



---

Sujet de Stage 2021

**Élève-Ingénieur(e) ou Étudiant(e) en Master Optique, Photonique,  
Optoélectronique, Télécommunications optiques**

## Etude d'un banc de mesure du couplage Tilt-to-Length pour la caractérisation des bancs optiques de la mission LISA de détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles

Laboratoire ARTEMIS – Observatoire de la Côte d'Azur – Nice, France

---

**Mots clefs :** mesure de phase optique, mesure de front d'onde, interféromètre de Mach-Zehnder fibré, modulation de phase, stabilisation de puissance, asservissement

Contexte du stage :

### Introduction – la détection des ondes gravitationnelles

« Il ne fait aucun doute que le domaine des ondes gravitationnelles, aussi bien théorique qu'expérimental, va exploser dans les années à venir ». Cette prophétie ponctuait les demandes de budget auprès des potentiels financeurs dès 2017. Depuis lors les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles Virgo et LIGO ont récolté une moisson de détection<sup>1</sup>, avec des événements inédits comme la détection de trous noirs de masses intermédiaires dont aucun modèle ne sait prévoir la formation (**GW190521**), ou de coalescence de binaire d'étoiles à neutron de masses jamais observées jusqu'alors (GW190425), de coalescence entre deux trous noirs de masses excessivement différentes.

Par ailleurs le projet homologue LISA (Laser Interferometer Space Antenna) de détecteur spatial d'ondes gravitationnelles sélectionné par l'ESA doit être accepté en 2023, à l'issue d'une phase dite « A » de démonstration des principes de fonctionnement.

#### 1. Cadre général

La France (via le CNES) a endossé la responsabilité de l'intégration et de l'assemblage des bancs optiques de LISA. Ce travail se fera avec l'aide d'un industriel, seul capable de fournir les infrastructures compatibles avec les exigences de propreté, stabilité, mais aussi et surtout exigence sur le volume suffisant pour intégrer et valider l'ensemble des six bancs optiques dans un temps imparti. Les laboratoires de recherche impliqués dans le projet, et l'équipe ARTEMIS en particulier, ont été sollicités pour établir et démontrer les procédures d'assemblage, d'intégration et de vérification des performances des instruments. La vérification des performances implique le développement d'outils de caractérisation originaux. ARTEMIS a ainsi la charge de développer un démonstrateur pour la mesure du couplage Tilt-to-Length<sup>2 3</sup> des bancs optiques de LISA (banc TTL-OB). Ce couplage, inévitable, sera partiellement compensé par la mise en œuvre de moyens opto-mécaniques, mais nécessite une connaissance précise de sa valeur. Les fluctuations résiduelles de position du

---

<sup>1</sup> Abbott *et al.* LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 – Published 11 February 2016

<sup>2</sup> TTL: couplage d'une perturbation angulaire qui affecte les faisceaux incidents du fait des mouvements résiduels des satellites convertie en fluctuation longitudinale

<sup>3</sup> « Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer », M. Chwalla, *Phys. Rev. Applied* **14**, 014030 – Published 10 July 2020

satellite (rotations de quelques 10 nrad/sqrt(Hz)) sont la source de bruits qui se coupleront inévitablement dans le signal scientifique par le biais du TTL. Il est donc fondamental, pour la réussite de la mission LISA, de réduire, et donc de mesurer précisément ce couplage pour éviter qu'il ne masque irrémédiablement le signal scientifique. Une erreur trop importante sur cette mesure rendrait caduque la mission LISA.

## 2. Principe du banc démonstrateur TTL\_OB

Le banc de mesure TTL-OB doit délivrer un faisceau simulant le faisceau incident sur les satellites de LISA et qui sera affecté d'un tilt connu (10 nrad). Ce faisceau est dit « Rx ». Le tilt se déploie autour d'un point de pivot précisément localisé sur le banc. Un second faisceau, dit « LO », fixe, sera émis en parallèle du faisceau Rx. Il servira de référence de phase pour ce dernier. L'ensemble va illuminer le banc optique de LISA afin de réaliser la mesure du couplage TTL (soit, le déplacement longitudinal induit par le tilt de Rx, donc le déphasage induit entre les faisceaux Rx et LO).

