

Application d'un modèle de propagation pour un point source en mouvement dans une atmosphère inhomogène à la simulation du bruit avion

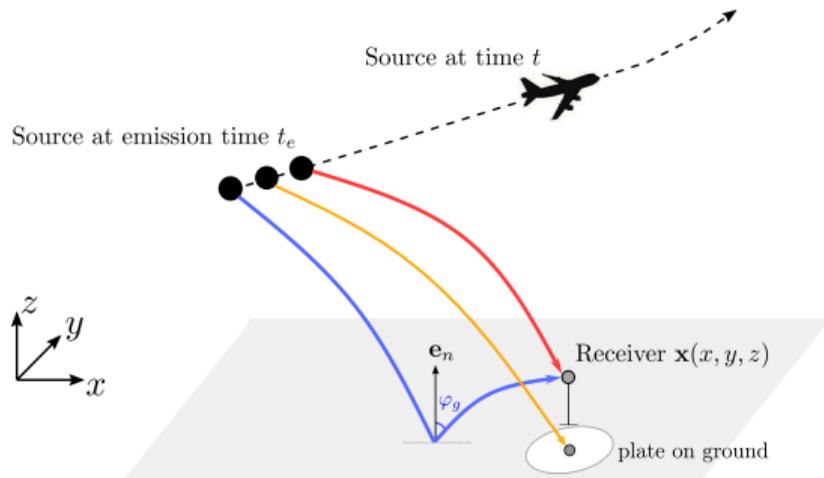
Bill Kayser, Didier Dragna

bill.kayser@cerema.fr



Introduction

cas d'étude

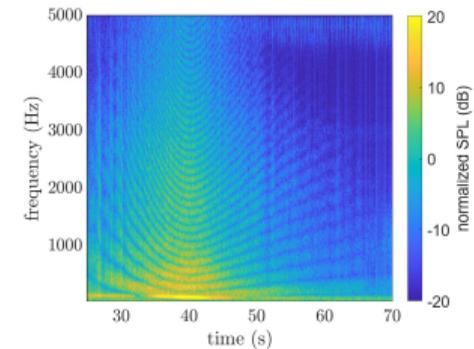


Source en mouvement : effet Doppler et amplification convective

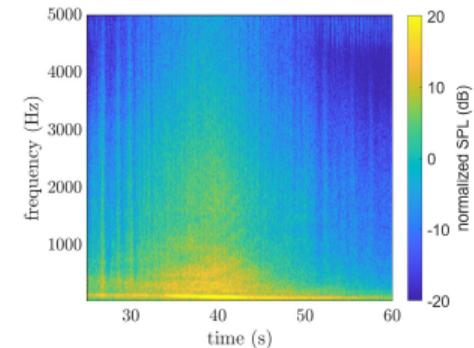
Effet de sol : figures interférentielles

Effets météo : réfraction et diffusion

1. micro sur pied



2. micro au sol



Introduction

Contexte général

- ▶ Prédire le bruit avion au niveau d'un récepteur sur trépied en condition standardisée.

Problématique

- ▶ Les effets de sol induisent des interférences et donc une variabilité sur les niveaux sonores.

Objectif

- ▶ Prendre en compte les effets de sol en appliquant une fonction de transfert calculée, à une mesure au sol.
- ▶ Développer un modèle de propagation qui prend en compte les effets de déplacement de la source et les effets de l'environnement.

