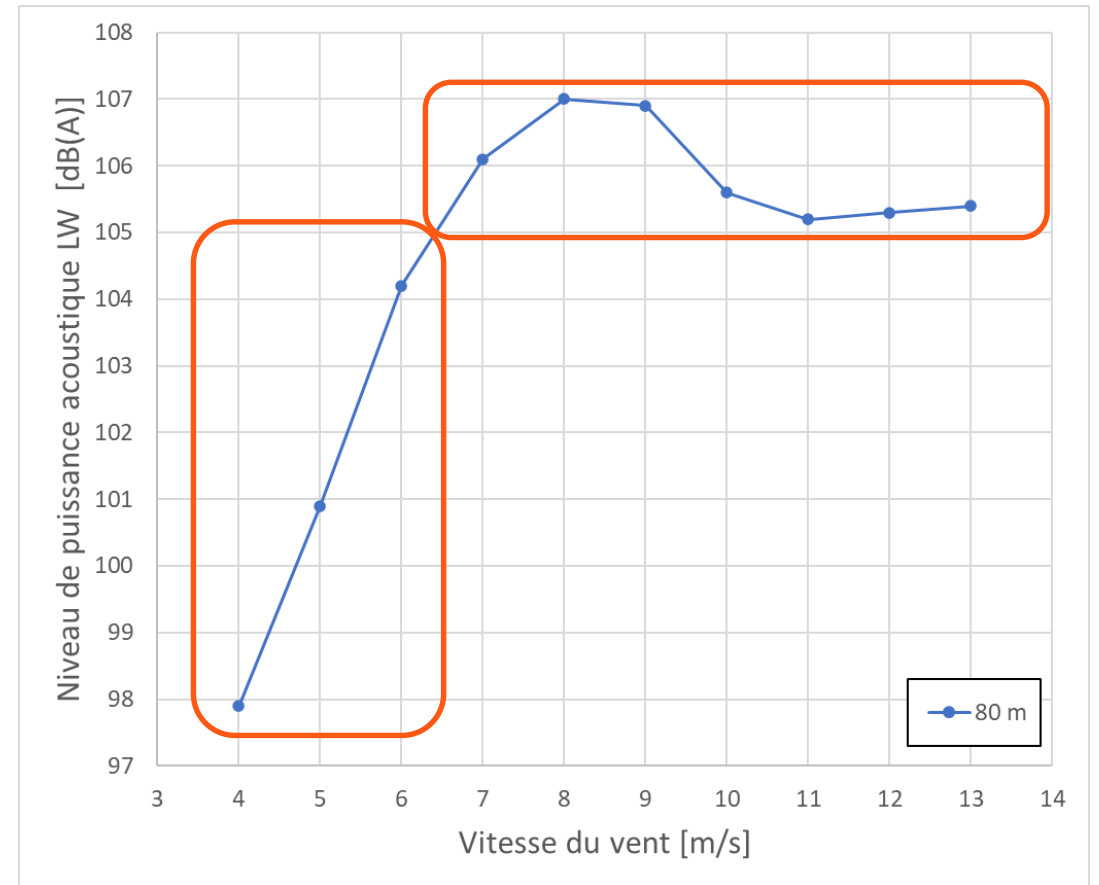
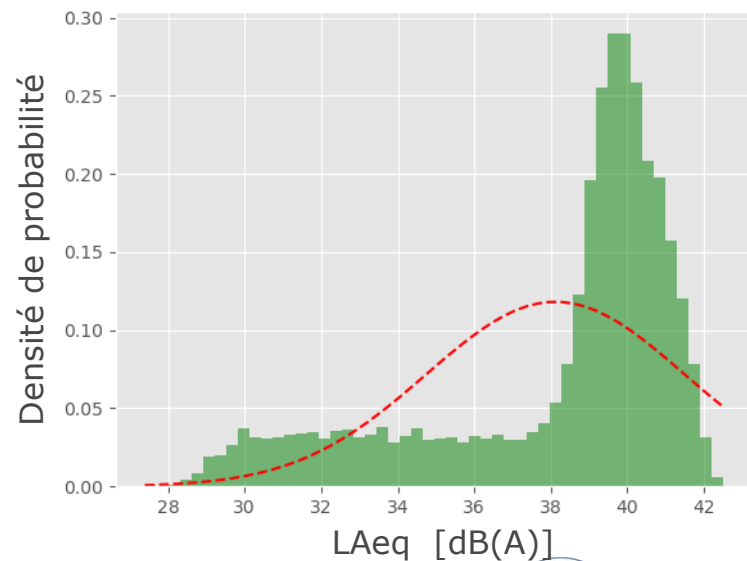
- 16 000 échantillons
- Temps écoulé ~ 2 heures sur PC
- Vitesse du vent
uniforme [4, 13] m/s
- Température
uniforme [0, 30] °C
- Pression
uniforme [970, 1 060] hPa
- Hygrométrie
uniforme [40, 100] %
- Résistivité du sol
log-normal (6.3, 2.3) kPa.s/m²



