

Sujet de thèse DGA-AID ECHO-INV

R.F. Garcia (ISAE-SUPAERO), R. Martin (GET/OMP)

1. Titre ou intitulé de la thèse :

Etude et Caractérisation de la Haute atmosphère au moyen des Ondes acoustiques par Inversion Numérique des données des Vols ballons stratosphériques (ECHO-INV)

2. Objet de la thèse

Ce projet vise à caractériser les sources d'ondes infrasons et la structure de l'atmosphère au moyen des données infrasons enregistrées par les ballons atmosphériques et les réseaux sols. L'inversion des données sera mise en place en exploitant les outils de simulation numériques précédemment développés. Des méthodes d'apprentissage pour la détection d'évènements seront aussi développées pour les systèmes embarqués.

3. Descriptif de la thèse

Les mesures d'ondes acoustiques basses fréquences, ainsi que d'ondes de gravité atmosphériques sont généralement réalisées à partir de capteurs de pression déployés à la surface. Cependant durant la dernière décennie un grand nombre de nouveaux moyens d'observation ont été développés et permettent d'observer ces ondes. Tout d'abord les capteurs de pression atmosphérique sont maintenant déployés sur les plateformes de type ballon stratosphérique et permettent d'observer ces phénomènes avec un autre point de vue. Les missions longue durée (Strateole/CNES, ULDB/NASA) permettent en particulier d'obtenir une grande couverture spatiale. De plus, les observations par satellites imageur (AIRS/Aqua, GOLD/SES-14) ou in-situ (Mission GOCE), ainsi que les moyens sol d'observation de l'ionosphère complètent cette gamme de moyens d'observation. De plus, de nouveaux types de capteurs fournissant une information vectorielle sur les ondes atmosphériques commencent à apparaître (accéléromètres sur l'enveloppe des balloons atmosphériques, sismomètres...) et permettent de contraindre la direction d'arrivée des ondes atmosphériques.

Cependant, la sensibilité de ces nouvelles observations aux caractéristiques des sources et du canal de propagation n'est pas quantifiée, et l'utilisation de ces données pour l'inversion de la structure de l'atmosphère reste marginale.

Notre équipe de recherche a développé durant les 5 dernières années des outils de modélisation numérique de la propagation des ondes acoustiques, et de gravité et des ondes sismiques dans le système couplé atmosphère/solide des planètes (Garcia et al., 2017 ; Brissaud et al., 2017 ; Martire et al., 2018). Ces outils sont l'état de l'art du domaine car ils permettent de coupler mécaniquement les parties solide et fluide, de prendre en compte l'atténuation des ondes dans l'atmosphère et les vents, et de modéliser à la fois les ondes de

gravité, les ondes acoustiques, les ondes de choc et la réponse élastique du sol dans des modèles 3D.

Nous proposons dans cette thèse d'utiliser les outils numériques développés et les observables atmosphériques pour explorer diverses méthodes d'inversion des sources d'ondes et de la structure de l'atmosphère. Un deuxième objectif est également de supporter les instruments de mesure sous ballons atmosphériques en développant des méthodes de détection et de caractérisation des signaux pour ces systèmes embarqués, au moyen de méthodes d'apprentissage utilisant les données déjà acquises par d'autres vols.

Ce sujet rentre dans l'axe prioritaire « Modélisation des équations des ondes », de la thématique OAR, au travers des codes de modélisation des ondes atmosphériques (acoustiques et de gravité) et sismologiques SPECFEM-DG et SPECFEM-LN qui ont été développés à l'ISAE-SUPAERO avec le soutien de la DGA. Ces codes sont l'état de l'art de la modélisation des ondes mécaniques couplées entre les parties solides/océaniques/aériennes de notre planète. Nous proposons de développer un code d'inversion de la structure atmosphérique, mais les potentiels d'applications en milieu marin n'ont pas été explorés. Dans une moindre mesure, il rentre également dans l'axe prioritaire « Optimisation des capteurs embarqués » en permettant une analyse fine des données de capteurs infrasons embarqués sous ballons atmosphériques (une partie de ceux-ci étant développée par l'ISAE-SUPAERO).