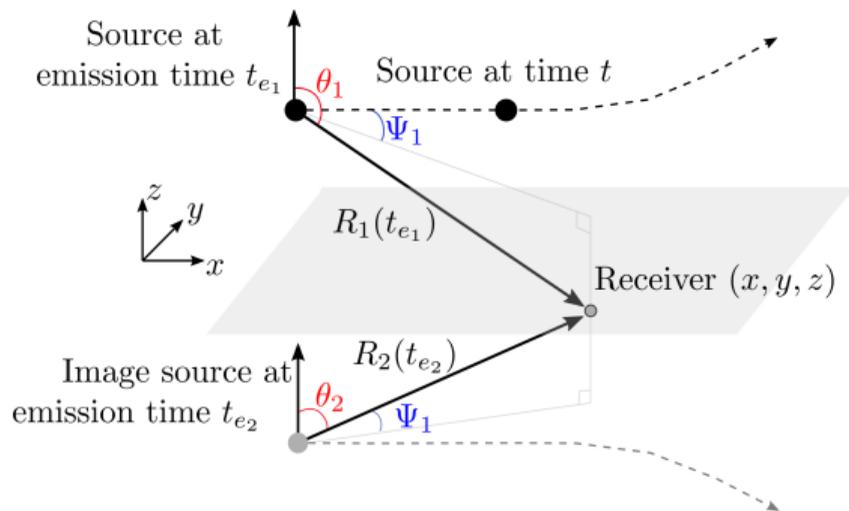
Sommaire

Formulations du champ acoustique généré par un monopôle en mouvement

Application au cas avion - comparaison aux mesures

Conclusion et perspective

Formulation en atmosphère homogène



Il faut considérer :

- ▶ le nombre de Mach M
- ▶ l'angle d'élévation θ
- ▶ l'angle d'azimuth Ψ
- ▶ les temps d'émission t_{e1} et t_{e2}

Figure – Schéma d'un point source en mouvement au dessus d'un sol

Formulation en atmosphère **homogène**

Formulation heuristique existante dans la littérature (Attenborough and Van Renterghem, 2021) :

$$p = e^{-i\omega_0 t} \left[\left(1 - M_{r_1} + i \frac{\dot{M}_{r_1}}{\omega_0} \right) \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1 (1 - M_{r_1})^3} + \left(1 - M_{r_2} + i \frac{\dot{M}_{r_2}}{\omega_0} \right) Q \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2 (1 - M_{r_2})^3} \right] \quad (1)$$

avec $M_{r_n} = \frac{R_n}{R_n} \cdot M$ la composante du nombre de Mach dans la direction source-récepteur,

et $\dot{M}_{r_n} = \frac{R_n}{R_n} \cdot \frac{dM}{dt}$ le terme d'accélération du nombre de Mach dans la direction source-récepteur,

et $Q(\omega_{e2})$ le coefficient d'onde sphérique évalué à la fréquence dopplérisée ω_{e2} .

Formulation en atmosphère hétérogène

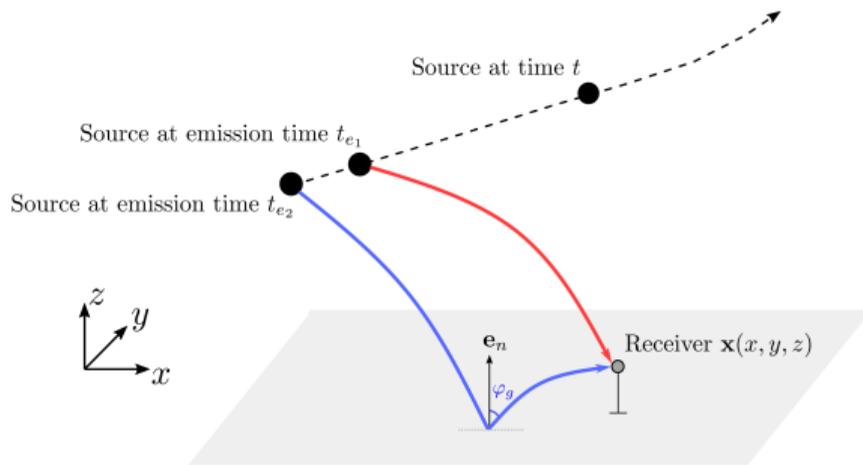


Figure – Schéma d'un point source en mouvement au dessus d'un sol en présence d'une atmosphère hétérogène.

cf (Kayser et al., 2024)
couplage du modèle
heuristique avec un modèle
rayon :

- ▶ A est le terme d'amplitude - effet propagatif et de convection
- ▶ $\tau = t - t_e$ est le temps de propagation
- ▶ φ_g est l'angle de reflexion du rayon sur le sol

$$p(x, t) = e^{-i\omega_0 t} [A_1 e^{i\omega_0 \tau_1} + QA_2 e^{i\omega_0 \tau_2}] \quad (2)$$

