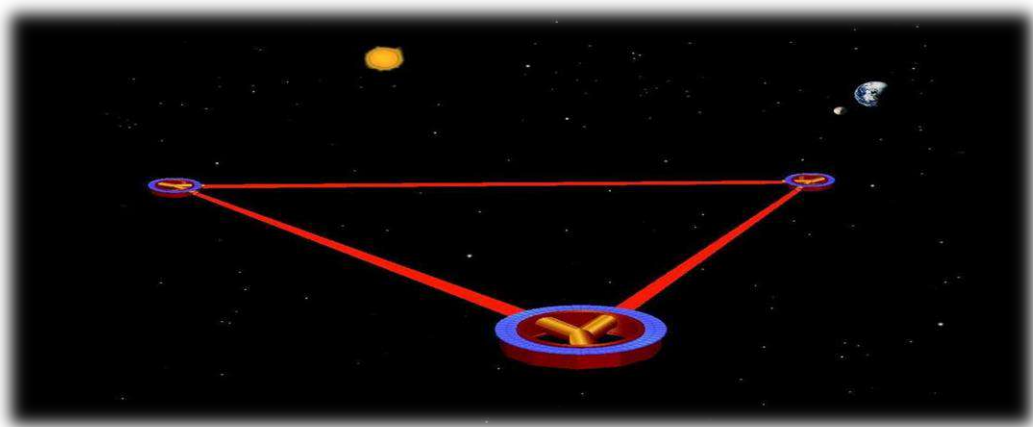


Développement d'un banc lasers
Pour les tests d'interférométrie optique de grande résolution
Pour les tests sol du payload de la Mission spatiale LISA

Observatoire de Paris (SYRTE)



07 AOUT 2019

ZAHAR Kenza

Remerciements :

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je souhaite avant tout adresser ma reconnaissance envers mon compagnon qui a été le premier à m'inciter à opter pour ce stage, je le remercie chaleureusement pour son soutien moral, intellectuel et pour sa forte présence tout le long de ce stage.

Je tiens à remercier particulièrement mon responsable de stage, Monsieur Ouali Acef, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion et à accroître ma passion pour ce champ d'investigation autour de l'optique et la physique du laser.

Un grand merci à Monsieur José Pinto et Monsieur Michel Lours du laboratoire d'électronique pour le temps qu'ils ont consacré à nous réparer le matériel électronique au milieu d'une énorme surcharge de travail.

Je me dois aussi de saluer sincèrement Monsieur Jean-Pierre Aoustin du laboratoire de mécanique, pour les différentes tâches qu'il a accompli pour nous.

Je remercie spécialement le doctorant Joannes Barbara présent dans le même laboratoire que moi pour sa disponibilité et ses conseils en lui souhaitant toute la réussite dans ses travaux pour sa thèse.

Je désire aussi remercier mes parents qui malgré la distance ont toujours été là pour moi. Je remercie dans le même élan mes frères et sœurs dont Nanas pour leurs encouragements.

Pour finir, que mes deux co-locataires qui m'ont supporté tout ce temps durant, profitez de ce temps de répit en leur précisant que je me lance bientôt dans un travail de thèse...

Sommaire :

| | |
|---|-----------|
| <i>Introduction.</i> | <u>1</u> |
| <i>Objectif de stage</i> | <u>2</u> |
| <i>Réalisation expérimentale.</i> | <u>3</u> |
| <i>Asservissement en puissance.</i> | <u>7</u> |
| <i>Résultats.</i> | <u>8</u> |
| <i>Difficultés rencontrées.</i> | <u>12</u> |
| <i>Conclusion.</i> | <u>12</u> |

Introduction :

