,

**STAGE DE RECHERCHE de MASTER 2ème ANNEE**

# Master SOAC / WAPE

Année Universitaire 2026-2027

**LABORATOIRE : Laboratoire de Météorologie Dynamique**

**SUJET DU STAGE :** Quantifier les ondes internes de gravité dans les observations de ballons de longue durée

**COORDONNEES DU RESPONSABLE :**
Nom – Prénom : Plougonven Riwal
Adresse: LMD/IPSL Ecole Polytechnique
Route de Saclay
91128 Palaiseau Cedex

Téléphone : 01 69 33 51 90
E-mail : riwal.plougonven@lmd.polytechnique.fr

**CO-ENCADREMENT** :
Nom – Prénom : Hertzog Albert
Adresse: LMD/IPSL Sorbonne Université
E-mail : albert.hertzog@lmd.ipsl.fr

**NATURE DU SUJET :**

| | |
|---|---|
| **Théorie** | **Beaucoup** |
| Modélisation num. | Un peu |
| Expérimentation | Pas du tout |
| **Analyse de données** | **Beaucoup** |
| Instrumentation | Pas du tout |

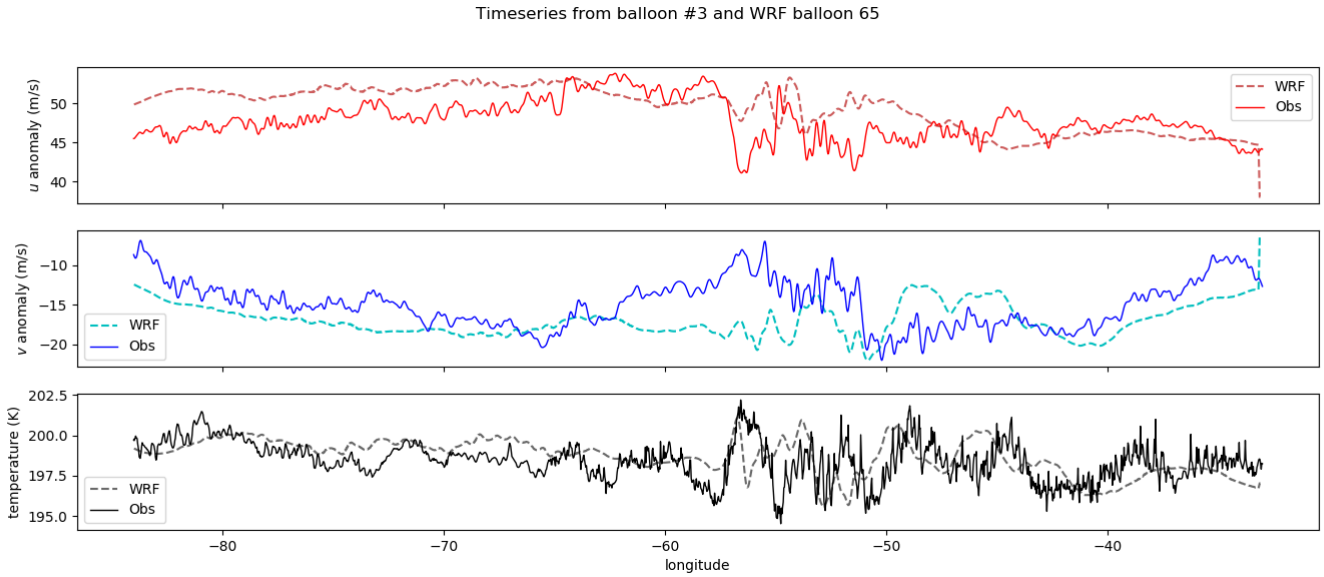
**SUJET :**

Les **observations des mouvements atmosphériques par les ballons de longue durée**, qui dérivent avec les vents de basse stratosphère pendant deux à trois mois, fournissent des **informations détaillées et sans équivalent sur les ondes internes de gravité** (par ex. *Corcos et al 2021*). En effet, plusieurs variables (vent, pression, température) sont mesurées en détail (*in* situ), et le comportement quasi-lagrangien des ballons donne accès à la fréquence intrinsèque des ondes, variable clé pour l'interprétation des mesures.