Formulation en atmosphère hétérogène

Les rayons sont déterminés en résolvant les équations suivantes (Candel, 1977 ; Scott et al., 2017 ; Pierce, 2019) :

$$\frac{dx_r}{dt_r} = c_0 n + V_0 \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt_r} = (q \cdot n)n - q \quad (4)$$

- condition initiale : $x_r(t_r = 0) = x_s(t_e)$

- condition "finale" : $x_r(t_r = \tau) = x$

- ▶ x_r : position du rayon,
- ▶ n : vecteur unitaire normal au front d'onde,
- ▶ t_r : temps de parcours du rayon,
- ▶ $q = \nabla c_0 + (\nabla V_0) \cdot n$: prise en compte du gradient de vitesse.
- ▶ A est déterminée par la conservation du flux d'énergie le long du rayon.

$$\boxed{p(x, t) = e^{-i\omega_0 t} [A_1 e^{i\omega_0 \tau_1} + QA_2 e^{i\omega_0 \tau_2}]} \quad (5)$$

Tir de rayons en atmosphère hétérogène

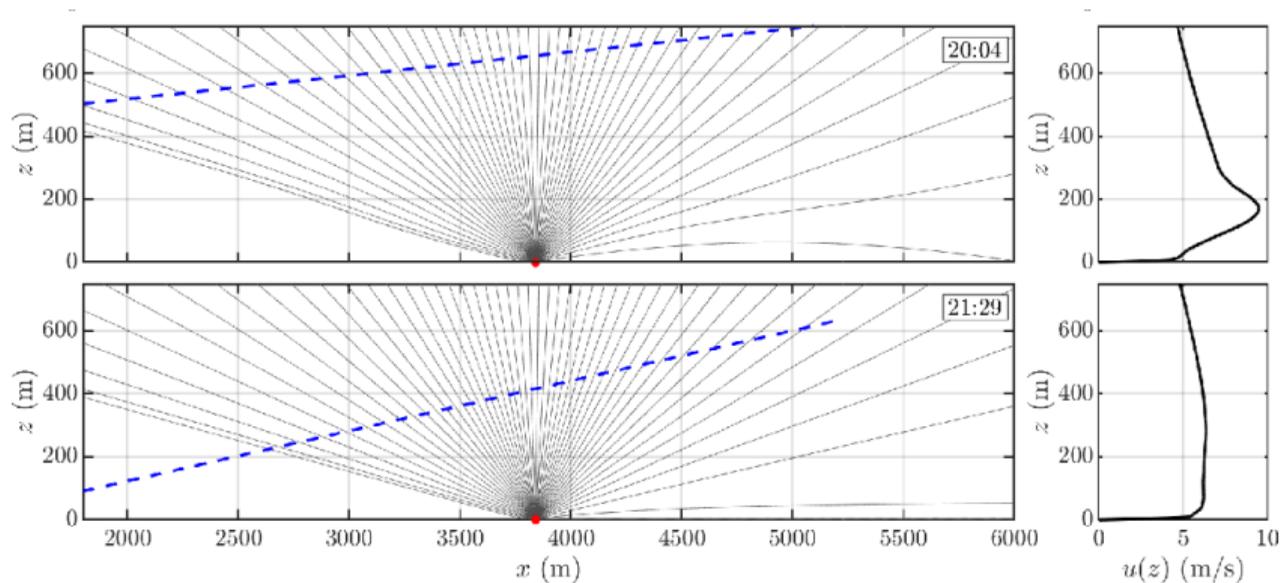


Figure – Exemple de tir de rayons pour 2 profils de vent différents.