LISA (Laser Interferometer Space Antenna) est une [mission spatiale](#) conjointe de l'[Agence spatiale européenne](#) (ESA) et l'agence spatiale américaine (NASA). L'objectif est de détecter des [ondes gravitationnelles](#) de basse fréquence depuis l'espace. Il s'agira du premier observatoire spatial d'ondes gravitationnelles. LISA consiste en une [constellation de trois satellites](#) en [orbite héliocentrique](#) formant un [triangle équilatéral](#) de 2,5 millions de kilomètres de côté, dont les trois bras sont reliés par [6 faisceaux laser](#). La mission LISA est conçue à partir de 1997 comme une collaboration entre l'ESA et la [NASA](#) (agence spatiale américaine). Elle a été sélectionnée par l'ESA le 20 juin 2017 comme mission L3 du programme [Cosmic Vision](#), pour un lancement prévu en 2034.

Dans le cadre de ce développement multinational, la France est en charge des aspects tests et intégration de l'instrument (payload). C'est ainsi que le SYRTE (laboratoire Systèmes de Référence Temps – Espace) est sollicité pour fournir deux bancs lasers distincts pour mener les tests sol du payload de la mission :

- Le premier est constitué de deux lasers opérant à 1064 nm (longueur d'onde nominale de LISA), asservis en phase entre-eux et stabilisés en puissance optique de sortie. Ce premier banc lasers, qui constitue mon travail de stage, sera fourni au CNES (maître d'œuvre du projet) en novembre 2019, dans le cadre de la contribution du SYRTE pour la phase A du projet LISA. Le laser master de ce tandem de lasers stabilisés en phase est libre en fréquence. Seule la différence de fréquence entre ces deux lasers est maintenue constante via une boucle d'asservissement en phase. Ils seront utilisés pour mener des tests d'interférométrie optique de grande précision, par différents partenaires du consortium LISA-France, qui, outre le SYRTE, est composé d'une quinzaine de laboratoires du CNRS ainsi que le CEA et le CNES. Les mesures de stabilité de chemins optiques qui seront menés lors de cette phase A, seront limitées en stabilité par celle du laser master de ce premier banc qui opère en mode libre.
- Le deuxième banc, qui sera développé et délivré par le SYRTE au consortium LISA-France à partir de 2023 (phase B de la mission LISA), constituera une référence de fréquence ultra-stable et servira à stabiliser en fréquence les deux lasers à 1064 nm, image de ceux opérant sur deux satellites distants de LISA.

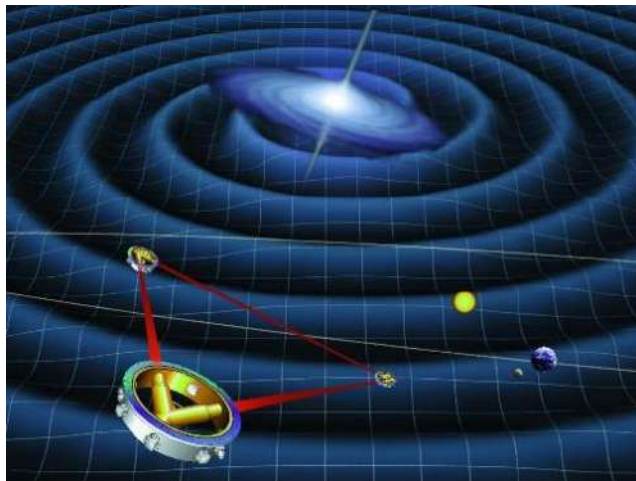


Figure 1: Représentation de LISA détectant des ondes gravitationnelles dans l'espace

Objectif du stage :

Développer un banc de deux lasers à 1064 nm, entièrement fibré, afin de faciliter son transport et son utilisation par les différents partenaires du consortium LISA-France. Ainsi, aucun réalignement optique ne sera nécessaire lors des différents déplacements inter-laboratoires.