2. UTILISATION DE L'OCP: PROPAGATION DES INCERTITUDES

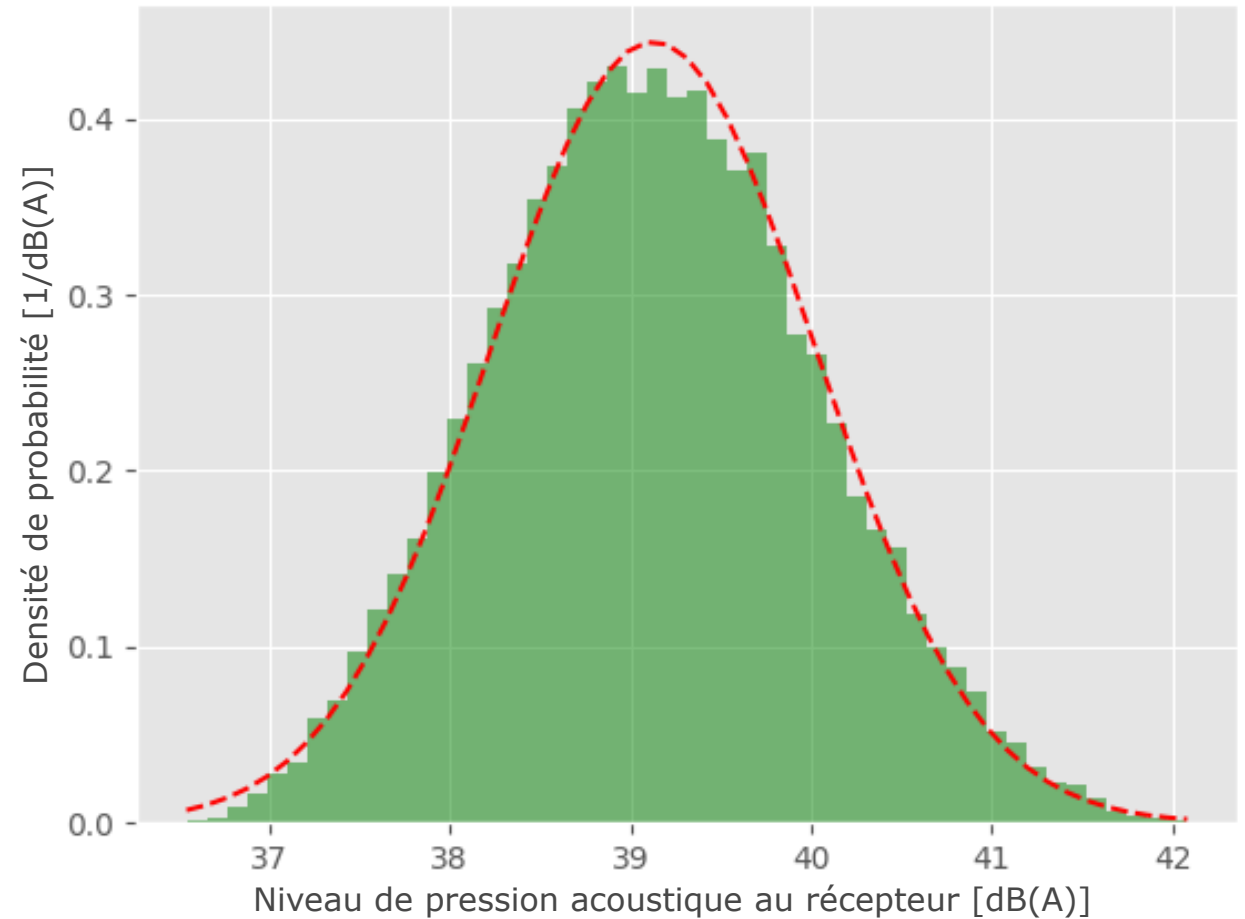
■ Cas avec variation de tous les paramètres

