



# UMR Acoustique Environnementale (Université Gustave Eiffel – Cerema) PROPOSITION DE STAGE 2025-2026

## Sujet de stage

---

## Implémentation d'un modèle de tir de rayons atmosphérique pour l'imagerie acoustique dans CleanTiPy

### Niveau recommandé

---

Master (M2)

Master (M1)

Ingénieur

Licence

Bac + 2

### Compétences requises

---

Formation en Acoustique et Vibrations (Notions de propagation, de rayonnement, de formation de voies)  
Programmation (Python)

### Description

---

**Contexte.** L'imagerie acoustique constitue un outil essentiel pour la caractérisation des sources sonores complexes, notamment dans les domaines de l'aéroacoustique, des transports et de l'environnement.

À partir d'antennes de microphones, ces méthodes permettent de localiser et de quantifier les émissions acoustiques dans une scène donnée. La technique du *Delay-and-Sum Beamforming* (formation de voies temporelle) repose sur la sommation cohérente des signaux mesurés, ajustée selon les temps de propagation entre les sources hypothétiques et les capteurs.

Cependant, la plupart des implémentations actuelles, y compris celles disponibles dans la plateforme CLEAN-T [1] et son implémentation Python [CleanTiPy](#) développée au laboratoire [2], reposent sur une approximation de propagation en milieu homogène. Cette hypothèse simplificatrice est adaptée à des environnements contrôlés (chambre semi-anéchoïque, champ libre sans vent, etc.), mais devient inadaptée pour les mesures en milieu extérieur avec des grandes distances de propagation, où les conditions atmosphériques modifient significativement la propagation sonore.

En effet, les profils verticaux de vent et de température induisent des effets de réfraction modifiant la trajectoire et le temps d'arrivée des ondes acoustiques. Les effets de sols jouent également sur le déphasage et l'absorption de l'onde réfléchi. Enfin, le caractère mobile de la source (par exemple un avion ou un véhicule routier) provoque des effets de Doppler et de convection qui influencent fortement le champ mesuré.

Pour pallier ces limitations, Kayser *et al.* [3] ont proposé une approche innovante combinant une formulation heuristique du rayonnement acoustique d'un point source en mouvement avec un modèle de tir de rayons permettant de décrire la propagation dans une atmosphère stratifiée (inhomogène et en mouvement). Ce couplage offre un compromis intéressant entre complexification de modèle et coût de calcul réduit, ouvrant la voie à une meilleure prise en compte des conditions atmosphériques et des effets de sol dans les outils d'imagerie acoustique.

**Problématique scientifique.** Le stage s'inscrit dans une démarche d'adaptation des modèles et hypothèses sur lesquels se base l'imagerie acoustique aux cas plus complexes de la propagation de longue distance dans des milieux inhomogènes, en intégrant les effets de la propagation atmosphérique dans les algorithmes de *beamforming*.

Cette intégration soulève plusieurs défis scientifiques et techniques :

1. **Couplage propagation – imagerie** : Dans la formation de voies classique, les délais appliqués aux signaux dépendent de la distance géométrique source–capteur, supposée rectiligne.  
En milieu atmosphérique stratifié, ces délais doivent être remplacés par les temps de trajet calculés par tir de rayons, tenant compte de la réfraction due au vent et à la température ainsi que les effets de sol.
2. **Gestion des multi-trajets et réflexion sur le sol** : Le modèle de Kayser *et al.* considère la présence de rayons directs et réfléchis sur un sol d'absorption quelconque, voir Figure 1.  
Leur intégration dans la formation de voies nécessite d'adapter la formulation temporelle de la formation de voie pour combiner ces contributions de manière cohérente.
3. **Implémentation numérique efficace** : Le code devra être conçu pour s'intégrer à l'architecture logicielle de CleanTiPy, en respectant ses principes de modularité, de clarté et d'ouverture.  
L'objectif est d'obtenir un outil opérationnel et utilisable par la communauté de recherche en acoustique environnementale et en acoustique expérimentale.