Les observations de plusieurs campagnes, autour de l'Antarctique et dans la bande équatoriale, ont déjà été exploitées pour caractériser les ondes dans ces régions. La **méthodologie employée repose sur la théorie linéaire des ondes et une analyse en ondelettes** du signal pour séparer différents paquets d'ondes (*Vincent & Hertzog, 2014*). La méthode d'analyse a été évaluée avec des données synthétiques, comportant un ou plusieurs paquets d'ondes.

,

Des études de cas d'ondes orographiques, au-dessus de la Péninsule Antarctique, révèlent cependant des signaux intenses et abrupts, ne couvrant pas plusieurs longueurs d'ondes. L'enjeu du stage est d'analyser **la relation entre l'onde réelle et l'estimation de ses caractéristiques** à partir de mesures par un ballon de longue durée.




Mesures du vent zonal (en haut), du vent méridien (milieu) et de la température (en bas) par un ballon de la campagne Concordiasi (10 octobre 2010), ainsi que les équivalents pour un *ballon virtuel* d'après la simulation haute résolution avec le modèle WRF. On ne s'attend pas à une concordance exacte, mais à des caractéristiques comparables pour une part du spectre d'ondes. A fine échelle, une part du signal mesuré en température ne correspond pas à des ondes, mais aux oscillations propres du ballon.

L'opportunité pour poser cette question vient de **simulations effectuées à l'aide d'un modèle méso-échelle** (WRF) d'une série d'ondes au-dessus de la Péninsule Antarctique en octobre 2010 (*Kruse et al 2022*). Une dizaine de survols par des ballons de la campagne Concordiasi ont observé le champ d'ondes. Des trajectoires de *ballons virtuels* ont été calculées dans ces simulations. En amont, des **solutions classiques d'ondes de montagne** sont bien connues et fournissent un premier terrain de jeu initial pour aborder la question.

La figure ci-dessus illustre les mesures de vent zonal (panneau du haut), de vent méridien (milieu) et de température (bas) en courbes pleines pour le ballon 3, le 10/10/10. Les courbes pointillées sont des mesures par un *ballon virtuel.* La possibilité d'effectuer un grand nombre de vols de *ballons virtuels* permet en outre d'examiner la **représentativité des mesures et de quantifier l'incertitude sur l'estimation des caractéristiques des ondes de gravité.**

,

Les **objectifs du stage** seront :
- dans le cas de solutions analytiques d'ondes de montagne, **comparer les caractéristiques estimées par des mesures de ballon virtuel aux 'vraies' caractéristiques** des ondes,
- dans le cas d'octobre 2010, **effectuer cette comparaison à l'aide de ballons virtuels**, en explorant la représentativité des mesures et l'incertitude de l'estimation des caractéristiques des ondes,
- **analyser et interpréter les ondes simulées dans le cas d'octobre 2010**, et utiliser ces simulations pour guider l'interprétation des signaux observés par les ballons surveillant la Péninsule.

## Références

Corcos, M., Hertzog, A., Plougonven, R., & Podglajen, A. (2021). Observation of gravity waves at the tropical tropopause using superpressure balloons. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(15), e2021JD035165.

Kruse, C. G., Alexander, M. J., Hoffmann, L., van Niekerk, A., Polichtchouk, I., Bacmeister, J. T., ... & Stein, O. (2022). Observed and modeled mountain waves from the surface to the mesosphere near the Drake Passage. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *79*(4), 909-932.

Vincent, R. A., & Hertzog, A. (2014). The response of superpressure balloons to gravity wave motions. *Atmospheric Measurement Techniques*, *7*(4), 1043-1055.

## POURSUITE :

Ce stage peut-il donner lieu à un sujet de thèse ?
**Oui**, nous déposons un sujet de thèse qui sera en lien direct avec ce sujet de stage. La troisième campagne du projet Strateole 2 est en cours, avec 22 lachers prévus durant l'automne 2026. La thèse portera sur l'analyse de l'ensemble du spectre d'ondes équatoriales à partir de l'ensemble des campagnes Strateole 2. Elle impliquera d'utiliser d'autres sources d'informations auprès d'équipes avec lesquelles nous collaborons en Europe, pour établir une estimation quantitative à jour de l'ensemble des ondes forçant la circulation de la stratosphère tropicale.