Spécifications :

- Puissance de sortie du banc optique pour chaque laser après stabilisation = 1 mW à 10 mW.
- Faisceaux lasers polarisés linéairement.
- Stabilité de puissance meilleure que 10^{-3} en valeur relative (TBC).
- Battement de fréquence compris entre 5 MHz et 25 MHz, contrôlable via une boucle d'asservissement en phase (issus des spécifications de LISA, et correspondant au décalage de fréquence par effet Doppler entre deux satellites). La réalisation de cette spécification ne fait pas partie de mon stage, par manque de temps.

Le banc totalement fibré, comprend :

- Deux lasers à 1064 nm, fibrés PM, délivrant respectivement 400 mW (laser Nd : YAG) et 100 mW (laser à fibre dopée Ytterbium), existants au laboratoire SYRTE, et mis à la disposition du consortium LISA-France.
- Deux modulateurs acousto-optiques, opérant à la fréquence RF de 110 MHz.
- Six photodiodes en InGaAs, fibrées PM, pour la stabilisation en puissance et en phase. Pour chacune des opérations, une photodiode est utilisée pour l'asservissement, la seconde pour le contrôle (mesure Outloop).
- Des coupleurs optiques PM et SM (75/25, 50/50, 90/10).
- Des isolateurs optiques placés notamment devant les photodiodes InGaAs.
- Deux polariseurs fibrés (taux d'extinction > 23 dB).

Au fur et à mesure du développement du banc optique, il s'est avéré nécessaire d'introduire de composants simplement monomodes (SM) et non plus à maintien de polarisation (PM), qui se sont avérés plus sensibles à la température. En effet, une fois que le rack optique est fermé, la température à l'intérieur passe de +23 °C (température du laboratoire) à +36 °C. Cette élévation de température est due à la présence des AOM et des photodiodes amplifiées. La puissance totale dissipée est estimée à 7 W.

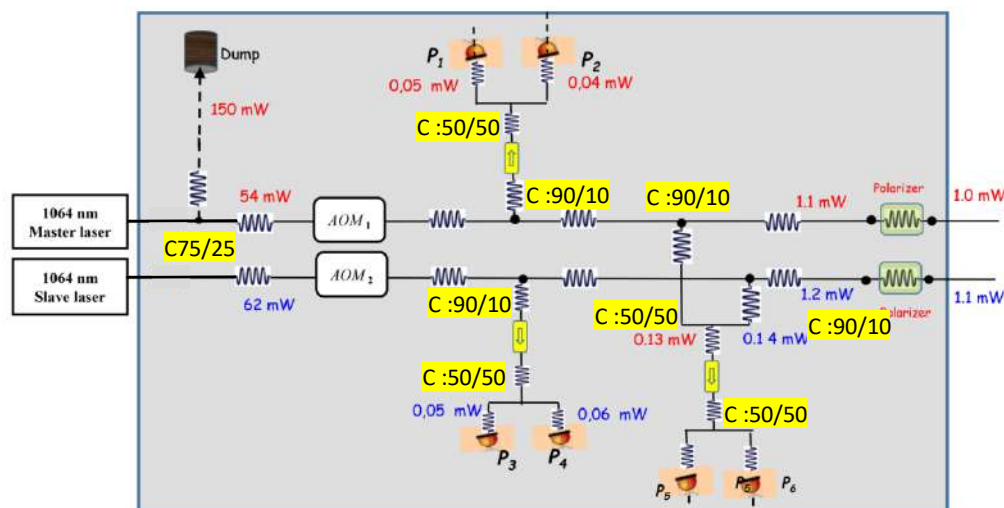


Figure 2 : Schéma de principe du banc lasers asservis en phase et en puissances optiques de sortie (version 1)

Réalisation expérimentale :

A mon arrivée, l'ensemble des composants optiques venaient juste d'être livrés. Ma première tâche a consisté à identifier les différents éléments impliqués dans le schéma de principe ci-dessus, et à les implémenter sur un banc expérimental que j'ai entièrement développé (Figures 3, 4, 5). Le banc optique est constitué de deux plaques (breadboard) montées en étages (cf : figure 3 & 4). Ce choix nous a permis d'insérer l'ensemble du dispositif optique (hors lasers) dans un rack de type 19'' (Figure 5). Pour éviter l'impact des flux d'air qui passeraient par les trous du breadboard (Fig. 5) sur les fibres optiques, j'ai isolé les 2 breadboard à l'aide de feuille de mylar, placées sur les faces inférieures. Les éléments de pilotage électroniques (asservissements, contrôles) sont localisés en dehors de ce rack 19 ''.



