

Propagation des ondes infrasonores dans une atmosphère turbulente

Contexte

Les infrasons sont des ondes acoustiques de fréquence inférieure à la limite du domaine audible humain, autour de 20Hz, et de longueur d'onde typiquement comprise entre 20m et 8km. Ils peuvent être produits par des sources naturelles, telles que les séismes et les éruptions volcaniques, et anthropiques, comme les explosions chimiques et nucléaires ou encore les bangs des avions supersoniques (cf. figure 1a). Les infrasons se propagent dans l'atmosphère sur des distances horizontales allant de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres et jusqu'à la thermosphère au-delà de cent kilomètres d'altitude. Les signaux de pres-

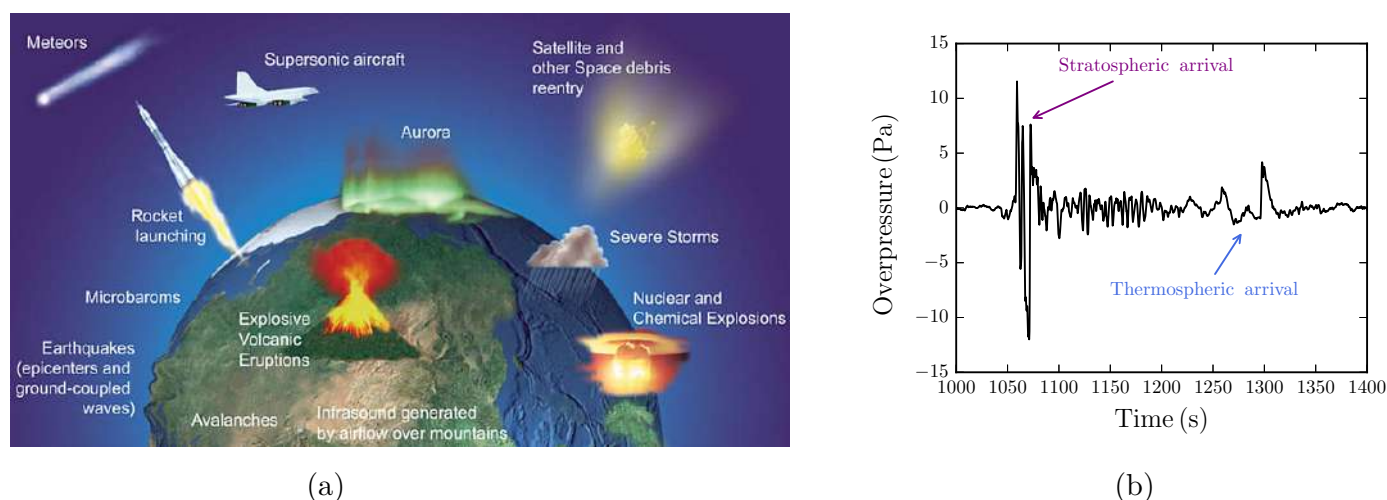


Figure 1: (a) Sources d'infrasons. (b) Exemple de signal enregistré au sol à 300 km d'une forte explosion.

Les signaux enregistrés à grande distance de leur source sont généralement caractérisés par différents paquets d'onde (cf. figure 1b), appelés arrivées, qui relèvent des mécanismes d'émission ainsi que de l'interaction entre les ondes infrasonores et le milieu atmosphérique de propagation. L'atmosphère est un écoulement complexe, intrinsèquement instationnaire et turbulent. En plus des variations de grande échelle de la température et des vents, contrôlées par l'activité solaire et par les ondes planétaires, des fluctuations turbulentes ayant des échelles spatio-temporelles proches des longueurs d'onde et fréquences acoustiques sont continûment observées. Ces dernières sont notamment générées par le déferlement des ondes de gravité (ondes mécaniques dues à la flottabilité de l'air et de fréquence inférieure à quelques millihertz) et peuvent affecter considérablement les arrivées infrasonores. Bien qu'un certain nombre d'études ait été mené sur la propagation acoustique dans des écoulements turbulents, l'interaction entre les infrasons et la turbulence atmosphérique reste à présent un sujet ouvert dont la compréhension s'avère incontournable pour améliorer notre capacité d'interpréter les enregistrements infrasonores.

