

# Modélisation heuristique pour l'estimation du bruit avion

JTAV juin 2023

B Kayser, D Dragna, P Blanc-Benon

bill.kayser@ec-lyon.fr



**AIRBUS**



- 1 Contexte
- 2 Source stationnaire
- 3 Source en mouvement rectiligne
- 4 Source en mouvement quelconque
- 5 Perspectives

# Table of Contents

- 1 Contexte
- 2 Source stationnaire
- 3 Source en mouvement rectiligne
- 4 Source en mouvement quelconque
- 5 Perspectives

# Contexte

Besoin de contrôler les incertitudes sur la prédiction du bruit avion :

- ▶ dès la phase de développement
- ▶ lors des mesures de certification
- ▶ lors d'études d'impact autour des aéroports

→ Développement d'un modèle analytique de prédiction du bruit, prenant en compte les effets de propagation (météo et sol) et le déplacement de la source.

# Contexte

Besoin de contrôler les incertitudes sur la prédiction du bruit avion :

- ▶ dès la phase de développement
- ▶ lors des mesures de certification
- ▶ lors d'études d'impact autour des aéroports

→ Développement d'un modèle analytique de prédiction du bruit, prenant en compte les effets de propagation (météo et sol) et le déplacement de la source.

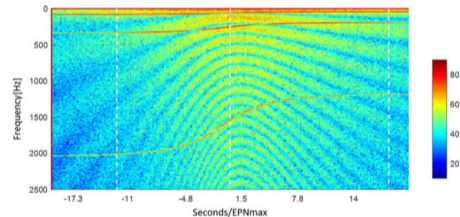
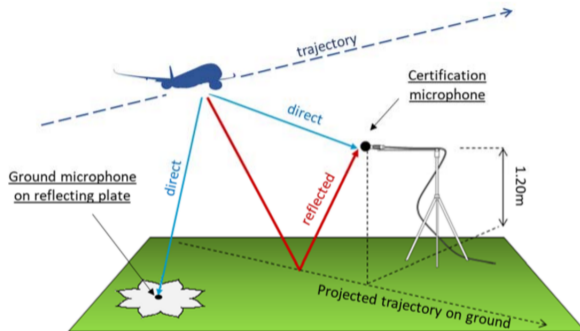
# Contexte

Besoin de contrôler les incertitudes sur la prédiction du bruit avion :

- ▶ dès la phase de développement
- ▶ lors des mesures de certification
- ▶ lors d'études d'impact autour des aéroports

→ Développement d'un modèle analytique de prédiction du bruit, prenant en compte les effets de propagation (météo et sol) et le déplacement de la source.

# Contexte - certification

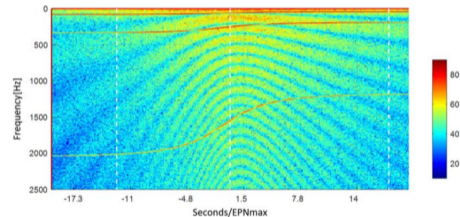
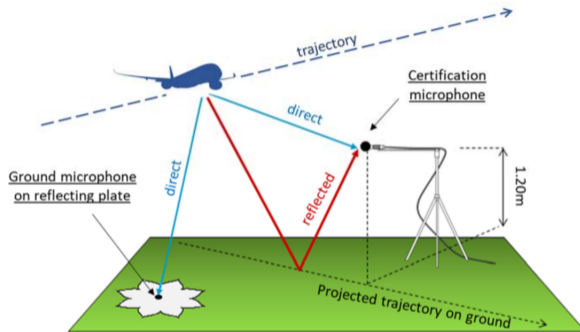


Effet de réflexion par le sol : franges interférentielles.

Composante tonale basse fréquence provenant des moteurs de l'avion.

Besoin d'une prédiction fiable.

## Contexte - certification



Effet de reflexion par le sol : franges interferentielles.

Composante tonale basse fréquence provenant des moteurs de l'avion.

Besoin d'une prédiction fiable.