4. Programme de la thèse

Dans un premier temps nous nous focaliserons sur l'identification et la caractérisation des sources d'ondes atmosphériques (tonnerre, explosions atmosphériques, séismes, infrasons émis par les vagues et les montagnes...) enregistrées par les vols ballons stratosphériques au moyen de simulations directes dans un modèle d'atmosphère connu. Nous utiliserons pour valider l'approche les données de capteurs infrasons sous ballons acquises lors qu'une expérience réalisée au moyen de tirs d'explosifs. Ensuite nous analyserons les divers signaux impulsifs acquis par les vols stratosphériques. Nous étudierons en particulier le potentiel des nouvelles observables vectorielles (accéléromètres, sismomètres et capteurs de rotation au sol ou sur des plateformes ballon) pour l'étude de l'atmosphère. Pour cela la sensibilité de ces observables aux paramètres atmosphériques et à la source sera déterminée.

La figure 1 ci-dessous (Poler et al., 2020) démontre la richesse d'informations contenues dans les données des vols ballon stratosphériques (ici vol NASA). Nous montrons en effet que sur un trajet de quelques heures traversant les andes à ~30km d'altitude, un grand nombre de phénomènes physiques peuvent être quantifiés. Ces données permettent également de quantifier le niveau de bruit de fond attendu par de tels instruments dans la stratosphère.

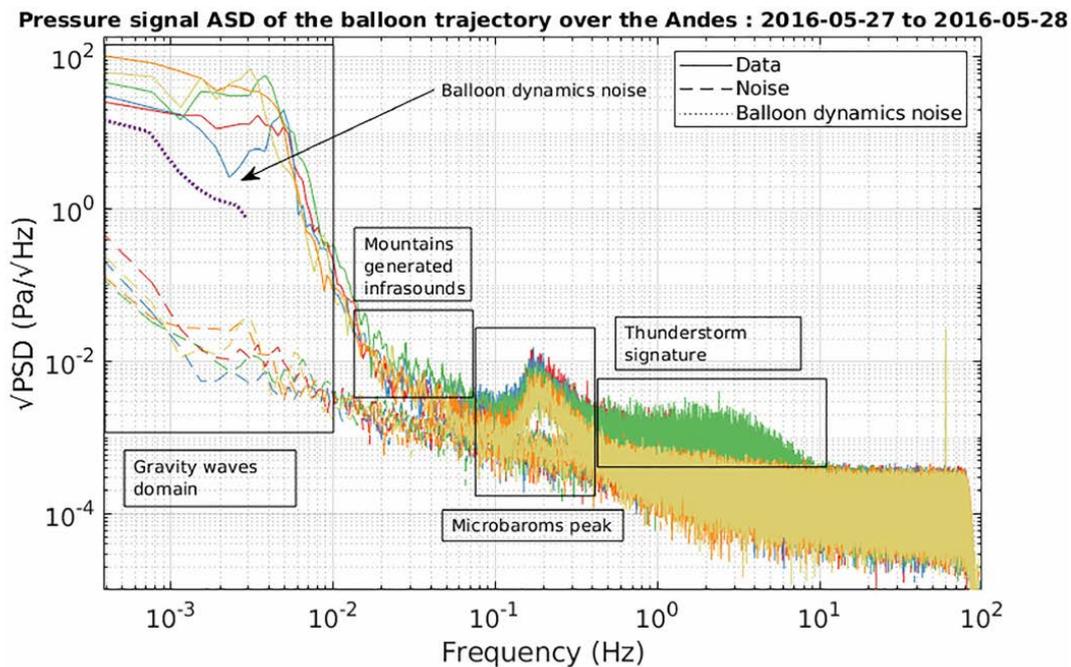


Figure 3. Pressure signal ASD of the balloon trajectory over the Andes, divided into five temporal windows, which are shown in Figure 2 with the same colors. The data (solid lines), the sensor noise (dashed lines) estimated from the mechanically disabled sensor, and the balloon dynamics noise (dotted line) are presented. Note the thin 60 Hz line corresponding to contamination by electric networks.

Figure 1 : Extrait de Poler et al. (2020) représentant en densité spectrale les signaux barométriques enregistrés lors du passage au dessus des Andes par le vol ballon stratosphérique NAS/ULDB en 2016. Les divers types de processus physiques sont donnés en fonction de la fréquence et quantifiés par cette étude.

Dans un second temps nous utiliserons les données des vols longue durée de ballons stratosphériques (Stratéole, ULDB/NASA) ainsi que les modèles de vagues océaniques (WAVEWATCH3) pour inverser les profils de vents atmosphériques en utilisant les microbaroms (infrasons émis par l'interférence constructive des vagues). Diverses paramétrisations et méthodes d'inversion seront testées sur ce cas d'étude en utilisant les outils numériques déjà disponibles. Parmi ces méthodes nous envisageons d'appliquer la méthode adjointe linéarisée pour obtenir la sensibilité des observables aux profils de vent, des méthodes de décomposition des profils de vent atmosphériques sur des bases EOF (Empirical Orthogonal Functions) pour réduire le nombre de paramètres, et des méthodes d'apprentissage appliquées au problèmes d'optimisation.

Enfin, nous développerons des outils de détection et de caractérisation des événements infrasons pour les systèmes embarqués. Pour cela, des méthodes d'apprentissage seront mises en place à partir de données déjà acquises par des vols ballons et testées sur les données des prochaines missions de vols ballons.

L'ensemble de ces analyses permettra d'identifier à la fois les sources d'ondes à considérer, les moyens d'observation (types de capteurs et de missions) et les méthodes d'inversion qui permettront une imagerie de la structure de l'atmosphère et une caractérisation des sources.

Le sujet de thèse entre dans le cadre d'un ensemble d'activités développé au sein de l'équipe Systèmes Spatiaux pour la Planétologie et ses Applications (SSPA) de l'ISAE-SUPAERO autour de la mesure, l'analyse et la modélisation des ondes mécaniques dans les systèmes

couplés solide/océan/atmosphère des planètes. Les étudiants de l'équipe bénéficient des développements instrumentaux (capteurs infrasons sous ballon, microphone martien, sismomètre martien SEIS...), des données de missions terrestres et planétaires, ainsi que des développements numériques simulant la propagation des ondes dans ces milieux.

Les perspectives professionnelles du doctorant se situent à la fois dans les domaines du calcul numérique et haute performance, dans la géophysique et le spatial. Les deux étudiants précédents sur cette thématique (dont le dernier soutenu par la DGA) sont actuellement très demandés car ils ont développé un code à l'état de l'art du domaine (premier en poste permanent au réseau infrason NORSAR en Norvège, second avec plusieurs offres de postdoc, surtout aux USA dans la communauté infrason). Nous ne sommes donc pas inquiet des perspectives professionnelles du futur étudiant, nous souhaiterions tout de même que l'un de nos étudiants choisisse une carrière en France.

5. Références

1. Brissaud, Q., Martin, R., Garcia, R. F., & Komatitsch, D. (2017). Hybrid Galerkin numerical modelling of elastodynamics and compressible Navier–Stokes couplings: applications to seismo-gravito acoustic waves. *Geophysical Journal International*, 210(2), 1047-1069.
2. Garcia, R. F., Brissaud, Q., Rolland, L., Martin, R., Komatitsch, D., Spiga, A., ... & Banerdt, B. (2017). Finite-difference modeling of acoustic and gravity wave propagation in Mars atmosphere: application to infrasounds emitted by meteor impacts. *Space Science Reviews*, 211(1-4), 547-570
3. Martire, L., Brissaud, Q., Lai, V. H., Garcia, R. F., Martin, R., Krishnamoorthy, S., ... & Mimoun, D. (2018). Numerical Simulation of the Atmospheric Signature of Artificial and Natural Seismic Events. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 12-085.
4. Krishnamoorthy, S., Lai, V. H., Komjathy, A., Pauken, M. T., Cutts, J. A., Garcia, R. F., ... & Martire, L. (2019). Aerial Seismology Using Balloon-Based Barometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(12), 10191-10201.
5. Poler, G., Garcia, R. F., Bowman, D. C., & Martire, L. (2020). Infrasound and Gravity Waves Over the Andes Observed by a Pressure Sensor on Board a Stratospheric Balloon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(6), e2019JD031565.