

Estimation des incertitudes du bruit avion dans l'environnement et application à la certification acoustique des aéronefs

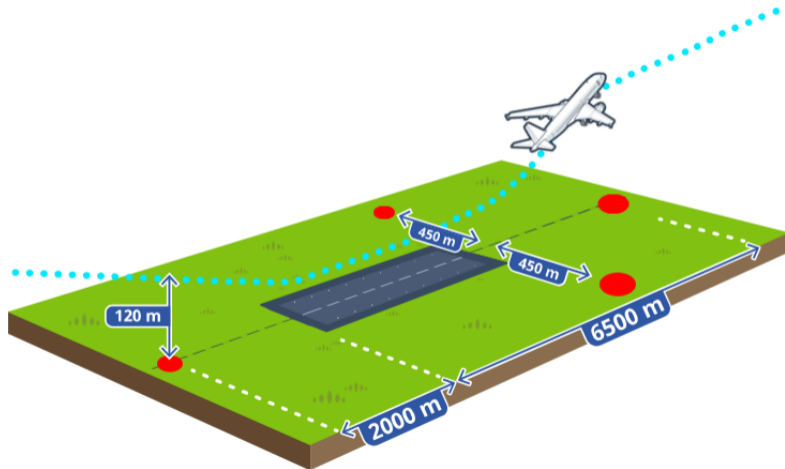
Jérémie Muzet, Bill Kayser

bill.kayser@cerema.fr — Juin 2026



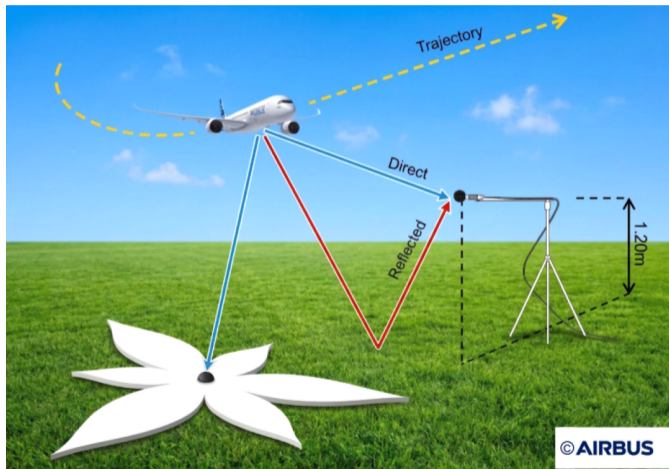
1. Introduction

certification acoustique des aéronefs



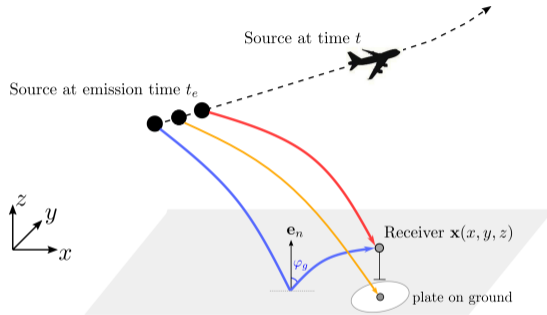
1. Introduction

certification acoustique des avions - mesure standard vs mesure au sol



1. Introduction

certification acoustique des aéronefs - mesure standard vs mesure au sol



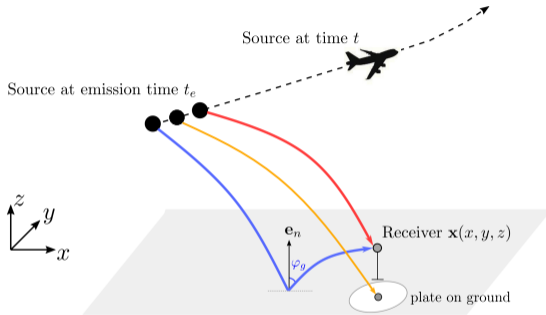
Effet de mouvement : effet Doppler et amplification convective