# Contexte

## Modèle actuel :

- Approche source quasi-stationnaire avec correction effet Doppler
- Sol à réaction locale
- Atmosphère homogène

## Modèle à développer :

- Ajout de l'amplification convective
- Effets de sol
  - prise en compte du mouvement de la source sur le coefficient de réflexion
  - cas d'un sol à réaction étendue
- Effets météorologiques
  - prise en compte des profils de vent et de température
  - prise en compte de la turbulence atmosphérique

# Contexte

## Modèle actuel :

- Approche source quasi-stationnaire avec correction effet Doppler
- Sol à réaction locale
- Atmosphère homogène

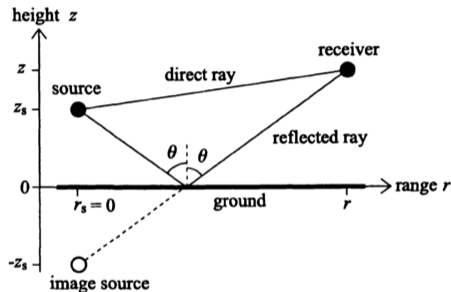
## Modèle à développer :

- Ajout de l'amplification convective
- Effets de sol
  - prise en compte du mouvement de la source sur le coefficient de réflexion
  - cas d'un sol à réaction étendue
- Effets météorologiques
  - prise en compte des profils de vent et de température
  - prise en compte de la turbulence atmosphérique

# Table of Contents

- 1 Contexte
- 2 Source stationnaire**
- 3 Source en mouvement rectiligne
- 4 Source en mouvement quelconque
- 5 Perspectives

# Source stationnaire : modèle Weyl van der Pol



**Figure** – Géométrie du problème considéré avec la source et le récepteur placés au dessus de la surface du sol. L'image source apparait en dessous du sol. Image issue de [Salomons 2001].

La pression complexe au niveau du récepteur s'exprime sous la forme :

$$p_c = \frac{e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1} + Q \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2} \right], \quad (1)$$

avec  $R_1$  et  $R_2$  les chemins de propagation de l'onde directe et réfléchi,

$\omega_0 = 2\pi f$  la pulsation,

$k_0$  le nombre d'onde,

$Q$  le coefficient de réflexion en onde sphérique.

# Source stationnaire : modèle Weyl van der Pol

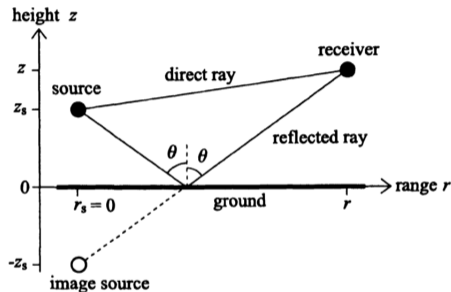


Figure – Géométrie du problème considéré avec la source et le récepteur placés au dessus de la surface du sol. L'image source apparait en dessous du sol. Image issue de [Salomons 2001].

La pression complexe au niveau du récepteur s'exprime sous la forme :

$$p_c = \frac{e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1} + Q \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2} \right], \quad (1)$$

avec  $R_1$  et  $R_2$  les chemins de propagation de l'onde directe et réfléchi,

$\omega_0 = 2\pi f$  la pulsation,

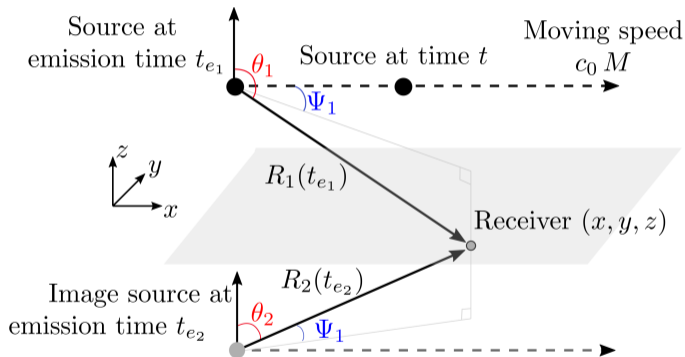
$k_0$  le nombre d'onde,

$Q$  le coefficient de réflexion en onde sphérique.

# Table of Contents

- 1 Contexte
- 2 Source stationnaire
- 3 Source en mouvement rectiligne**
- 4 Source en mouvement quelconque
- 5 Perspectives

## Source en mouvement rectiligne : modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé"



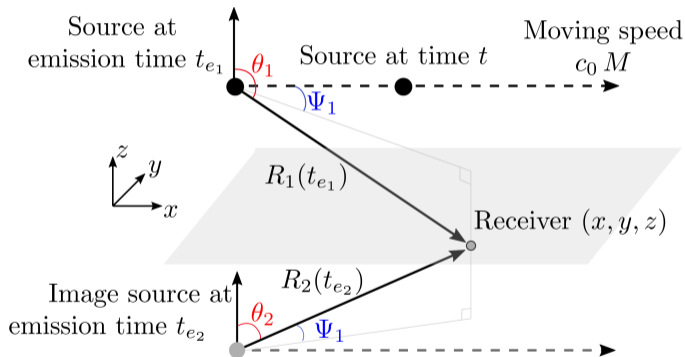
Il faut tenir compte :

- du nombre de Mach  $M$
- de l'angle polaire  $\theta$
- de l'angle d'azimuth  $\Psi$
- des temps de propagation  $t_{e1}$  et  $t_{e2}$

En effet, le son reçu au temps  $t$  au niveau du récepteur a été émis au temps  $t_e$ .