Protocole expérimental



Données météo

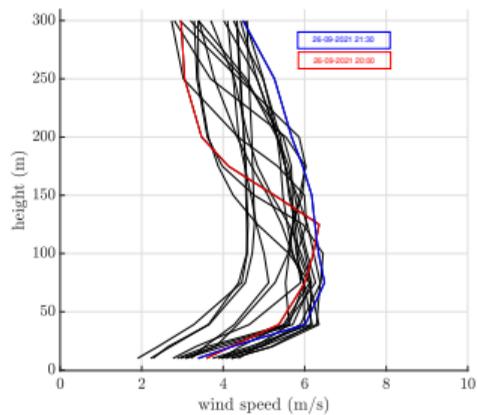


Figure – Profils verticaux de vent

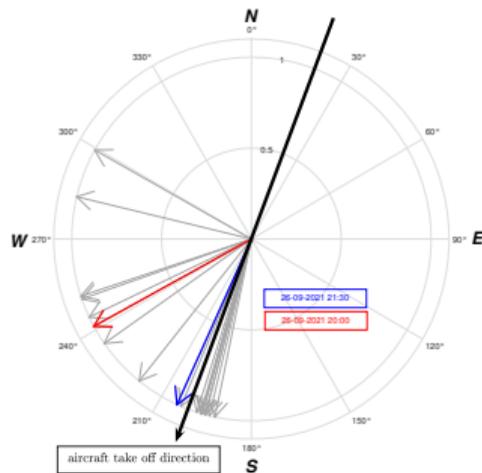


Figure – Direction du vent

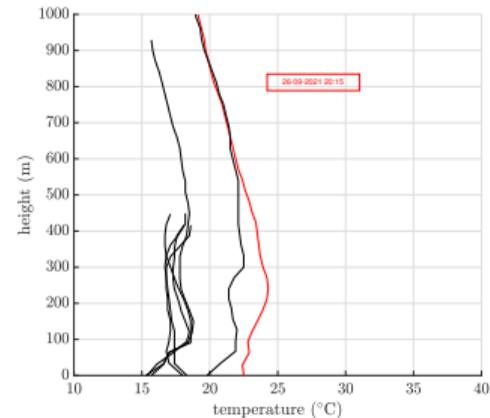
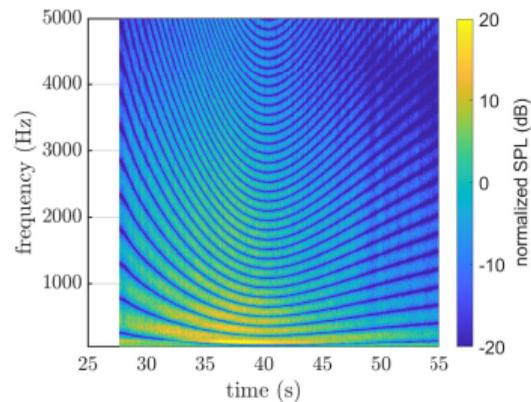
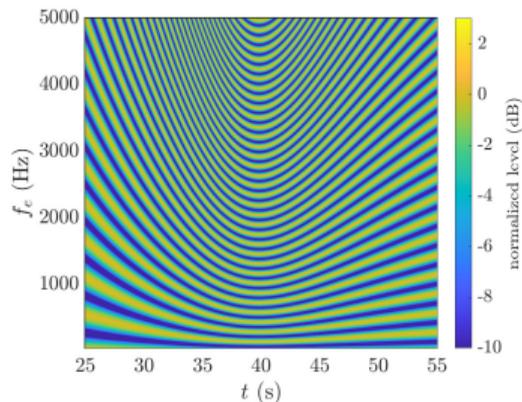
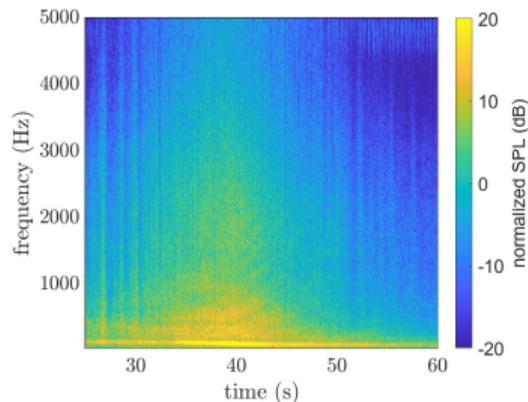


Figure – Profils verticaux de température

Comparaison aux mesures

calcul de fonction de transfert

→ Mesure au sol (sans interférence) + fonction de transfert modélisée = résultat final.



Comparaison aux mesures

Profil de vent avec inversion - mesures à 20h04

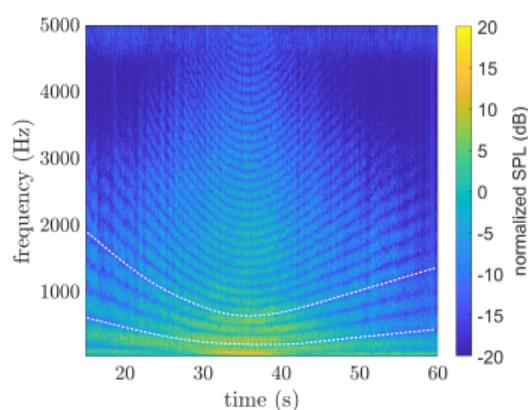


Figure – mesure de référence

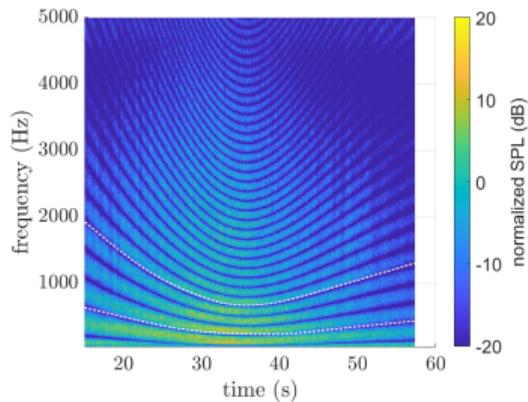


Figure – modèle rayon (effets météo et effets de sol)

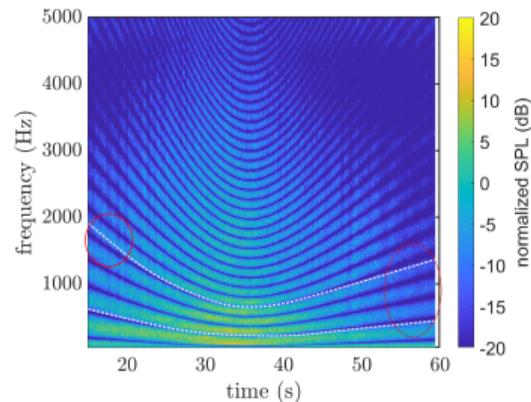


Figure – modèle heuristique (effets de sol uniquement)

Comparaison aux mesures

Profil de vent fort - mesures à 21h29

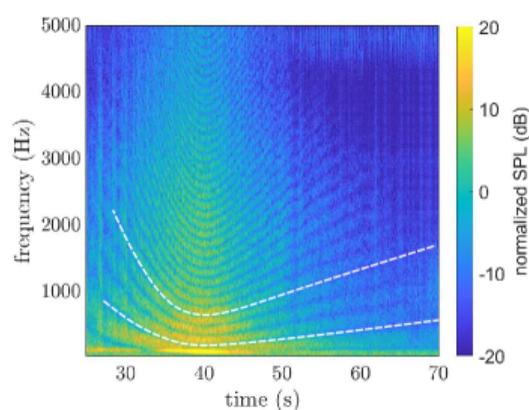


Figure – mesure de référence

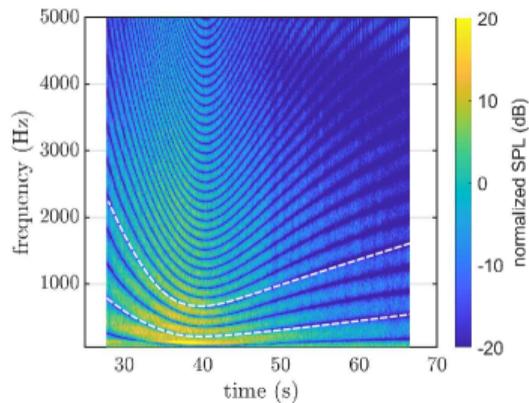


Figure – modèle rayon (effets météo et effets de sol)