Travaux réalisés et étude proposée

La modélisation de la propagation atmosphérique des infrasons a été classiquement réalisée par des méthodes approchées, comme le tracé de rayons ou les modes normaux, qui requièrent un faible coût de calcul. L'efficacité de ces techniques est néanmoins obtenue au détriment d'une description fine de la physique de la propagation infrasonore. Ainsi, au cours de récents travaux de recherche au Centre Acoustique du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA - UMR 5509), les ondes infrasonores ont été analysées par résolution directe des équations de Navier-Stokes [1–6] qui modélisent la propagation acoustique sans approximations. Ces travaux ont mis en évidence certains des phénomènes physiques principaux influençant les infrasons, tels que la réfraction due aux variations de grande échelle de la température et des vents, les effets non-linéaires, l'absorption induite par les effets visqueux et thermiques, les caustiques, la diffraction.

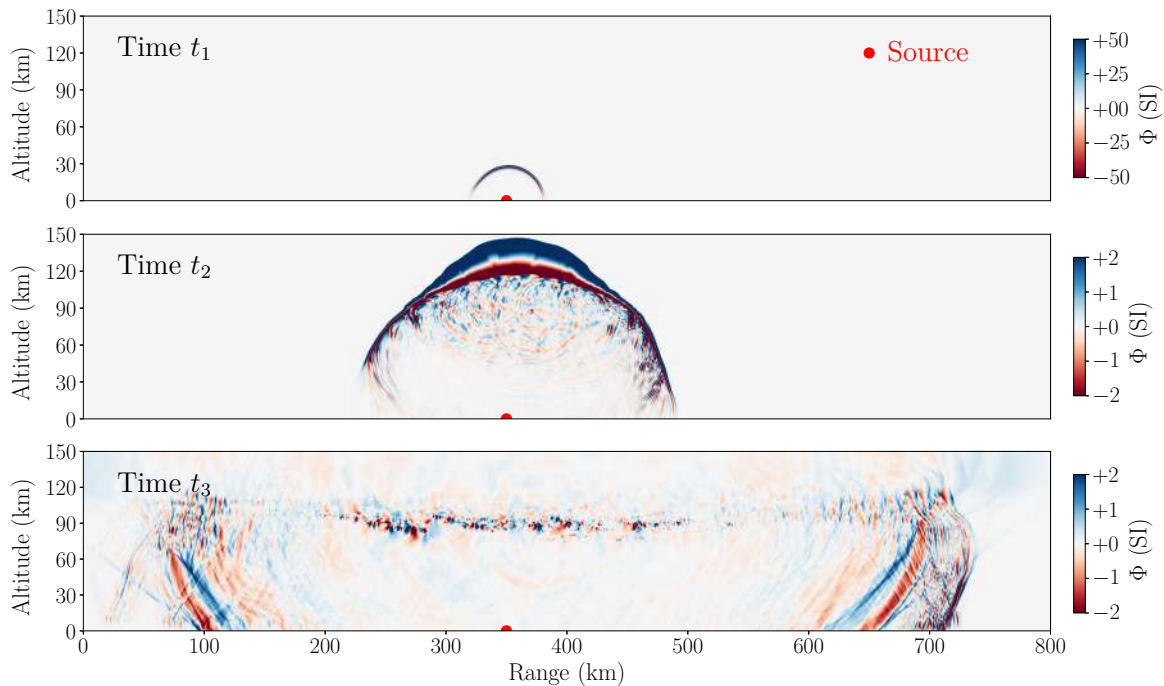


Figure 2: Perturbations de pression à différents instants de temps dues à une onde infrasonore émise au sol par une source impulsive et se propageant dans le champ turbulent induit par le déferlement d'une onde de gravité.