Figure 3 : 1^{er} étage du banc optique contenant les deux AOM et les coupleurs et isolateurs

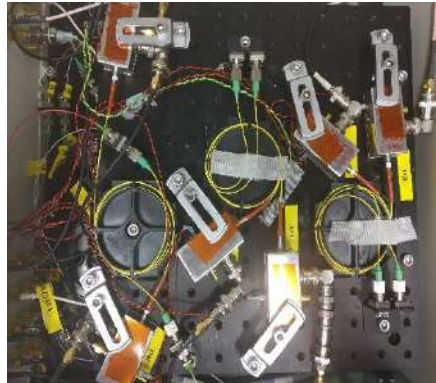


Figure 4 : 2^{ème} étage du banc optique contenant les six photodiodes

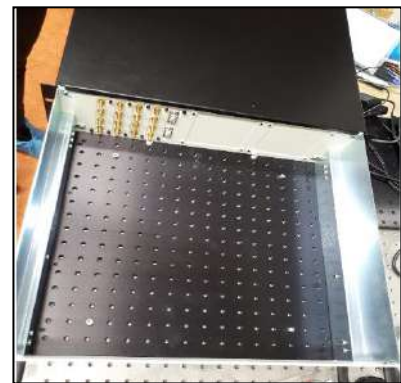


Figure 5 : rack de type 19''

- Le montage du banc optique m'a pris énormément de temps car il faut manipuler soigneusement les fibres, elles sont très fragiles et elles se cassent très facilement. De même, il faut vérifier le taux de couplage à chaque fois (pertes d'insertion) avant de l'utiliser. Afin d'optimiser la compacité du banc complet, il a fallu disposer soigneusement et coupler entre eux l'ensemble des composants. Cette opération permet de minimiser le volume du banc, et par suite de minimiser les gradients de la température à l'intérieur du banc. Cette opération a par ailleurs nécessité d'approvisionner et de changer régulièrement ces composants (coupleurs, isolateurs, etc ...).
- Le montage du banc a nécessité de nettoyer régulièrement toutes les fibres optiques, soit simplement en utilisant du papier optique, soit en utilisant l'alcool. Il m'est aussi arrivé de polir les fibres optiques dans certains cas, à l'aide de feuilles de polissage dédiées achetées chez Thorlabs.

1. Fonction des différents éléments optiques impliqués dans le banc :

- Pour le nettoyage des fibres, j'ai utilisé un microscope, pour évaluer la qualité de la fêrle de la fibre optique et de procéder par la suite au polissage quand il s'est avéré nécessaire (figure 6).



Le banc optique dans son ensemble est conçu (à l'origine) pour ne recevoir que des composants à maintien de polarisation PM (fibres, coupleurs, isolateurs). De même, les deux modulateurs acousto-optiques et les six photodiodes InGaAs sont fibrés PM. Ces composants sont décrits ci-dessous.