Figure – Géométrie du problème considéré avec une source en mouvement parallèle au sol, à vitesse constante.

## Source en mouvement rectiligne : modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé"



Il faut tenir compte :

- du nombre de Mach  $M$
- de l'angle polaire  $\theta$
- de l'angle d'azimuth  $\Psi$
- des temps de propagation  $t_{e1}$  et  $t_{e2}$

En effet, le son reçu au temps  $t$  au niveau du récepteur a été émis au temps  $t_e$ .

Figure – Géométrie du problème considéré avec une source en mouvement parallèle au sol, à vitesse constante.



## Source en mouvement rectiligne : modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé"

Modèle Weyl van der Pol :

$$p_c = \frac{e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1} + [\mathcal{R} + (1 - \mathcal{R})F(w)] \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2} \right]$$

Modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé" (e.g. [Attenborough & Van Renterghem 2021]) :

$$p_c = -\frac{i\omega_0 e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1(1 - M_{r_1})^2} + \left[ \mathcal{R} + (1 - \mathcal{R})F(w/\sqrt{1 - M_{r_2}}) \right] \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2(1 - M_{r_2})^2} \right], \quad (2)$$

avec  $M_{r_n} = M \sin \theta_n \cos \Psi_n$  est la composante du nombre de Mach dans la direction source-récepteur, et  $(1 - M_r)$  le facteur Doppler.

→ Lorsque la vitesse s'annule, on retrouve l'expression Weyl van der Pol classique.

## Source en mouvement rectiligne : modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé"

Modèle Weyl van der Pol :

$$p_c = \frac{e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1} + [\mathcal{R} + (1 - \mathcal{R})F(w)] \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2} \right]$$

Modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé" (e.g. [Attenborough & Van Renterghem 2021]) :

$$p_c = -\frac{i\omega_0 e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1(1 - M_{r_1})^2} + \left[ \mathcal{R} + (1 - \mathcal{R})F(w/\sqrt{1 - M_{r_2}}) \right] \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2(1 - M_{r_2})^2} \right], \quad (2)$$

avec  $M_{r_n} = M \sin \theta_n \cos \Psi_n$  est la composante du nombre de Mach dans la direction source-récepteur, et  $(1 - M_r)$  le facteur Doppler.

→ Lorsque la vitesse s'annule, on retrouve l'expression Weyl van der Pol classique.

# Table of Contents

- 1 Contexte
- 2 Source stationnaire
- 3 Source en mouvement rectiligne
- 4 Source en mouvement quelconque**
- 5 Perspectives

# Source en mouvement quelconque : modèle heuristique

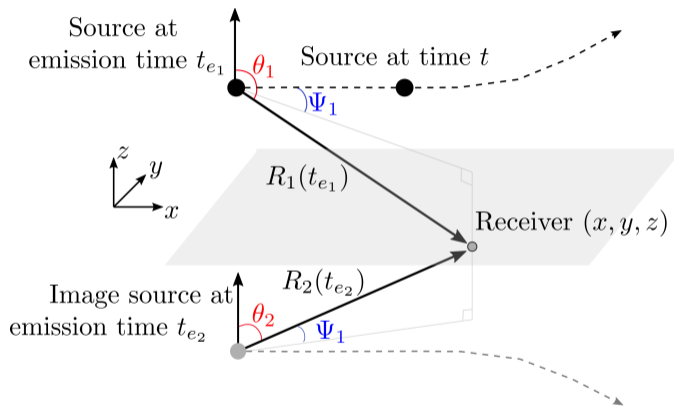


Figure – Géométrie du problème considéré pour une source en mouvement quelconque.

## Source en mouvement quelconque : modèle heuristique

Modèle heuristique [Attenborough & Van Renterghem 2021] :

$$p_c = -\frac{i\omega_0 e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ (1 - M_{r_1} + i\dot{M}_{r_1}/\omega_0) \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1(1 - M_{r_1})^3} + Q(1 - M_{r_2} + i\dot{M}_{r_2}/\omega_0) \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2(1 - M_{r_2})^3} \right], \quad (3)$$

où le terme  $\dot{M}_{r_n} = \frac{\partial M_{r_n}}{\partial t_{en}}$  est l'accélération de la source dans la direction du récepteur.

→ Pour une trajectoire rectiligne à vitesse constante, on retrouve le modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé".

## Source en mouvement quelconque : modèle heuristique

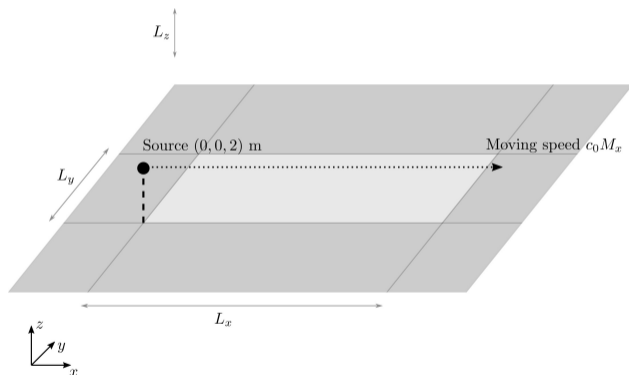
Modèle heuristique [Attenborough & Van Renterghem 2021] :

$$p_c = -\frac{i\omega_0 e^{-i\omega_0 t}}{4\pi} \left[ (1 - M_{r_1} + i\dot{M}_{r_1}/\omega_0) \frac{e^{ik_0 R_1}}{R_1(1 - M_{r_1})^3} + Q(1 - M_{r_2} + i\dot{M}_{r_2}/\omega_0) \frac{e^{ik_0 R_2}}{R_2(1 - M_{r_2})^3} \right], \quad (3)$$

où le terme  $\dot{M}_{r_n} = \frac{\partial M_{r_n}}{\partial t_{en}}$  est l'accélération de la source dans la direction du récepteur.

→ Pour une trajectoire rectiligne à vitesse constante, on retrouve le modèle Weyl van der Pol "Dopplérisé".

## Validation avec modèle FDTD 3D



- Domaine 3D (75,10,7) m soit environ 10 M de points.
- Couches d'absorbants PML ( $L_x, L_y, L_z$ ) m.
- Sol rigide ou absorbant.
- Atmosphère homogène.

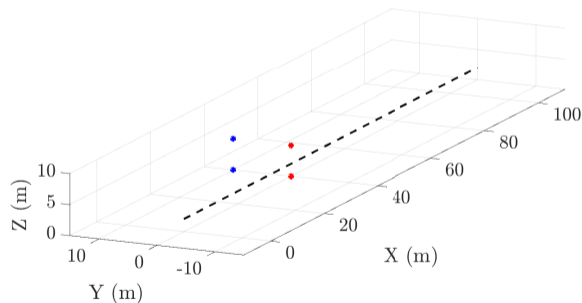
# Validation avec modèle FDTD 3D

Niveau sonore :  $20 \log(|p_c|/p_0)$ , avec  
 $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .

Vue de profil  $y = 0$  m (haut), vue du dessus  $z = 2$  m (bas) ;  $f = 200$  Hz et  $M = 0.1$ .



# Validation avec modèle FDTD 3D

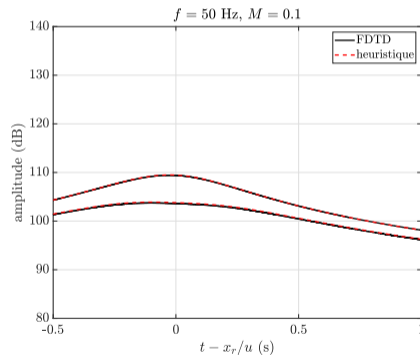
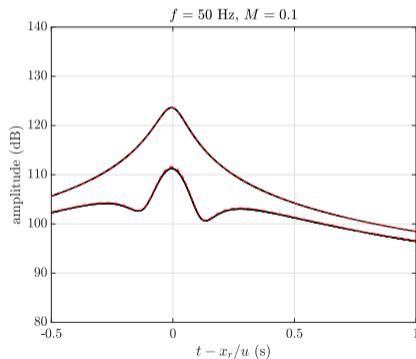


4 récepteurs sont positionnés dans le domaine à  $x_r = 40$  m,  $y_{r1} = 0$  m et  $y_{r2} = 10$  m, à 2 hauteurs  $z_{r1} = 0$  m et  $z_{r2} = 5$  m.

Pour les exemples suivants, on considère un sol absorbant de type herbe haute.