- Dispersion de 14 dB(A) environ
- ~70% des valeurs entre 38 and 42 Lp dB(A)
- Vitesse du vent: paramètre le plus influent ?
 - Dispersion de 9 dB(A)
 - 75% des valeurs entre 105 et 107 L_W dB(A)
 - 25% des valeurs entre 98 and 105 L_W dB(A)



2. UTILISATION DE L'OCP: PROPAGATION DES INCERTITUDES

- Variation moindre de la vitesse de vent
 - Vitesse du vent
uniforme [6, 7] m/s
 - Lois inchangées pour les autres paramètres
 - Moindre dispersion
écart type ~ 1 dB(A)
moyenne ~ 39 dB(A)
 - Une étude de sensibilité est nécessaire pour mieux comprendre l'influence de chaque paramètre



2. PRINCIPE DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ

- Remonter aux paramètres responsables de la dispersion d'un résultat, et si possible les hiérarchiser

- Exemple fictif liant puissance d'une source, résistivité du sol et niveau sonore à un récepteur

- $Niveau\ sonore = 50 + \frac{1}{2}(Puissance - 100) + 3 \cdot \left(\frac{Résistivité}{10000}\right)^2 + \sqrt{\frac{Puissance}{100} \cdot \frac{Résistivité}{10000}}$
- La puissance varie entre 90 et 100 dB(A) ; la résistivité du sol entre 100 et 10 000 kRayl

- Approche retenue : indices de Sobol

- Le résultat dépend-il d'une fonction de la Puissance seule ?
- Le résultat dépend-il d'une fonction de la Résistivité seule ?
- Le résultat dépend-il d'une fonction des deux variables Puissance et Résistivité ?

- $S_{Puissance} = 0.87$ $S_{Résistivité} = 0.11$ $S_{Puissance,Résistivité} = 0.02$
- Chaque indice est positif ou nul; leur somme est égale à 1.

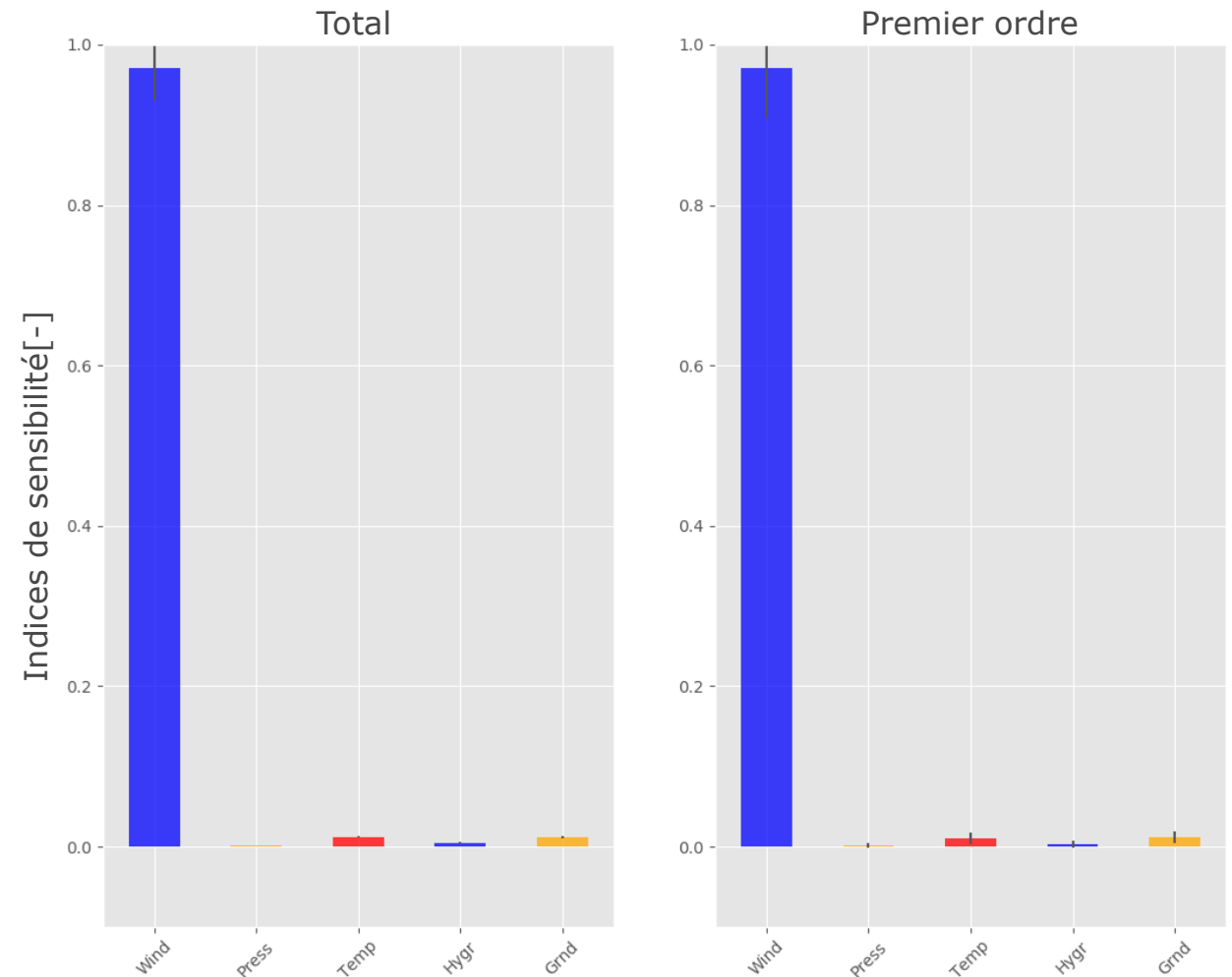
2. UTILISATION DE L'OCP: ANALYSE DE SENSIBILITÉ