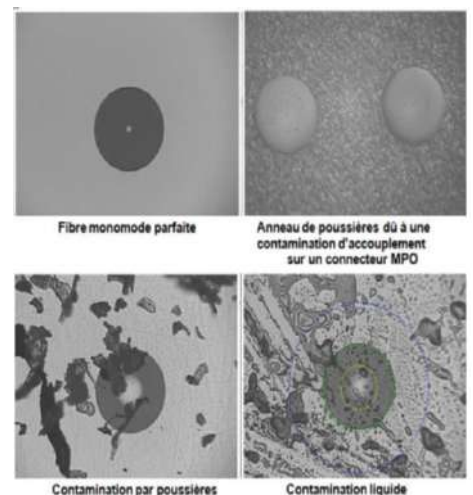
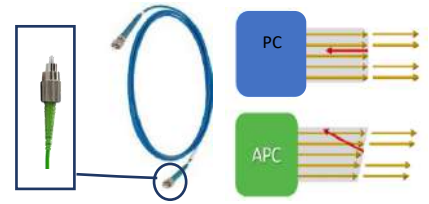


Figure 6 : Images de fêrles de fibres optiques propres (en haut à gauche) et polluées (en haut à droite et en bas)

- **Les fibres optiques :**

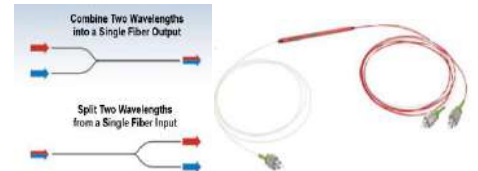
Elles sont toutes à maintien de polarisation, connectées en FC/APC. Il existe plusieurs types de fibres selon leurs ferrules, au cours de mon stage j'ai utilisé des fibres de ferrule type : FC/APC, qui diffère de FC/PC par une inclinaison de 8° , qui permet à la lumière réfléchie de ne pas revenir dans la même direction que la lumière émise, ce qui se traduit par l'apparition de fluctuations de la puissance dues au retour de la lumière (feedback optique en anglais).



- **Les coupleurs :**

Ils permettent de diviser ou de combiner deux ou plusieurs faisceaux laser.

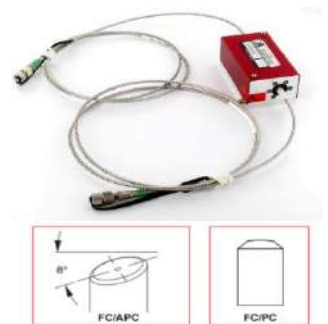
Les principaux taux de couplage utilisés lors de mon stage sont : 75/25, 50/50 et 90/10 (référence Thorlabs PN1064R2A1).



- **Les modulateurs acousto-optiques (AOM) :**

Ils constituent un élément essentiel pour la stabilisation en puissance des faisceaux laser. La puissance optique d'entrée et de sortie se fait à l'aide de fibres optiques PM, associées à des connecteurs FC/APC.

Une onde radiofréquence (RF), à 110 MHz dans notre cas, est appliquée au barreau de TeO₂ qui constitue l'AOM. Celle-ci crée une onde progressive dans le cristal de TeO₂, qui défléchit l'onde optique incidente, selon plusieurs ordres de diffraction comme indiqué sur la figure ci-contre.



Dans le cas d'un AOM fibré, seul un ordre de diffraction est couplé dans la fibre optique de sortie. Dans notre cas la fréquence de l'ordre diffracté est $F_D = F_L + F_{RF}$ où :

- F_L est la fréquence de l'onde incidente (~ 281 THz)
- F_{RF} est la radio fréquence appliqué sur le cristal (110 MHz)
- F_D est la fréquence de l'onde laser diffractée.

Les deux AOM impliqués dans ce montage proviennent de chez A&A (MT110-IR20-F10-PM5).