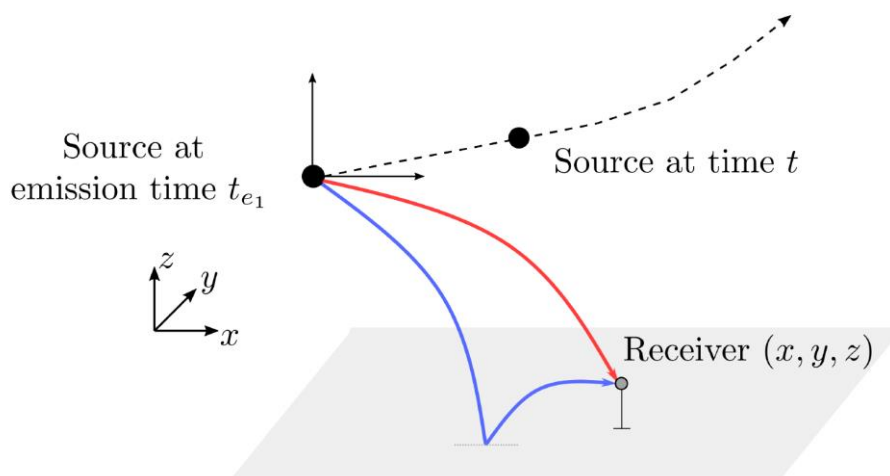


Figure 1: Schéma illustrant les trajets des rayons acoustiques direct et réfléchi par le sol entre une source monopolaire et un récepteur pour une trajectoire quelconque. Tiré de [3].

**Objectif du stage.** Développer et intégrer un module de tir de rayons atmosphérique dans CleanTiPy, permettant de prendre en compte les effets de réfraction dus aux gradients de vent et de température ainsi que les effets de sol dans les calculs de formation de voies acoustique. Ce développement vise à améliorer la précision et la robustesse des reconstructions d'imagerie acoustique en conditions extérieures.

Le stagiaire participera aux étapes suivantes :

1. **Revue bibliographique**
  - a. Étude du modèle couplé heuristique / tracé de rayon de Kayser *et al.* [3].
  - b. Analyse des effets de l'environnement de propagation (réfraction, absorption, effets de vent, effets de sol).
  - c. Rappel sur la formation de voies temporelle et les approches de *beamforming* avancées.
2. **Développement numérique**
  - a. Implémentation d'un module de tir de rayons pour déterminer les trajectoires, temps de propagation et atténuations dans une atmosphère stratifiée.
  - b. Couplage de ces résultats avec la formulation temporelle du Delay-and-Sum Beamforming.
  - c. Prise en compte des rayons directs et réfléchis pour des conditions de sol réalistes.
3. **Validation et démonstration**
  - a. Simulations sur des scénarios types (profils de vent, gradient thermique, géométries de capteurs) grâce au modèle heuristique [4].
  - b. Comparaison entre imagerie classique (milieu homogène) et imagerie avec modèle de tir de rayons.

- c. Évaluation de l'apport du modèle en termes de localisation et de clarté d'image.

**Mots Clés :** *imagerie acoustique, antenne microphonique, source mobile, milieu inhomogène, milieu en mouvement, déconvolution, propagation longue distance*

#### Lieu du stage

---

- Uni Eiffel, Campus Lyon** (25, avenue François Mitterrand, Case24, Cité des mobilités, F-69675 Bron Cedex)  
 **Uni Eiffel, Campus Nantes** (route de Bouaye, CS4, F-44344 Bouguenais Cedex)  
 **Cerema – Strasbourg** (11, rue Jean Mentelin, Strasbourg-Koenigshoffen, F-67035 Strasbourg)

#### Durée du stage (les dates et durée peuvent être adaptées)

Date de début : Février-Avril

Date de fin :

Durée : 5 mois

#### Contact

---

**M. Raphaël LEIBA**

Tél. 04 72 14 24 02

Email : [raphael.leiba@univ-eiffel.fr](mailto:raphael.leiba@univ-eiffel.fr)

**M. Bill KAYSER**

Tél. 06 58 39 84 20

Email : [bill.kayser@cerema.fr](mailto:bill.kayser@cerema.fr)

Site Web : [www.umrae.fr](http://www.umrae.fr)

#### Gratification

---

Indemnité équivalente à 15% du plafond horaire de la Sécurité Sociale, pour un organisme public

<https://www.service-public.fr/simulateur/calcul/gratification-stagiaire>

#### Bibliographie

---

- [1] R. Cousson, Q. Leclère, M.-A. Pallas et M. Bérengier, «A time domain CLEAN approach for the identification of acoustic moving sources,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 443, p. 47–62, March 2019.
- [2] R. Leiba, Q. Leclère, M.-A. Pallas et M. Nejmi, «CleanTiPy : implémentation libre de la technique d'imagerie CLEAN-T avec analyse multi-bandes de fréquences et différenciation du type de source,» chez *Congrès Français d'Acoustique 2025 - Paris*, 2025.
- [3] B. KAYSER, D. DRAGNA et P. BLANC-BENON, «Modeling of a moving point source in inhomogeneous and turbulent media - Application to aircraft noise,» *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, vol. 270, p. 3001–3007, October 2024.
- [4] B. Kayser, D. Dragna et P. Blanc-Benon, «Heuristic solution for the acoustic radiation of a moving monopole in an inhomogeneous and moving atmosphere. Application to aircraft noise,» *Acta Acustica*, vol. 8, p. 62, 2024.