

## Soutenance de thèse

**Solène GERIER** soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA PSI et intitulée « *Étude et caractérisation de la haute atmosphère au moyen des ondes infrasonores acquises par des vols de ballons stratosphériques, et par inversion numérique* »

**Le 23 octobre 2024 à 14h00**  
**Salle des thèses de l'ISAE-SUPAERO**

devant le jury composé de

M. Raphaël GARCIA	ISAE-SUPAERO	Directeur de thèse
M. Roland MARTIN	CNRS - GET	Codirecteur de thèse
M. Christophe BAILLY	Ecole centrale de Lyon	Rapporteur
M. Philippe LOGNONNÉ	Université Paris Cité	Rapporteur
M. François COULOUVRAT	CNRS	Examineur
M. Thierry JARDIN	ISAE-SUPAERO	Examineur
Mme Lucie ROLLAND	Université Côte d'Azur	Examinatrice

### Résumé :

L'étude d'une planète comprend la compréhension de son atmosphère (lorsque celle-ci existe). En particulier, les infrasons, ondes acoustiques à basses fréquences pouvant se propager sur plusieurs centaines de kilomètres, peuvent contribuer à cette compréhension. En effet, lors de leur propagation, les infrasons intègrent des informations sur la structure de l'atmosphère et notamment les variations de température et de vent. Outre la structure de l'atmosphère, l'analyse des infrasons apporte des informations sur les sources acoustiques basses fréquences, telles que des explosions, des éruptions volcaniques ou même des séismes. Parmi les différents axes de recherche autour des infrasons, de forts enjeux concernent l'instrumentation, et plus spécifiquement les performances d'un réseau de capteurs d'infrasons ainsi que la possibilité d'augmenter la couverture des instruments à l'échelle planétaire. Face à ces enjeux, les capteurs de pression à bord de ballons stratosphériques paraissent comme un atout de choix. D'autres études s'intéressent à la possibilité d'intégrer l'information contenue dans les infrasons dans des modèles de prévision météorologique, afin d'acquérir une meilleure représentation de la structure verticale des vents et de la température de l'atmosphère. Ces travaux contribuent à résoudre ces deux questions scientifiques, que nous décrivons dans deux parties différentes de cette thèse. Notre premier axe d'étude se concentre sur l'interprétabilité des mesures à bord de ballons stratosphériques. En particulier, nous étudions, pour la première fois, le cas de signaux infrasonores issus d'événements sismiques (séismes de magnitude > 7). Nous nous interrogeons sur l'information contenue dans la forme d'onde de ces infrasons. Pour cela, plusieurs modélisations numériques en deux dimensions dans un domaine couplé sol-atmosphère sont utilisées afin de comprendre et d'identifier les différents trains d'ondes et la signature du séisme. Cette étude nous permet de mettre en exergue les avantages et inconvénients qu'apportent les mesures obtenues au cours de vols de ballons stratosphériques.

Cette étude montre que les signaux enregistrés par les capteurs à bord de ballons stratosphériques sont sensibles aux mouvements verticaux sous le ballon, et par conséquent plus sensibles aux infrasons primaires que secondaires ou épocentaux. De même, la forme d'onde enregistrée est marquée par le contenu fréquentiel de la source, ainsi que par la dispersion des ondes sismiques lors de leur propagation dans la structure interne de la Terre.

Notre second axe d'étude s'intéresse à l'imagerie de l'atmosphère, et notamment au développement d'outils numériques permettant de caractériser la sensibilité des infrasons au domaine atmosphérique. Pour ce faire, nous exploitons les techniques utilisées en sismologie, l'imagerie de la structure interne de la Terre pouvant se réaliser à l'aide des méthodes d'inversion de forme d'onde complète. Ces méthodes estiment la sensibilité des formes d'onde aux paramètres du domaine géophysique par la méthode de l'adjoint. En adaptant cette méthode aux ondes infrasonores, nous montrons, pour la première fois, une estimation des sensibilités de la forme d'onde infrasonores aux perturbations de vent et de température, appliquées dans le cas réel d'une explosion sur le site de Hukkakero en Finlande, explosion enregistrée sur un réseau infrason du CTBT. Nous abordons également, dans notre étude, l'influence de la source sur les noyaux de sensibilités, et nous démontrons la faisabilité de l'inversion dans des cas synthétiques.

Ces résultats encourageants nous permettront d'envisager l'intégration de la méthode dans un cadre de problème inverse afin de retrouver la structure de l'atmosphère.

**Mots-clés :** haute atmosphère, infrasons, modélisation numérique, ballons stratosphériques, noyau de sensibilité

### **Summary:**

Studying a planet involves understanding its atmosphere, if any. Infrasound, low-frequency acoustic wave that can travel hundreds of kilometers, can contribute to this understanding. As it travels, infrasound incorporates information about the structure of the atmosphere, including fluctuations in temperature and wind. In addition to atmospheric structure, infrasound analysis also provides information about the source of the low-frequency sound, such as explosions, volcanic eruptions, and even earthquakes. Among the areas of infrasound research, the focus is on instrumentation, especially the performance of infrasound sensor networks and the possibility of increasing instrument coverage at a planetary scale. Given these challenges, pressure sensors on stratospheric balloons appear to play an important role. Other studies are exploring the possibility of incorporating infrasound information into numerical weather models to better represent vertical wind structure and atmospheric temperature. This work contributes to addressing these two scientific questions, which we will describe in two different parts of this work. We first focus on the interpretability of stratospheric balloon measurements. In particular, we study for the first time the case of infrasound signals from seismic events. We investigate the information contained in the waveforms of these infrasound signals. To do this, 2D numerical simulations in the coupled ground-atmosphere domain are used to understand and identify different wave trains and seismic signatures. This study highlights the strengths and weaknesses of measurements performed during stratospheric balloon flights.

This study shows that the signals recorded by sensors on stratospheric balloons are sensitive to the vertical motion below the balloon and therefore more sensitive to primary infrasound than to secondary or epicentral infrasound. The recorded waveforms are described the frequency content of

the earthquake source as well as the dispersion of seismic waves. Our second research area is atmospheric imaging, specifically the development of numerical tools to characterize the sensitivity of infrasound to atmospheric model. For this purpose, we use seismological techniques, since it is possible to image the Earth's internal structure using full waveform inversion methods. These methods estimate the sensitivity of the waveform to parameters of the geophysical domain using adjoint methods. By applying this method to infrasound waves, we show for the first time the estimation of the sensitivity of the infrasound waveform to wind and temperature perturbations, applied to a real case of the explosion at the Hukkakero site in Finland, which was recorded by the CTBT Infrasound Network. Our study also addresses the influence of the source on the sensitivity kernel and demonstrates the feasibility of the inversion in synthetic cases. These encouraging results will allow us to consider integrating this method into inverse problem models to recover the structure of the atmosphere.

**Keywords:** upper atmosphere, acousting waves, numerical modelling, stratspheric balloon, sensitivity kernel