La sensibilité requise impose d'aligner les faisceaux entre eux ainsi que le point de pivot de façon pérenne et à mieux que 0,4 microns près. La mesure des angles des faisceaux entre eux est obtenue par une lecture des signaux délivrés par une photodiode segmentées à 4 quadrants et sur la base d'un schéma de modulation et détection hétérodyne. La mesure de la phase sur l'ensemble des 4 quadrants permet de remonter à la mesure précise de la perturbation angulaire qui affecte le faisceau Rx (par la différence des signaux des quadrants) ainsi que le déphasage global entre les 2 faisceaux (piston) par la somme des signaux des quadrants.

Les niveaux de phase détectés ne sont que de quelques centaines de microradians (100 microcycles), modulés entre 1 et 10 MHz et pour des niveaux de puissance optique de quelques centaines de microwatt.

Ces mesures seront dégradées par les couplages aux entrées multiples de l'expérience. Ainsi, entre autres spécifications requises pour minimiser ces couplages, le faisceau Rx devra présenter un profil de type flattop en phase et en amplitude. Il s'agira donc de mettre en œuvre un tel faisceau, le caractériser ainsi que sa contribution au couplage résiduel.

Ce type de mesures a été réalisé en 2017 et décrit dans la thèse de S. Schuster <sup>4</sup>. Les performances visées ici sont de deux ordres de grandeurs plus sensibles.

### Objectifs du stage :

L'objectif du stage est de contribuer à la mise en œuvre et à la compréhension des limites du banc TTL-OB. Certains des axes abordés sont décrits ci-dessous mais la liste n'est pas exhaustive et d'autres sujets pourraient être abordés selon l'intérêt du candidat :

- L'interprétation des signaux relatifs aux positions des différents composants, et des faisceaux Rx et LO, de leur phase respective et de l'ensemble des couplages de ces signaux. La finalité étant d'en déduire les limitations ultimes de ce montage
- Proposer et mettre en œuvre des améliorations permettant de réduire les couplages délétères entre les signaux
- Mettre en œuvre les asservissements de position des faisceaux par l'usage de moteurs piézo-électriques pour le positionnement des faisceaux et de photodiodes segmentées pour la lecture de la position. L'asservissement sera de type numérique plutôt qu'analogique
- Caractériser la qualité de front d'onde des faisceaux

**Laboratoire d'accueil :** Observatoire de la Côte d'Azur, Equipe ARTEMIS, Boulevard de l'Observatoire, B.P. 4229, F-06304, NICE Cedex 4

---

<sup>4</sup> « Tilt-to-length coupling and diffraction aspects in satellite interferometry », S. Schuster, PhD, Hanover

**Durée du stage :** Stage de 6 mois de préférence, de niveau M2. Un étudiant de niveau M1 particulièrement motivé serait le bienvenu. Le stage peut commencer dès le mois de novembre 2021

**Encadrement :** Frédéric Cleva, Ingénieur de recherche, [cleva@oca.eu](mailto:cleva@oca.eu) , Tel. : 04 92 00 31 97

**Connaissances et compétences abordées :**

L'étudiant devra disposer d'une base solide en optique, lasers et photonique ainsi qu'une bonne connaissance des langages python, matlab.

Techniques ou méthodes abordées: Interférométrie optique (homodyne, hétérodyne); Modulation/démodulation d'un laser ou d'un faisceau; Caractérisation spectrale (électrique et optique); contrôle d'appareil de mesure automatisé.



Observatoire  
de la CÔTE d'AZUR



Membre de UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR



MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION NATIONALE,  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE