

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.

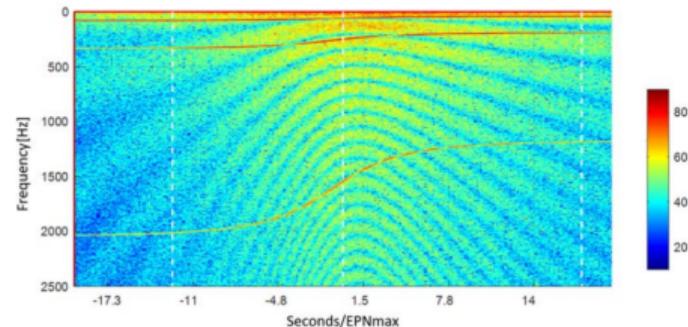
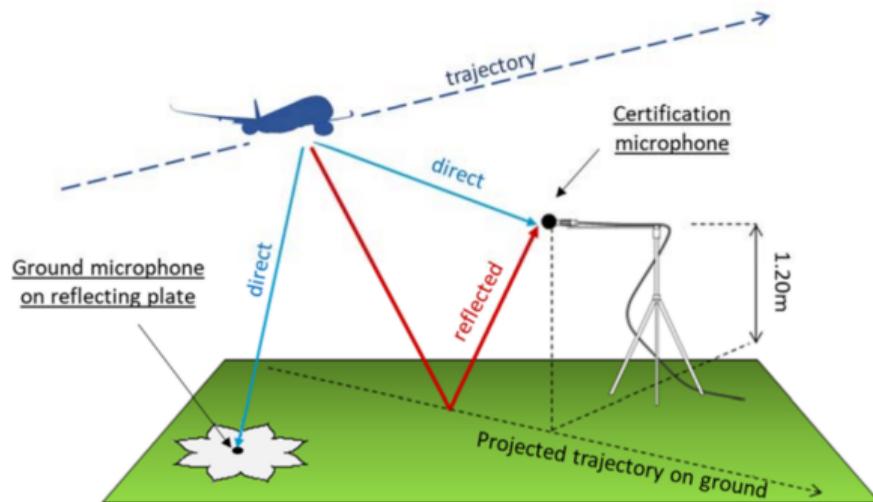
Contexte

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

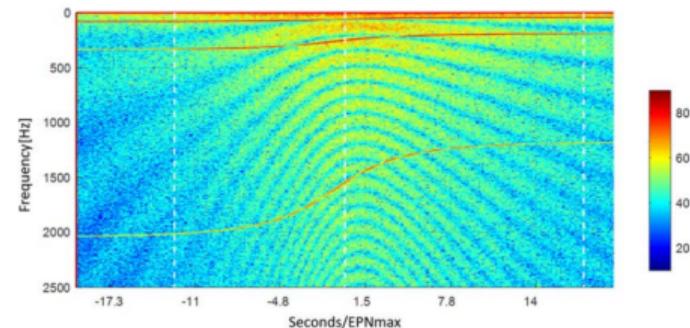
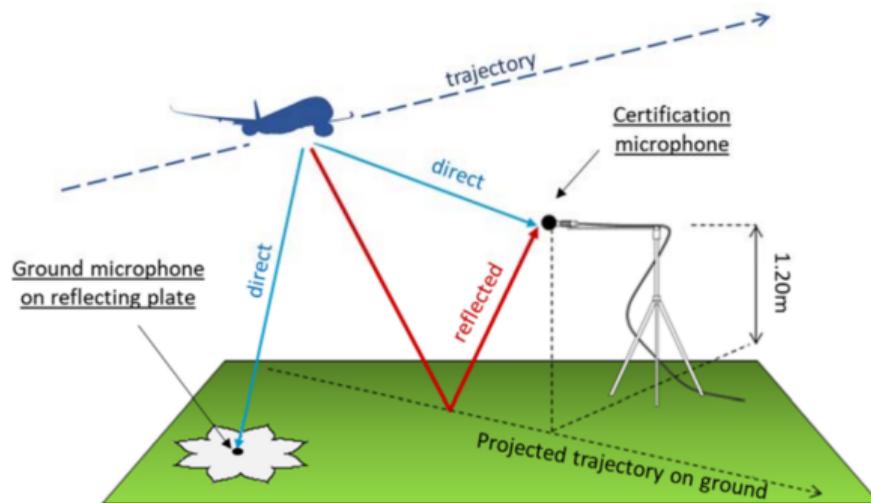


Effet de réflexion par le sol : franges interférentielles.