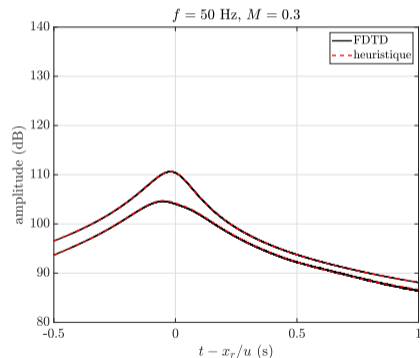
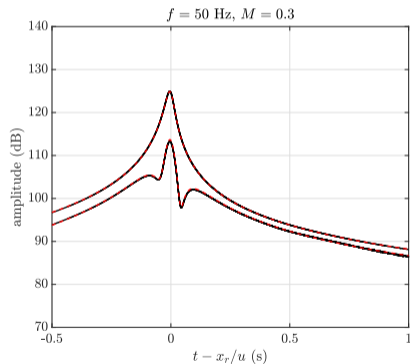
## Validation avec modèle FDTD 3D

Récepteurs placés à  $x = 40$  m, pour 2 valeurs de  $y = 0; 10$  m et 2 valeurs de  $z = 0; 5$  m.



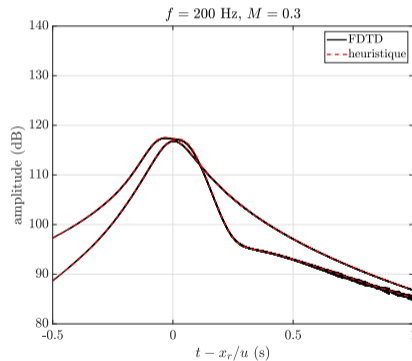
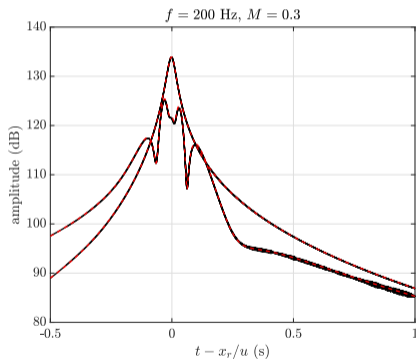
## Validation avec modèle FDTD 3D

Récepteurs placés à  $x = 40$  m, pour 2 valeurs de  $y = 0; 10$  m et 2 valeurs de  $z = 0; 5$  m.

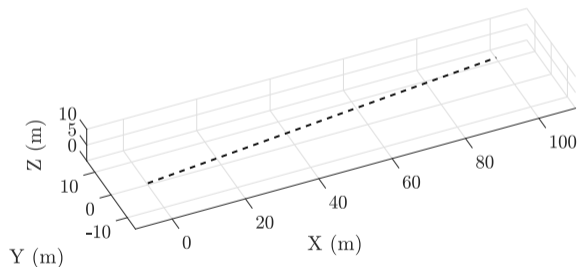


## Validation avec modèle FDTD 3D

Récepteurs placés à  $x = 40$  m, pour 2 valeurs de  $y = 0; 10$  m et 2 valeurs de  $z = 0; 5$  m.



# Prochains cas de validation



En cours :

- Validation dans les cas avec pente ascendante / descendante.
- Validation pour une accélération et une décélération.

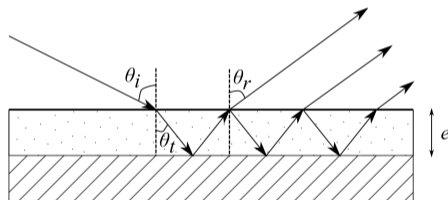
# Table of Contents

- 1 Contexte
- 2 Source stationnaire
- 3 Source en mouvement rectiligne
- 4 Source en mouvement quelconque
- 5 Perspectives**

# Perspectives

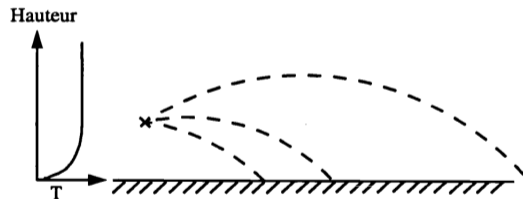
- Considérer un sol à réaction étendue. Ce phénomène apparaît lorsqu'une couche de sol absorbant (e.g. neige, herbe) repose sur un sol réfléchissant. Une correction de l'impédance  $Z$  est alors nécessaire :

$$Z_C = \frac{Z}{\cos \theta_t} \coth[-ik e \cos(\theta_t)] \quad (4)$$



# Perspectives

- Considérer les effets de refraction *via* prise en compte des gradients thermique et aérodynamique. Couplage avec un modèle *tir de rayons* envisagé.





Merci de votre attention