

---

## Sujet de thèse : Liens optiques fibrés pour les comparaisons internationales d'horloges optiques et micro-onde

**Contexte** : La distribution et la comparaison d'étalons de fréquence optique ultra-stables et d'échelle de temps ont été grandement améliorées depuis dix ans par l'emploi de fibres optiques. La stabilité de fréquence et l'exactitude des liens optiques fibrés surpassent de plusieurs ordres de grandeur les méthodes bien établies fondées sur les communications satellitaires.

Les recherches conduites conjointement au LNE-SYRTE (Systèmes de Références Temps-Espace, Observatoire de Paris, Paris) et au Laboratoire de Physique des Lasers (Université Paris 13, Villetaneuse) ont pour objectif de mettre au point un ensemble de liaisons optique pleinement bi-directionnelles pour transférer une référence de fréquence optique par les fibres optiques du réseau Internet, sans dégradation significative de ses performances métrologique. Aujourd'hui deux liaisons avec les instituts de métrologie allemand et anglais sont aujourd'hui établies, combinant des chaînes d'amplificateurs optique et des stations laser de régénération opérées à distance. Le réseau continue de se développer, notamment dans le cadre du projet REFIMEVE+ des Investissements d'Avenir, un équipement d'excellence qui vise à délivrer une référence de fréquence optique à une vingtaine de laboratoires répartis sur tout le territoire métropolitain via le réseau Internet de RENATER. Le programme de recherche européen OFTEN programme sur 3 ans la comparaison régulière des horloges optiques et micro-onde entre les instituts de métrologie anglais, allemand et français par lien optique fibrés. La comparaison des résultats servira également aux campagnes de comparaison programmées avec les méthodes satellites de pointe spécifiquement développées pour la mission spatiale ACES. L'ensemble du travail vise à établir pour la première fois un ensemble de comparaisons des horloges optiques développées en Europe avec une résolution de comparaison inférieure à  $10^{-18}$ , à oeuvrer vers une redéfinition de la seconde du Système International d'unités, à rechercher les éventuelles variations temporelles des constantes fondamentales et les effets relativistes affectant la fréquence des horloges.

### **Contenu de la thèse :**

**Travail expérimental** : La réalisation des campagnes de comparaisons demande l'implémentation d'un système opto-électronique complexe abouti et fiable, opérationnel à la demande pour des campagnes de mesures de près d'un mois, impliquant des lasers ultra-stables, plusieurs boucles à verrouillage de phase et le contrôle des synthèses de fréquence, ainsi que des systèmes interférométriques de détection ultra-stables et bas bruit. Le ou la doctorant(e) aura à charge de développer et tester de nouveaux systèmes interférométriques pour les besoins de l'expérience, la recherche des limites fondamentales et techniques, et à comparer et interpréter les résultats.

**Modélisation** : Un travail important est à accomplir pour augmenter la robustesse des liens optiques : basé sur une analyse fine du modèle de propagation et de la compensation des bruits, il faut mettre en place des outils de diagnostic astucieux et une procédure d'optimisation du lien optique en maintenant le point de fonctionnement optimal.

Traitement de données : La multiplication des liens demande un traitement automatisé des données, pour la production, l'archivage dans une base de données, et l'analyse des résultats, ainsi que pour le diagnostic des défauts et des pannes.

Exploitation des données : l'exploitation scientifique des données des liens et des données des campagnes de comparaison, pour les confronter à des modèles théoriques.

Communication scientifique : Rédaction d'articles dans des revues à comité de lecture et présentation des résultats à des conférences internationales.

Profil/compétences recherchées :

- Fort goût pour l'instrumentation et la technique
- Optique, optique guidée, lasers
- Traitement du signal, traitement de données, modélisation, simulation numérique
- Cours général en physique fondamentale
- Techniques de contrôle distant
- Anglais fluide

Encadrement : Au sein du groupe Fréquence Optique du LNE-SYRTE, l'équipe de recherche est constituée d'un ingénieur de recherche senior, d'un astronome, un ingénieur de recherche confirmé, une ingénieure projet, d'une post-doc, d'une doctorante. L'équipe travaille en étroite collaboration avec l'équipe du Laboratoire de physique des lasers constituée d'une professeure, d'un ingénieur de recherche sénior, d'une post-doctorante, et d'un ingénieur.

Situé à l'Observatoire de Paris, le SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace - est une unité mixte de recherche (UMR 8630) du CNRS, de l'Observatoire de Paris - PSL Research University et de l'Université Pierre & Marie Curie (Paris 6) - Sorbonne Universités. Le SYRTE est un laboratoire pluridisciplinaire alliant plusieurs compétences transverses - théorie, instrumentation, traitement et analyse de données, au service de ses objectifs qui vont de la physique fondamentale jusqu'au transfert industriel.

Le LNE-SYRTE est chargé par le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) de la responsabilité des références nationales de temps et de fréquence.

La thèse est financée à 100 % sur contrat de recherche.

**Pour en savoir plus :**

Site web du SYRTE : <https://syрте.obsрm.fr>

Site web de l'équipe : <https://syрте.obsрm.fr/spip/science/fop/experiences/article/liens-optiques-ultra-stables>

- Article en français paru dans Reflets de la Physique : <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/20164748091>
- Articles récents en anglais :
  - Nature Comm. 12443 (2016), doi:10.1038/ncomms12443 « A clock network for geodesy and fundamental science »
  - Phys. Rev. L. (2017, accepté), arXiv:1703.04426 « Test of special relativity using a fiber network of optical clocks »
  - Metrologia (2017, accepté), Metrologia, Volume 54, 3, « First international comparison of fountain primary frequency standards via a long distance optical fiber link »
  - Appl. Phys. B. (2017, accepté), Lee et al., Appl. Phys. B (2017) 123: 161. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6736-5>