

## AVIS DE SOUTENANCE

Sébastien FERNANDEZ

Astronomie et Astrophysique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

*Lien optique en espace libre via un relai aéroporté pour le transfert de fréquence ultrastable*Soutenance prévue le **12 février 2026 à 14h00**

Lieu : Amphithéâtre de l'IAP

Observatoire de Paris 77 avenue Denfert Rochereau 75014 Paris

**Composition du jury proposé**

M. Peter WOLF	Professeur	Observatoire de Paris	Directeur de these
M. Hubert HALLOIN	Maître de conférences	Universite Paris Cité	Rapporteur du jury
M. Kersalé YANN	Professeur	ENSMM	Rapporteur du jury
Mme Anne AMY-KLEIN	Professeur	Universite Sorbonne Paris Nord	Membre du jury
Mme Marie HOUSSIN	Professeur	Universite Aix Marseille	Membre du jury
M. Sébastien BIZE	Professeur	Observatoire de Paris	Membre du jury

**Mots-clés :** dissémination de fréquence,comparaion d'horloges,optique adaptative,turbulences atmosphériques,relai optique aéroporté,**Keywords :** frequency dissemination,clocks comparison,active optics,atmospheric turbulence,airborne optical relay,**Résumé :**

Le très haut niveau d'exactitude en fréquence des horloges optiques (10-18 en valeur relative) ouvre la voie à de nombreuses applications dans les domaines de la physique fondamentale, la navigation et la géodésie. Celles-ci requièrent la mise en place de liens permettant de comparer des horloges distantes sans en dégrader la performance. En Europe, le réseau fibré de métrologie REFIMEVE connecte des laboratoires sur des distances allant jusqu'à 1000 km et dissémine un signal optique ultrastable. Le développement actuel des horloges optiques transportables permet d'envisager la réalisation d'expériences de métrologie en dehors des laboratoires. En particulier, la géodésie chronométrique consiste à cartographier le potentiel de gravité en comparant des horloges potentiellement éloignées du réseau. Ce manuscrit présente le développement de TOFU (Transfert Optique de Fréquence Ultrastable), un démonstrateur de lien optique en espace libre qui transfère le signal d'horloges ultrastables à travers l'atmosphère. En vue de couvrir, à terme, des distances au sol de l'ordre de 10 à 100 km, le signal transite via un relai aéroporté sous un ballon captif gonflé à l'hélium de sorte à survoler les obstacles. Le premier enjeu du lien est de garantir la stabilité de la puissance optique transmise en maintenant le pointage entre l'émetteur au sol et le récepteur embarqué, malgré les mouvements du ballon. Le deuxième enjeu consiste à stabiliser la fréquence optique du signal, détériorée par l'effet Doppler et la turbulence atmosphérique. L'architecture du démonstrateur est présentée en détails, ainsi que les résultats de trois campagnes d'essais qui ont permis de caractériser les performances du lien en conditions réelles. Les différentes configurations testées sur une distance d'environ 300 m ont démontré une stabilité de l'ordre de 10-18 après quelques dizaines de secondes d'intégration, à l'état de l'art des liens

optiques. Ces résultats très prometteurs sont compatibles avec la performance des horloges optiques. Ils ouvrent la voie à l'extension du lien sur des distances kilométriques, et à la réalisation d'une première liaison sol-bord-sol représentative d'une campagne de comparaison d'horloges.

### **Summary :**

The extremely high frequency accuracy of optical clocks ( $10^{-18}$  in relative value) paves the way for numerous applications in fundamental physics, navigation, and geodesy. These applications require the implementation of links that allow the comparison of distant clocks without degrading their performance. In Europe, the REFIMEVE metrological fiber network connects laboratories over distances of up to 1000 km and disseminates an ultrastable optical signal. The current development of transportable optical clocks opens the way to metrological experiments outside laboratory settings. In particular, chronometric geodesy involves mapping the gravitational potential by comparing clocks that may be far from the existing network. This manuscript presents the development of TOFU (Transfert Optique de Fréquence Ultrastable – Ultrastable Optical Frequency Transfer), a free-space optical link demonstrator designed to transfer ultrastable clock signals through the atmosphere. To eventually cover ground distances on the order of 10 to 100 km, the signal is relayed by an airborne platform suspended from a helium-filled tethered balloon, allowing it to bypass obstacles. The first challenge of this link is to ensure the stability of the transmitted optical power by maintaining accurate pointing between the ground-based emitter and the airborne receiver, despite the balloon's movements. The second challenge is to stabilize the optical frequency of the signal, which is affected by Doppler shifts and atmospheric turbulence. The demonstrator's architecture is presented in detail, along with the results of three test campaigns that allowed the system's performance to be evaluated under real conditions. The various configurations tested over a distance of approximately 300 meters demonstrated a stability on the order of  $10^{-18}$  after a few tens of seconds of integration, reaching the state-of-the-art level for optical links. These very promising results are compatible with the performance of optical clocks. They pave the way for extending the link to kilometer-scale distances and for achieving a first ground-to-air-to-ground connection representative of a clock comparison campaign.