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

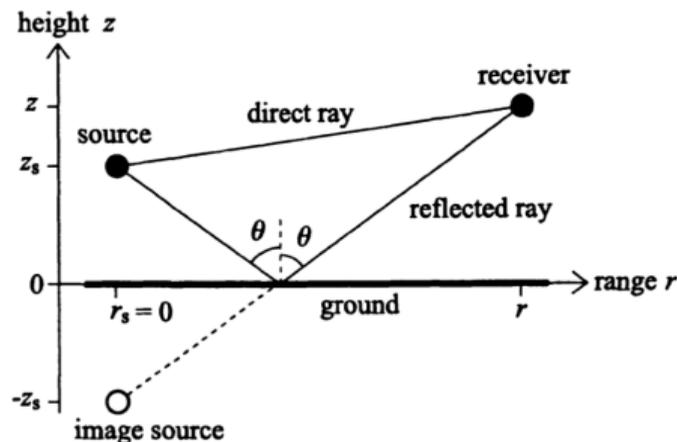


Figure – Géométrie du problème considéré avec la source et le récepteur placés au dessus de la surface du sol. L'image source apparait en dessous du sol. Image issue de [Salomons 2001].

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

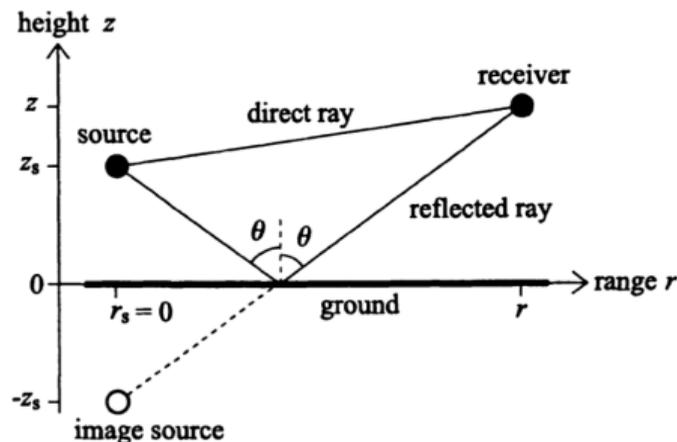


Figure – Géométrie du problème considéré avec la source et le récepteur placés au dessus de la surface du sol. L'image source apparait en dessous du sol. Image issue de [Salomons 2001].

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,

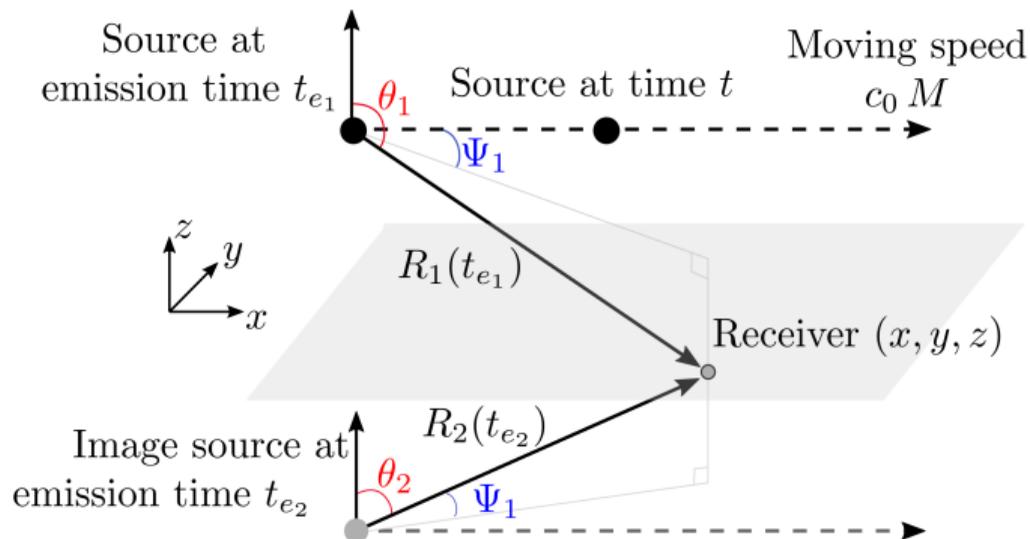
k_0 le nombre d'onde,

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 θ
- de l'angle d'azimuth Ψ
- des temps de propagation t_{e_1} et t_{e_2}

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"