Effet de sol : figures interférentielles

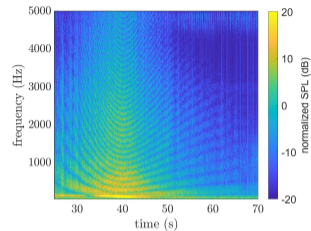
Effets météo : réfraction et diffusion

1. Introduction

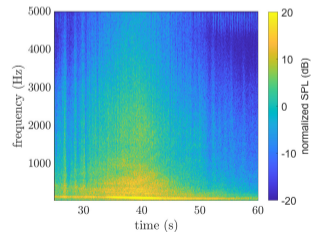
certification acoustique des aéronefs - mesure standard vs mesure au sol



micro sur pied



micro au sol



Effet de mouvement : effet Doppler et amplification convective

Effet de sol : figures interférentielles

Effets météo : réfraction et diffusion

1. Introduction

Objectifs de ce travail

Contexte général

- ▶ La mesure du bruit avion en condition standardisée doit être représentative.

Problématique

- ▶ Variabilité très grande des niveaux sonores : effet météo, effet de sol, effet de mouvement.

Objectif

- ▶ Quantifier ces intertitudes via une étude numérique.

Table des matières

2. Analyse de sensibilité

3. Analyse d'incertitude

4. Conclusion et Perspectives

Table des matières

2. Analyse de sensibilité

3. Analyse d'incertitude

4. Conclusion et Perspectives

2. Analyse de sensibilité

Modèle tir de rayons

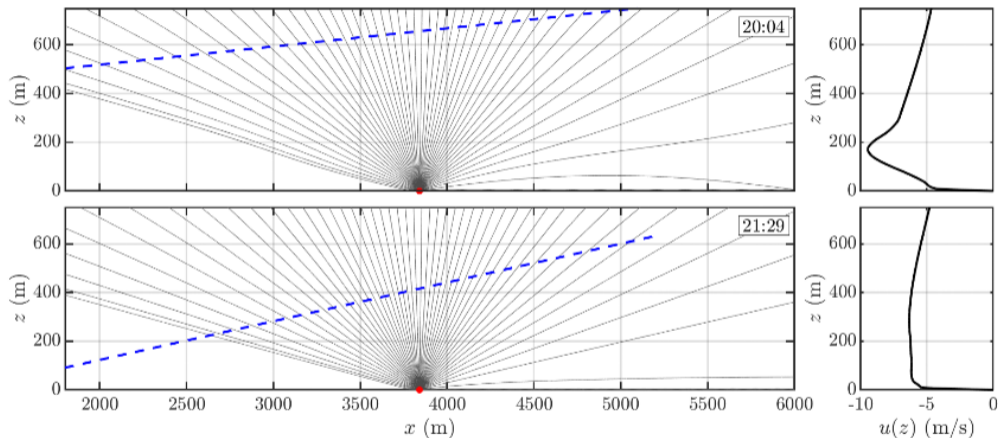


Figure – Exemple de tir de rayons pour 2 profils de vent différents.

2. Analyse de sensibilité

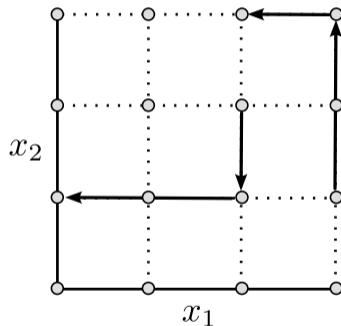
Les paramètres du modèle

Paramètre	Description	valeur min	valeur max
<i>Effet de sol</i>			
σ ($\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}$)	Resistivité	50	5000
e (m)	Épaisseur du sol	0	0.05
Ω	Porosité du sol	0.1	0.9
<i>Effet de l'atmosphère</i>			
u^* (m/s)	Vitesse de friction	0	1
θ ($^\circ$)	Angle de propagation	0	180
A_c	Coefficient du gradient thermique	-1	2
T_0 ($^\circ\text{C}$)	Température à la surface	0	30
h_r (%)	Humidité de l'air	40	100

2. Analyse de sensibilité

Méthode de Morris

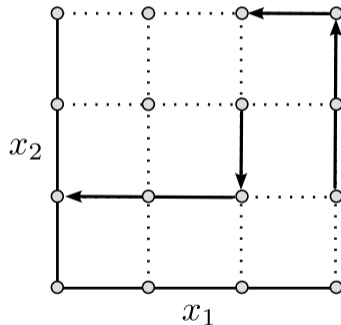
- ▶ **Objectif d'une AS** : hiérarchiser les paramètres influents.
- ▶ **Méthode de Morris** : calcul d'effets élémentaires EE le long de trajectoires aléatoires n .
- ▶ Influence d'un paramètre - "moyenne"
$$\mu^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |EE_i|$$
- ▶ Interactions et non-linéarités - "ecart-type"
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EE_i - \mu)^2}$$