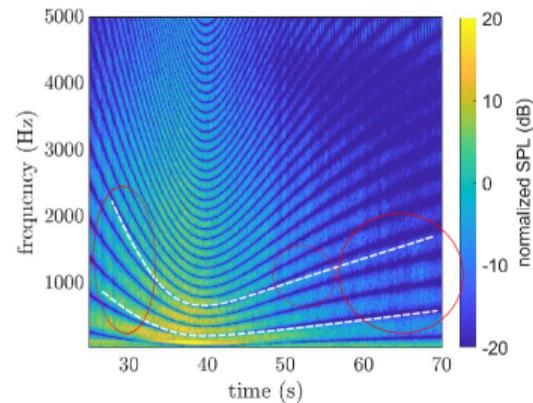
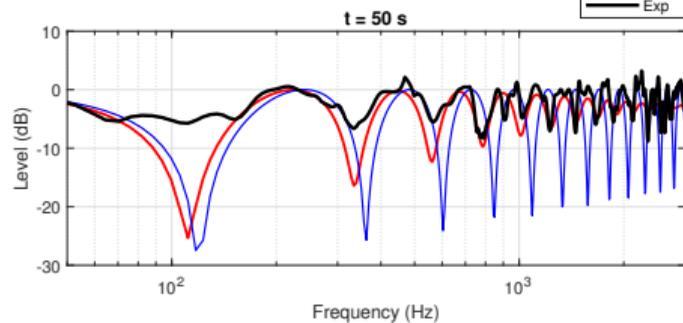
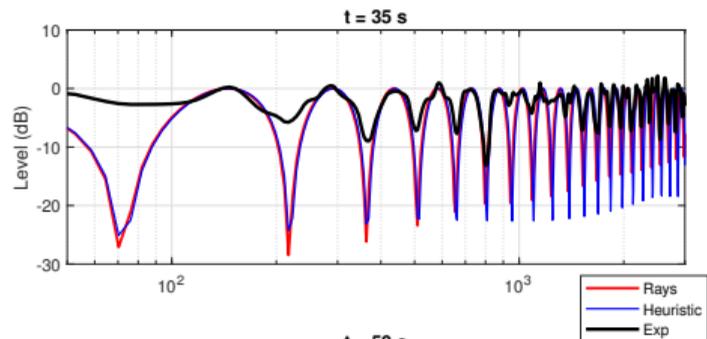


Figure – modèle heuristique (effets de sol uniquement)

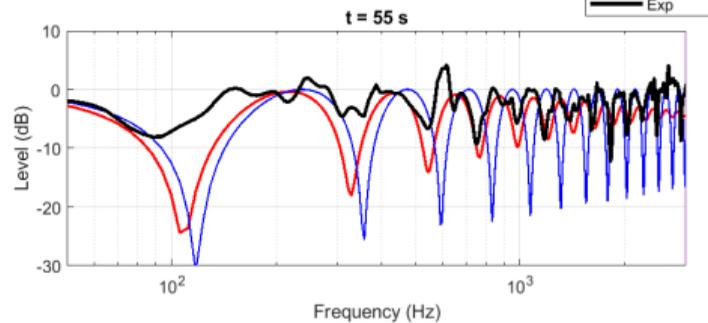
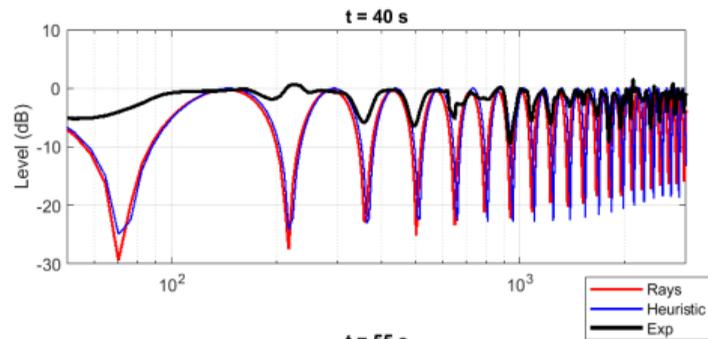
Comparaison aux mesures

Fonction de transfert à un instant donné

test-case 20h04



test-case 21h29



Conclusion

- ▶ Développement et validation d'un modèle rayon
- ▶ Le modèle rayon permet une meilleure prise en compte des figures interférentielles

Perspective

- ▶ Tester des cas 3D
- ▶ Utilisation du modèle pour de l'analyse de sensibilité
- ▶ **Limitation** : pas de propagation en zone d'ombre

Merci de votre attention