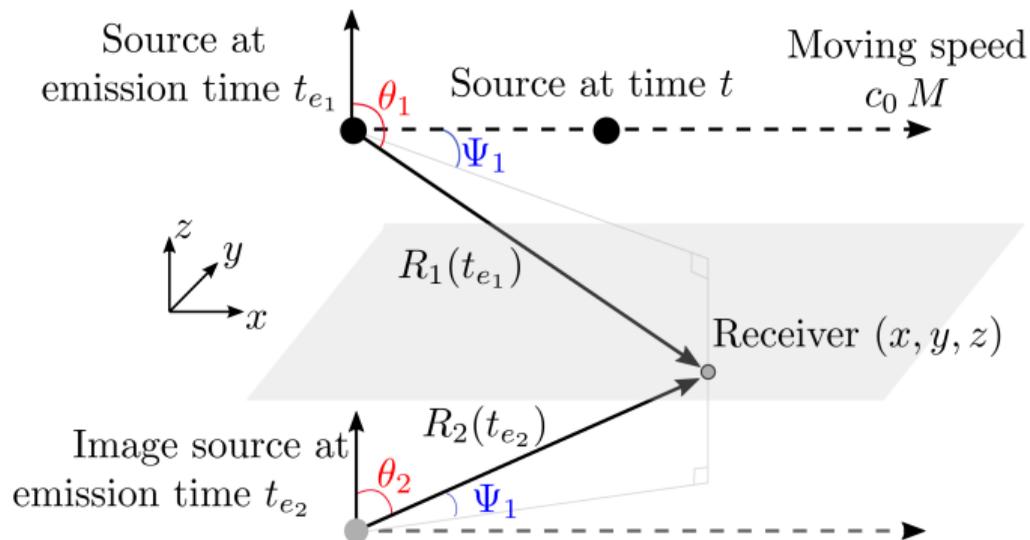


Figure – Géométrie du problème considéré avec une source en mouvement parallèle au sol, à vitesse constante.

Il faut tenir compte :

- du nombre de Mach M
- de l'angle polaire θ
- de l'angle d'azimuth Ψ
- 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 .

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

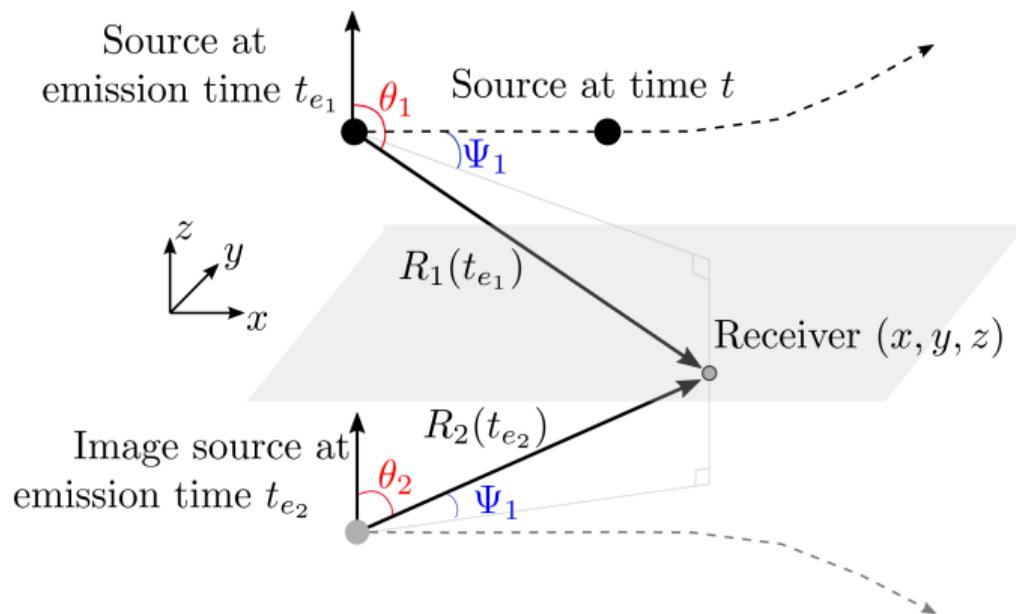


Figure – Géométrie du problème considéré pour une source en mouvement quelconque.

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

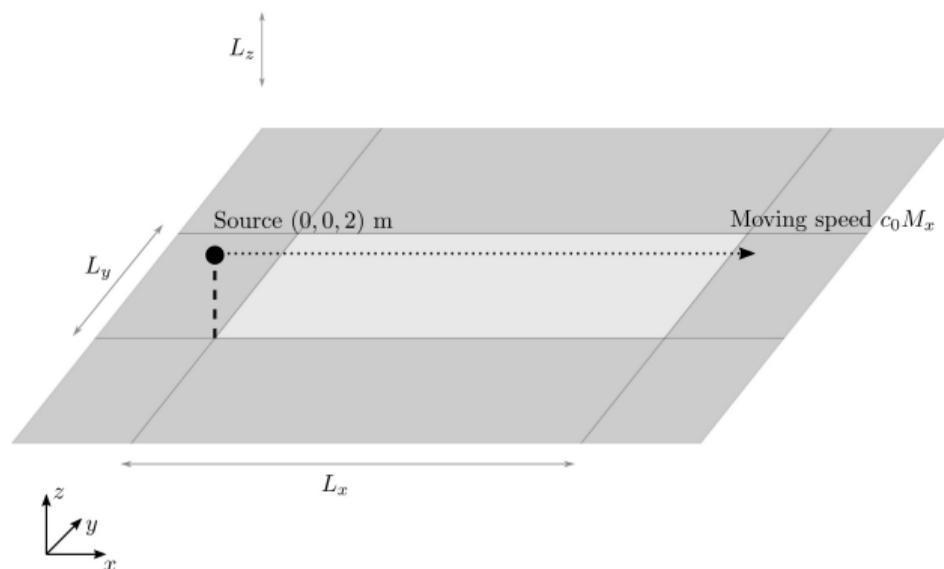
Modèle heuristique [Attenborough & Van Renterghem 2021] :

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

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



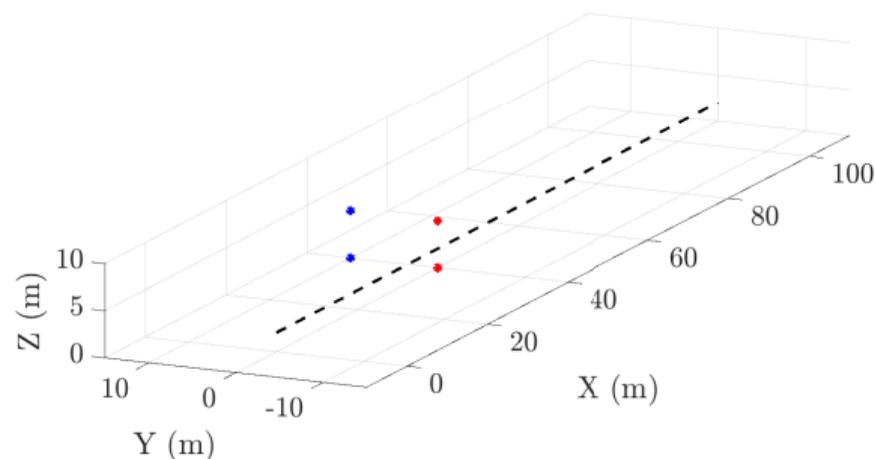
- Domaine 3D (75,10,7) m soit environ 10 M de points.
- Couches d'absorbants PML (L_x, L_y, L_z) m.
- Sol rigide ou absorbant.
- Atmosphère homogène.

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

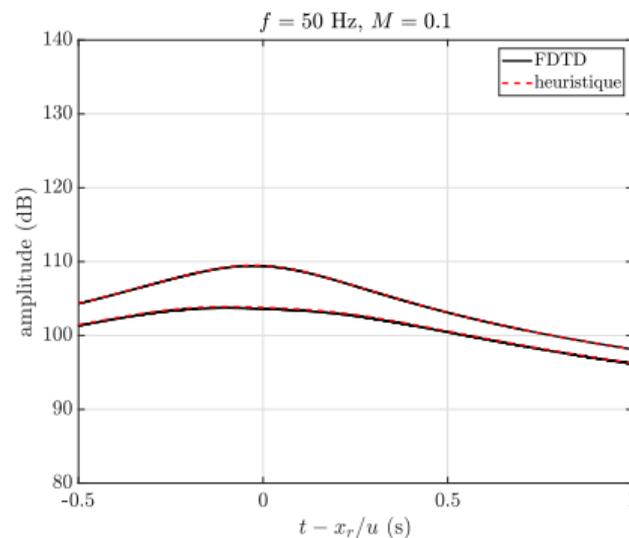
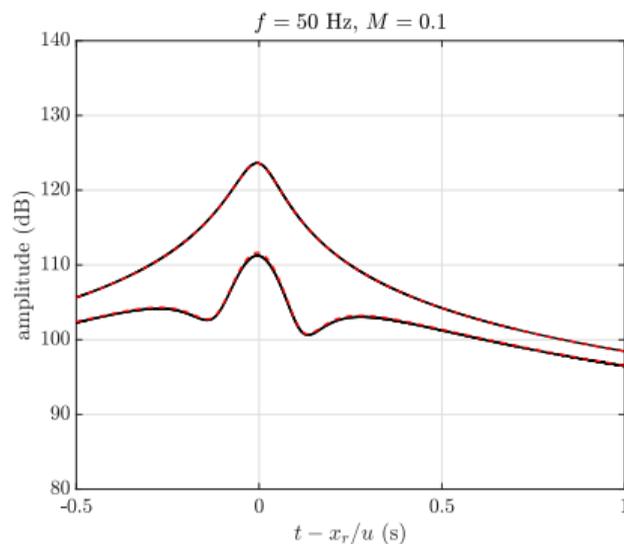