2. Analyse de sensibilité

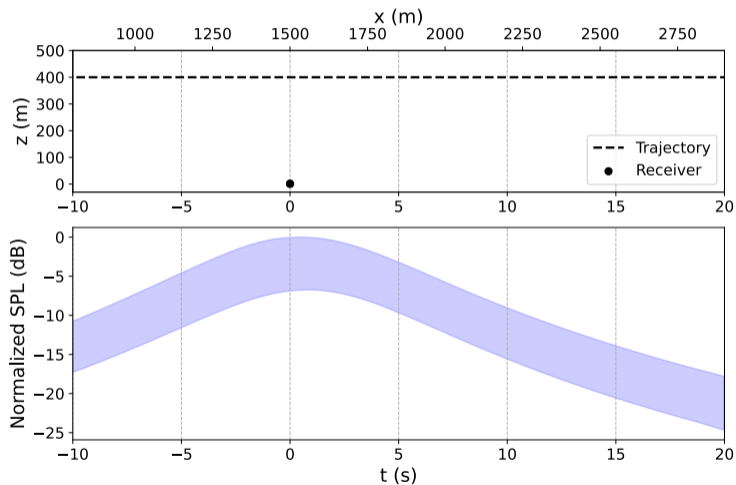
Méthode de Morris

- ▶ **Objectif d'une AS** : hiérarchiser les paramètres influents.
- ▶ **Méthode de Morris** : calcul d'effets élémentaires EE le long de trajectoires aléatoires n .
- ▶ Influence d'un paramètre - "moyenne"
$$\mu^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |EE_i|$$
- ▶ Interactions et non-linéarités - "ecart-type"
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EE_i - \mu)^2}$$



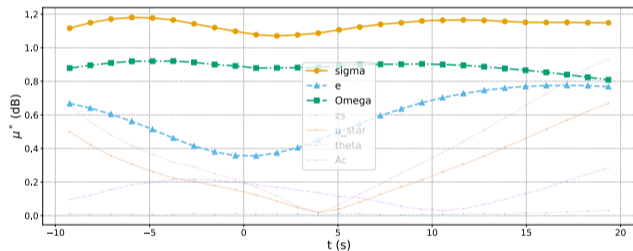
2. Analyse de sensibilité

Cas d'étude - 100 calculs lors de l'analyse



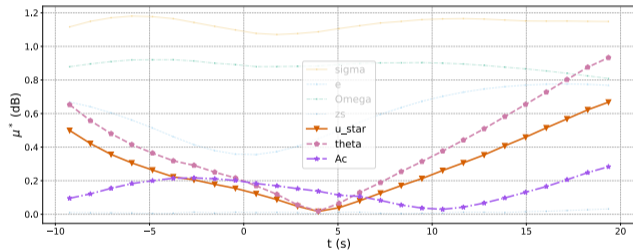
2. Analyse de sensibilité

effet de sol



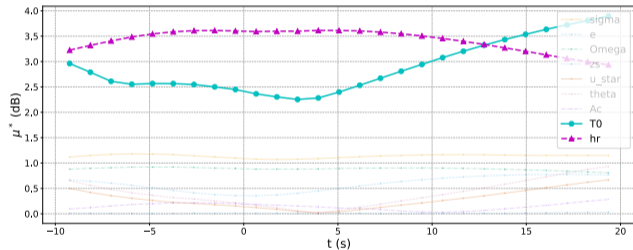
- ▶ Paramètre le plus influent : résistivité de l'air du sol σ , devant la porosité Ω et l'épaisseur e .
- ▶ Évolution temporelle lisse des indices μ^* , liée à la variation de la géométrie source–récepteur.
- ▶ Influence des paramètres de sol non négligeable, avec un classement stable dans le temps.

2. Analyse de sensibilité effet de refraction atmosphérique



- ▶ Réfraction dominée par u_star et $theta$.
- ▶ Effet négligeable près de la source, croît avec la distance.