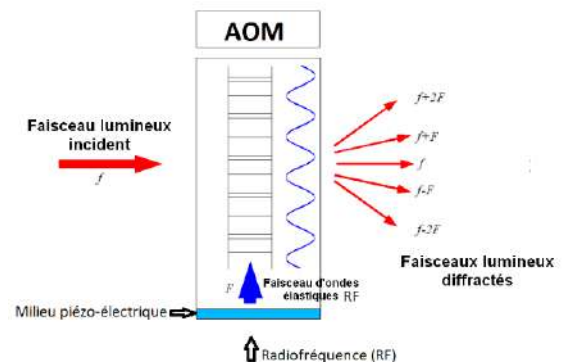


Figure 7 : fonctionnement de l'AOM

- **Les polariseurs :**

Polariser la lumière laser incidente selon un axe principal. Le taux habituel de polarisation est de l'ordre de 23 dB (rapport entre les deux composantes de puissance qui se propagent selon les deux axes de la fibre).

Référence : ILP1064PM-APC



- **Les isolateurs optiques :**

Basés sur l'effet Faraday, ils permettent d'éviter le retour inverse de la lumière (feedback). L'effet Faraday décrit l'interaction entre la lumière laser avec un champ magnétique dans un matériau. Plus précisément, le champ magnétique produit une rotation de la polarisation de la lumière qui se propage dans le matériau. Un polariseur placé en amont du matériau permet de bloquer un possible faisceau réfléchi par un quelconque élément situé en aval du matériau. Référence Thorlabs : IO-G-1064-APC

- **Les enrouleurs :**

Ils permettent de fixer les fibres optiques dans une configuration mécanique stable.



- **Les photodiodes :**

Elles sont de type InGaAs, fibrées, optimisées pour une utilisation dans l'infrarouge (IR). La réponse pour la longueur d'onde de 1064 nm est de 0,7 A/W (donnée constructeur). La puissance optique que j'utilise dans le banc optique est de 100 μ W environ. Le courant généré par cette photodiode est donc de 70 μ A. Une électronique bas bruit développé par le service électronique du SYRTE, permet de convertir ce courant en une tension de l'ordre de 2 V. La réponse globale des photodiodes est donc de 20 mV / μ W.

2. Premier étage de montage :

- **Alimentation des AOM :**

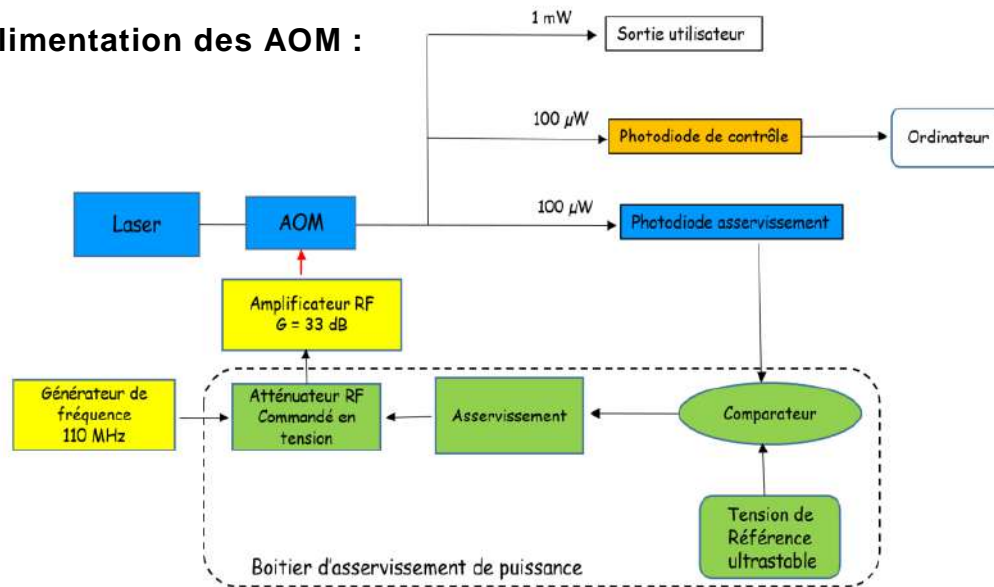


Figure 8 : Schéma de principe de stabilisation de la puissance optique d'un laser

Le signal radiofréquence en sortie du générateur de fréquence est à 110 MHz, avec une puissance de l'ordre 3 dBm (2 mW). Le fonctionnement des AOM nécessite une puissance voisine de 500 mW. Un amplificateur RF est donc nécessaire, et placé entre le générateur et l'AOM.