4 récepteurs sont positionnés dans le domaine à $x_r = 40$ m, $y_{r1} = 0$ m et $y_{r2} = 10$ m, à 2 hauteurs $z_{r1} = 0$ m et $z_{r2} = 5$ m.

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

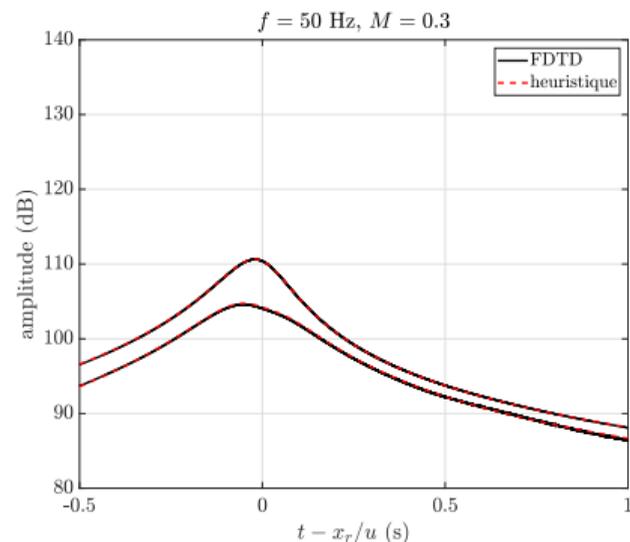
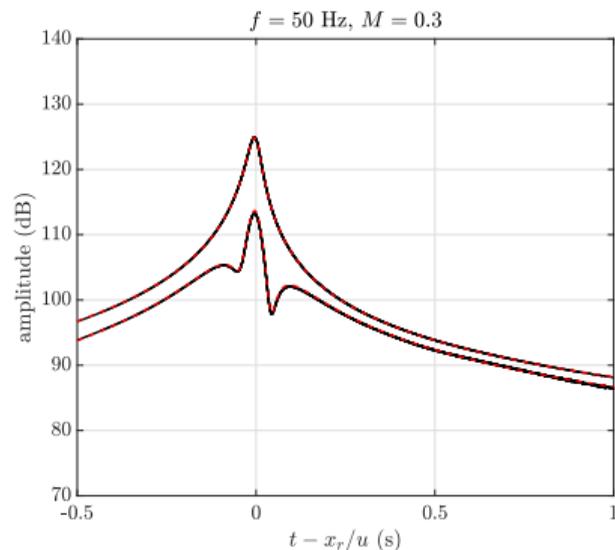
Validation avec modèle FDTD 3D

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



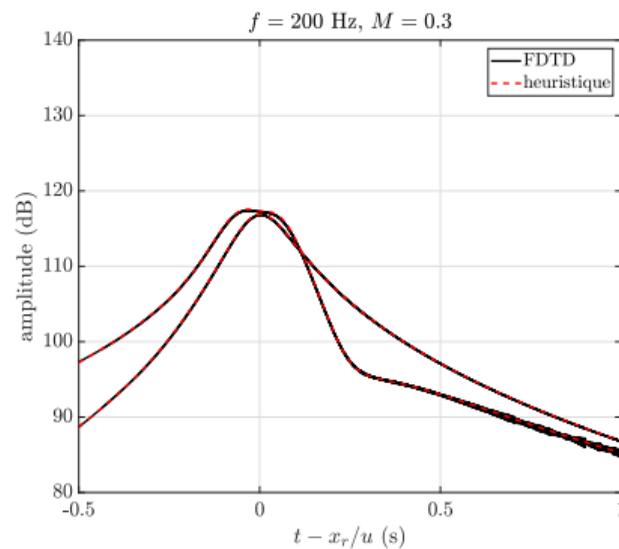
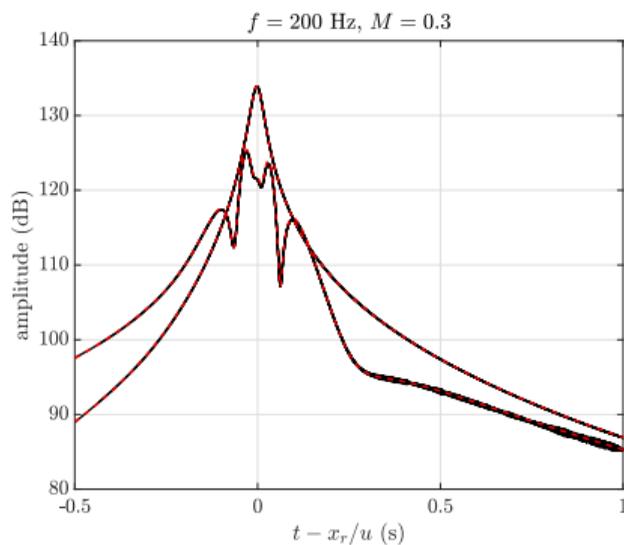
Validation avec modèle FDTD 3D

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

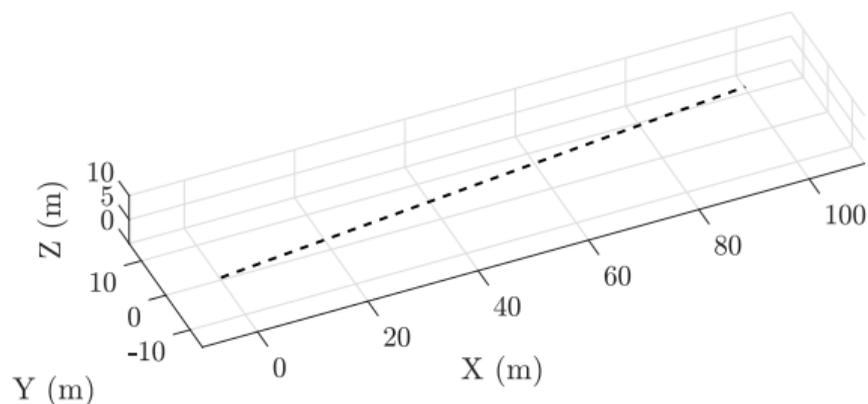


Validation avec modèle FDTD 3D

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.

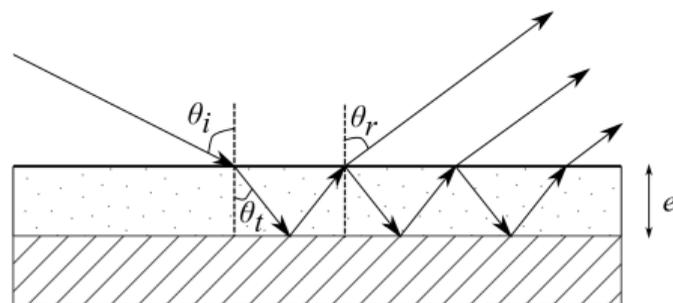
Table of Contents

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

Perspectives

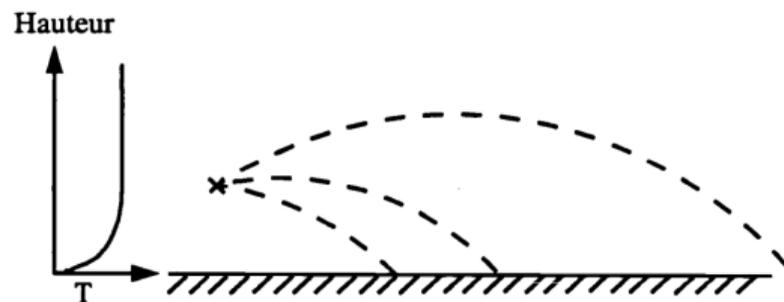
- Considérer un sol à réaction étendue. Ce phénomène apparaît lorsqu'une couche de sol absorbant (e.g. neige, herbe) repose sur un sol réfléchissant. Une correction de l'impédance Z est alors nécessaire :

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



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