2. Analyse de sensibilité effet d'absorption atmosphérique



- Influence élevée de l'absorption atmosphérique pour la plage fréquentielle de l'analyse $f \in [50; 5000]$ Hz.

2. Analyse de sensibilité

Conclusion intermédiaire

- ▶ Le modèle reproduit les mécanismes physiques attendus : effets de sol, réfraction atmosphérique et absorption fréquentielle.
 - ▶ La sensibilité dépend fortement de la géométrie et de la fréquence :
 - variabilité faible au droit de l'avion (incidence quasi normale),
 - effets de sol persistants sur toute la trajectoire.
- Aucun paramètre ne peut être écarté.

Table des matières

2. Analyse de sensibilité

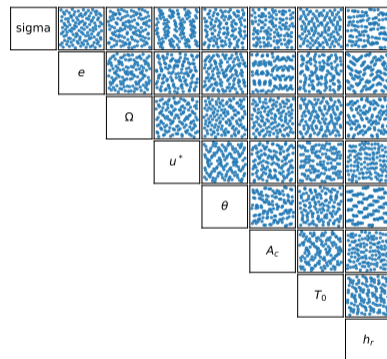
3. Analyse d'incertitude

4. Conclusion et Perspectives

3. Analyse d'incertitude

Principe et séquence de Sobol

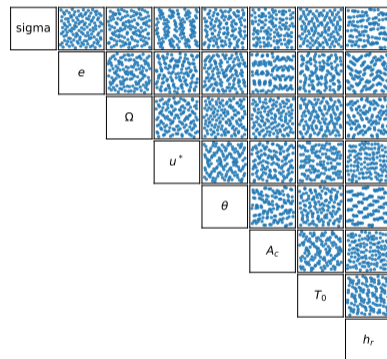
- ▶ **Objectif** : quantifier l'incertitude des SPL induite par les variations des paramètres environnementaux.
- ▶ Les calculs sont déterminés par une séquence de Sobol (ici 3000 points).
- ▶ Comparaison des deux protocoles de mesure afin de déterminer le plus robuste :
 - microphone au sol ;
 - microphone à 1.2 m.



3. Analyse d'incertitude

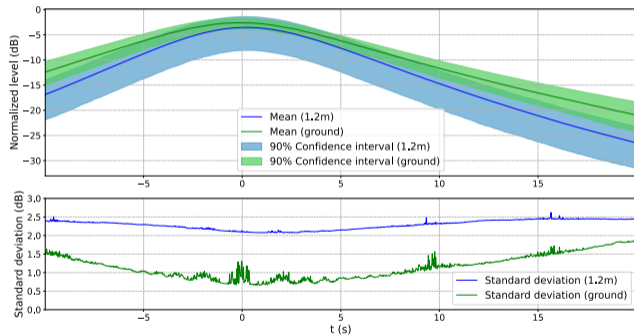
Principe et séquence de Sobol

- ▶ **Objectif** : quantifier l'incertitude des SPL induite par les variations des paramètres environnementaux.
- ▶ Les calculs sont déterminés par une séquence de Sobol (ici 3000 points).
- ▶ Comparaison des deux protocoles de mesure afin de déterminer le plus robuste :
 - microphone au sol ;
 - microphone à 1.2 m.



3. Analyse d'incertitude

Niveau global : **indicateur PNL**



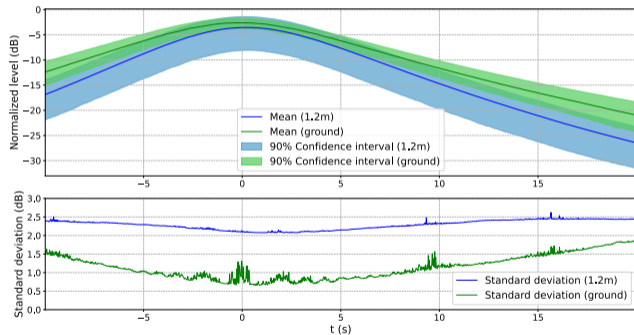
► Dispersion des PNL plus élevée à $z_r = 1.2$ m.

► Écart-type réduit pour le récepteur au sol.

→ Le récepteur au sol apparaît comme une configuration plus robuste pour l'évaluation du bruit avion.

3. Analyse d'incertitude

Niveau global : **indicateur PNL**



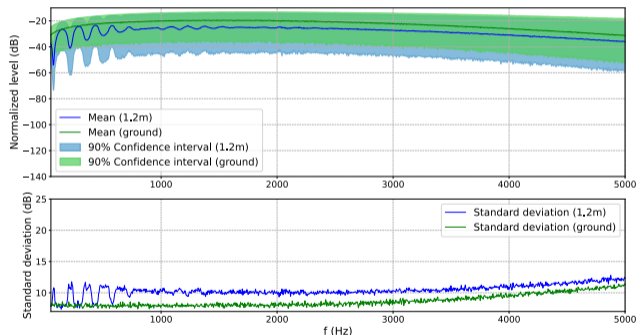
► Dispersion des PNL plus élevée à $z_r = 1.2$ m.

► Écart-type réduit pour le récepteur au sol.

→ Le récepteur au sol apparaît comme une configuration plus robuste pour l'évaluation du bruit avion.

3. Analyse d'incertitude

Analyse en fréquences

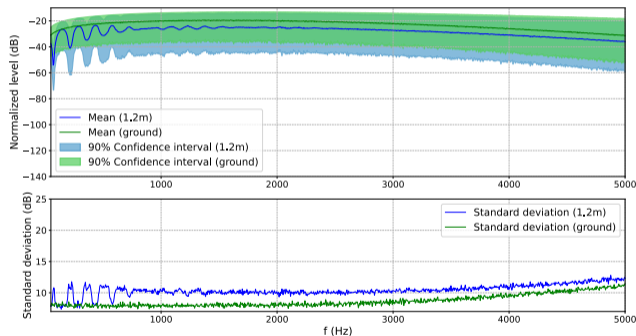


- ▶ Niveaux moyens plus élevés au sol ($\approx +3$ dB par rapport à $z_r = 1.2$ m).
- ▶ Variabilité nettement plus forte à $z_r = 1.2$ m, principalement aux basses fréquences (< 1 kHz).
- ▶ Les fluctuations sont dominées par les interférences entre onde directe et onde réfléchie.

→ La mesure au sol réduit les fluctuations spectrales liées aux effets d'interférence.

3. Analyse d'incertitude

Analyse en fréquences



- ▶ Niveaux moyens plus élevés au sol ($\approx +3$ dB par rapport à $z_r = 1.2$ m).
 - ▶ Variabilité nettement plus forte à $z_r = 1.2$ m, principalement aux basses fréquences (< 1 kHz).
 - ▶ Les fluctuations sont dominées par les interférences entre onde directe et onde réfléchie.
- La mesure au sol réduit les fluctuations spectrales liées aux effets d'interférence.

Table des matières

2. Analyse de sensibilité

3. Analyse d'incertitude

4. Conclusion et Perspectives

4. Conclusion et Perspectives

- ▶ Analyse de sensibilité + quantification d'incertitudes avec modèle de propagation par ray-tracing validé.
 - ▶ Principales sources de variabilité : effets de sol, réfraction atmosphérique, hauteur du récepteur.
 - ▶ Variabilité fortement liée aux phénomènes d'interférences et à la géométrie source-récepteur.
 - ▶ Impact direct sur les métriques de certification (PNL), surtout à $z_r = 1.2$ m.
- Réduire l'impact des interférences (plateformes de mesure au sol optimisées).
- Restreindre les conditions météorologiques pour limiter la variabilité atmosphérique.
- Extension du modèle : prise en compte de la turbulence atmosphérique.

4. Conclusion et Perspectives

- ▶ Analyse de sensibilité + quantification d'incertitudes avec modèle de propagation par ray-tracing validé.
 - ▶ Principales sources de variabilité : effets de sol, réfraction atmosphérique, hauteur du récepteur.
 - ▶ Variabilité fortement liée aux phénomènes d'interférences et à la géométrie source-récepteur.
 - ▶ Impact direct sur les métriques de certification (PNL), surtout à $z_r = 1.2$ m.
- Réduire l'impact des interférences (plateformes de mesure au sol optimisées).
- Restreindre les conditions météorologiques pour limiter la variabilité atmosphérique.
- Extension du modèle : prise en compte de la turbulence atmosphérique.