L'objectif de la thèse que l'on propose sera de poursuivre dans cette démarche et d'étudier la propagation des ondes infrasonores générées par une source impulsive dans une atmosphère turbulente induite par le déferlement d'ondes de gravité. Pour cela, des simulations numériques 3-D des équations de Navier-Stokes instationnaires et compressibles seront réalisés à l'aide d'un algorithme basé sur une méthode aux différences finies d'ordre élevé [7]. Cette approche permet de décrire simultanément l'évolution spatio-temporelle de l'atmosphère turbulente (génération des ondes de gravité, déferlement, cascade turbulente) et la propagation des infrasons dans le champ atmosphérique turbulent. Les calculs seront effectués sur des clusters de GPUs (Graphics Processing Units), en utilisant un code écrit en langage C/C++/CUDA. Une première étude en deux dimensions a été menée en 2019 [5] (cf. figure 2). Dans le cadre de la thèse, il s'agira tout d'abord d'élaborer une méthode de forçage appropriée des équations de la mécanique des fluides pour exciter un spectre réaliste d'ondes de gravité. L'interaction entre les inhomogénéités turbulentes engendrées par le déferlement de ces ondes et les signaux acoustiques enregistrés à quelques centaines de kilomètres de la source infrasonore sera ensuite analysée. Les effets de la turbulence sur la forme d'onde et le contenu fréquentiel seront plus particulièrement discutés en fonction des caractéristiques de la source infrasonore (énergie, spectre) ainsi que de la nature des arrivées.

Encadrement

La thèse sera encadrée par :

- **Roberto Sabatini**, Professeur Junior à l'École Centrale de Lyon, roberto.sabatini@ec-lyon.fr;
- **Christophe Bailly**, Professeur des Universités à l'École Centrale de Lyon, christophe.bailly@ec-lyon.fr;

Laboratoire et financement

La thèse se déroulera sur le campus de l'École Centrale de Lyon, au sein du Centre Acoustique du Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA - UMR 5509), et sera financée par un contrat doctoral

de Centrale Lyon dans le cadre de la Chaire de Professeur Junior “Acoustique dans le contexte des écoulements géophysiques.” Ces travaux seront menés également en collaboration avec le Laboratoire Études et Modélisations Acoustiques (LETMA), regroupant le Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), l’École Centrale de Lyon et Sorbonne Université.

Références

- [1] G. Hanique-Cockenpot, “Étude numérique de la propagation non linéaire des infrasons dans l’atmosphère,” Thèse de doctorat, ECL - No. 2011-32, 2011.
- [2] R. Sabatini, O. Marsden, C. Bailly and C. Bogey, “A numerical study of nonlinear infrasound propagation in a windy atmosphere,” *The Journal of the Acoustic Society of America*, **140**(1), 641-656, 2016.
- [3] R. Sabatini, C. Bailly, O. Marsden and O. Gainville, “Characterization of absorption and nonlinear effects in infrasound propagation using an augmented Burgers’ equation,” *Geophysical Journal International*, **207**, 1432-1445, 2016.
- [4] R. Sabatini, O. Marsden, C. Bailly and O. Gainville, “Three-dimensional direct numerical simulation of infrasound propagation in the Earth’s atmosphere,” *Journal of Fluid Mechanics*, **859**, 754-789, 2019.
- [5] R. Sabatini, J. B. Snively, C. Bailly, M. P. Hickey and J. L. Garrison, “Numerical modeling of the propagation of infrasonic acoustic waves through the turbulent field generated by the breaking of mountain gravity waves,” *Geophysical Research Letters*, **46**, 5526-5534, 2019.
- [6] R. Sabatini, J. B. Snively, M. P. Hickey and J. L. Garrison, “An analysis of the atmospheric propagation of underground-explosion-generated infrasonic waves based on the equations of fluid dynamics: ground recordings,” *The Journal of the Acoustic Society of America*, **146**, 4576-4591, 2019.
- [7] C. Bogey and C. Bailly, “A family of low dispersive and low dissipative explicit schemes for flow and noise computations,” *J. Comput. Phys.*, **194**(1), 194-214, 2004.