■ Indices de Sobol:

- $0 \leq S_i \leq 1$
- Somme de tous les indices = 1
- Indique de quels paramètres dépend une sortie:
 - un seul paramètre? -> premier ordre
 - deux paramètres? -> second ordre
 - Plusieurs paramètres en interaction? -> total

■ Cas avec variation de tous les paramètres

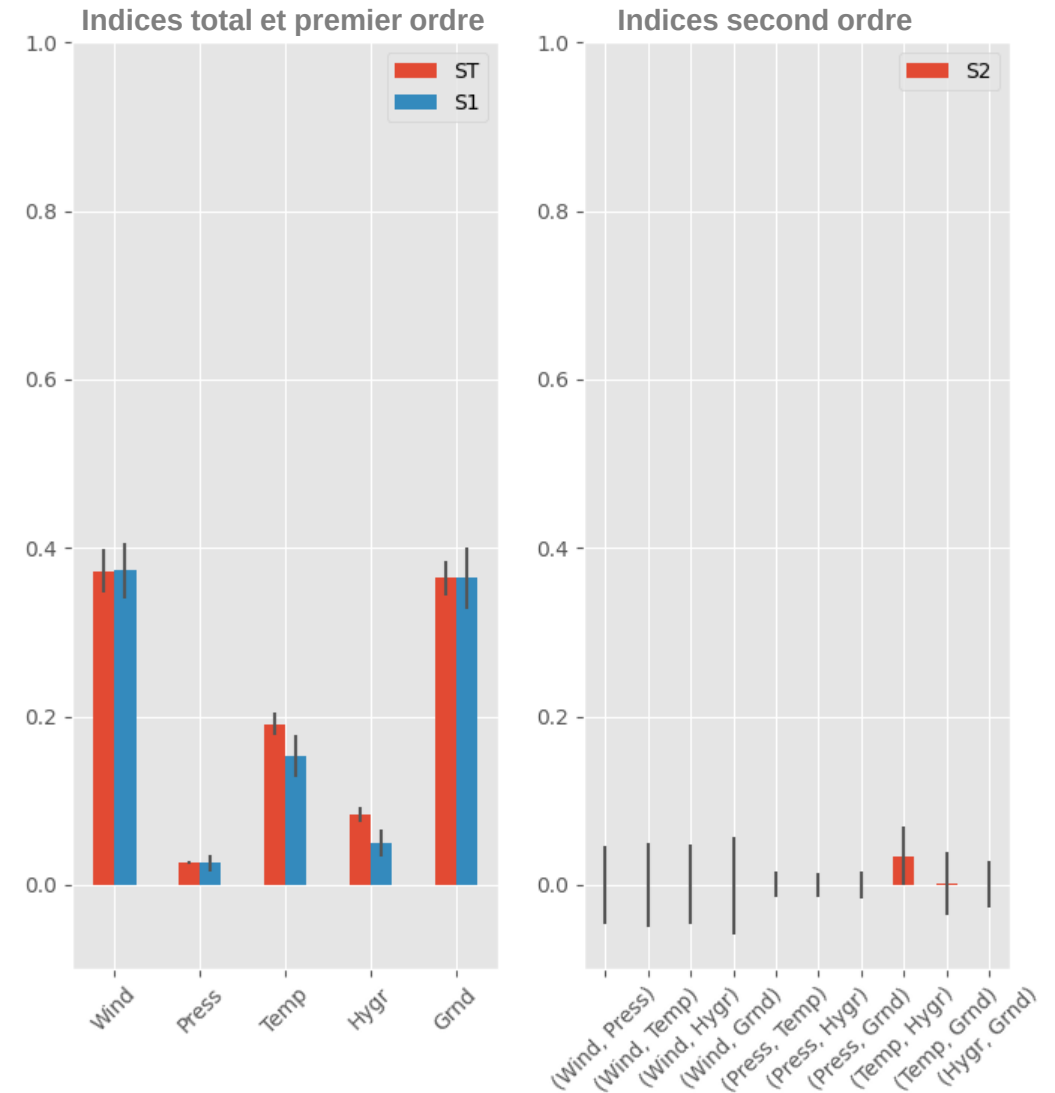
- >95% de la dispersion est due à la vitesse de vent



2. UTILISATION DE L'OCP: ANALYSE DE SENSIBILITÉ

■ Variation moindre de la vitesse de vent

- Plus de paramètres sont influents
- La vitesse de vent et la résistivité du sol ont la même influence (~ 0.35)
- La température a une influence non-négligeable
- La plupart des indices de premier ordre sont égaux aux indices totaux => influence "directe" du paramètre
- Légère influence de la paire (Temp, Hygr)
=> cohérent avec l'atténuation atmosphérique de l'ISO 9613-1



3. CONCLUSIONS

- **Outil de calcul paramétrique développé autour de l'architecture ouverte de Code_TYMPAN**
- **Cet outil (OCP) est fonctionnel et open-source**
- **Son application au site éolien de PIBE fournit des résultats éclairants**
- **L'analyse de sensibilité et la propagation des incertitudes se complètent**
 - Quels paramètres sont influents, en fonction de leurs plages ?
 - Quelle est la dispersion des résultats ?
- **Cet outil peut bénéficier de retours**
 - Des volontaires ?
 - Application prévue cette année sur la conception d'un site avec trois turbines à combustion

Merci

- **Projet PIBE**

- <https://www.anr-pibe.com/en>

- **Code_TYMPAN**

- <https://sourceforge.net/projects/code-tympan/>
- https://gitlab.com/tympan/code_tympan/-/boards

- **OCP**

- https://gitlab.com/tympan/ocp_pibe/-/tree/master?ref_type=heads
- https://gitlab.com/tympan/ocp_pibe/-/boards

Sound Power Level at Hub Height: Noise Mode 0			
Conditions for Sound Power Level:		Measurement Standard IEC 61400-11 ed. 2 2002	
		Wind Shear: 0.16	
		Maximum Turbulence at 10 Metre Height: 16%	
		Inflow Angle (Vertical): 0 ±2°	
		Air Density: 1.225 kg/m ³	
Hub Height	65 m	80 m	105 m
L _{WA} @ 4 m/s (10 m above ground) [dBA]	97.7	97.9	98.2
Wind speed at hub height [m/s]	5.4	5.6	5.7
L _{WA} @ 5 m/s (10 m above ground) [dBA]	100.4	100.9	101.6
Wind speed at hub height [m/s]	6.7	7.0	7.2
L _{WA} @ 6 m/s (10 m above ground) [dBA]	102.6	104.2	105.0
Wind speed at hub height [m/s]	8.1	8.4	8.6
L _{WA} @ 7 m/s (10 m above ground) [dBA]	102.7	106.1	106.4
Wind speed at hub height [m/s]	9.4	9.8	10.0
L _{WA} @ 8 m/s (10 m above ground) [dBA]	102.9	107.0	107.0
Wind speed at hub height [m/s]	10.8	11.1	11.5
L _{WA} @ 9 m/s (10 m above ground) [dBA]	103.0	106.9	106.7
Wind speed at hub height [m/s]	12.1	12.6	12.9
L _{WA} @ 10 m/s (10 m above ground) [dBA]	103.5	105.6	105.3
Wind speed at hub height [m/s]	13.5	13.9	14.3
L _{WA} @ 11 m/s (10 m above ground) [dBA]	103.7	105.2	105.2
Wind speed at hub height [m/s]	14.8	15.3	15.8
L _{WA} @ 12 m/s (10 m above ground) [dBA]	105.0	105.3	105.4
Wind speed at hub height [m/s]	16.2	16.7	17.2
L _{WA} @ 13 m/s (10 m above ground) [dBA]	105.0	105.4	105.5
Wind speed at hub height [m/s]	17.5	18.1	18.6

Table 12-15: Noise curve, noise mode 0