- Alimentation-des amplificateurs 1 et 2 des deux AOM :

Ampli 1: $I_1=0.44$ A, $V=24$ V

Ampli 1+2: $I_{12}=I_1+I_2=0.91$ A, $V=24$ V

Ces deux amplificateurs RF sont placés à l'extérieur du banc optique.

- Consignes de générateur de fréquence RF :

Fréquence utilisée pour les deux AOM = 110 MHz (fréquence optimisée par le constructeur).

Puissance RF variable de -30 dBm à 0dBm.

- **Calibration de la puissance émise par les deux lasers :**

Mon banc optique contient deux lasers, un laser master solide de type Nd : YAG, et un laser slave de type fibre dopée Yb. La caractérisation de la puissance émise par un laser revient à chercher les points de fonctionnement de celui-ci notamment son seuil de fonctionnement. Pour cela, on augmente l'intensité du courant et on mesure la puissance émise. Les résultats montrent qu'en dessous du seuil, la puissance des deux lasers est nulle, et qu'au-dessus du seuil, elle augmente avec l'intensité du courant.

Le seuil d'intensité pour L_M (laser master) est de 0.505 A, et celui de L_S (laser slave) est de 0.05 A (figure 9).

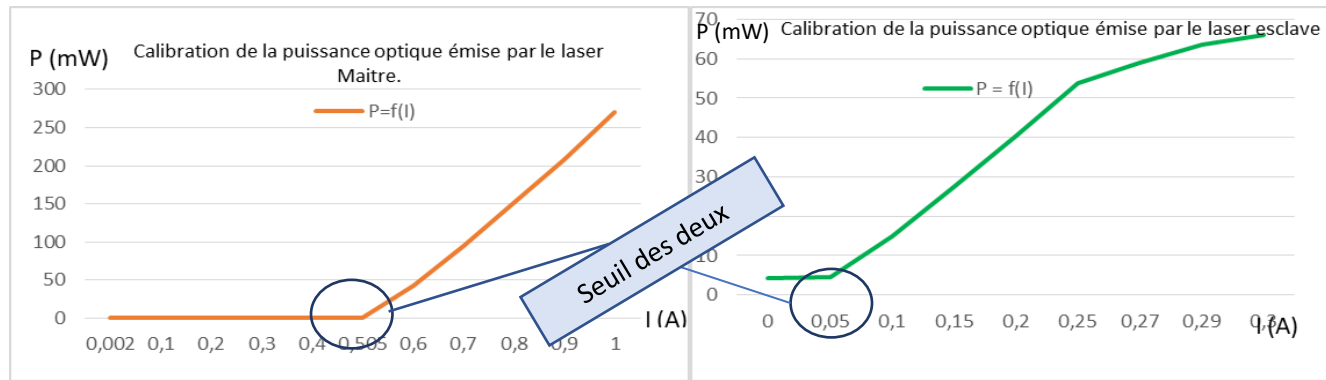


Figure 9 : Calibration de la puissance émise par les deux lasers M et S

- L'objectif du travail est de fournir un banc laser qui fournira une puissance optique stabilisée pouvant varier entre 1 mW et 10 mW pour chacun des deux lasers (spécifications)

Pour avoir 10 mW en sortie de banc optique : $I=1.26\text{A}$ (Master) et $I=0.397\text{A}$ (Slave).

Pour avoir 1 mW : $I=0.6\text{A}$ (Master) et $I=0.087\text{A}$ (slave)

On fixe ces paramètres et on mesure la puissance incidente sur chaque composant utilisé, essentiellement sur les photodiodes (P_{max} est de 5 mW sur les photodiodes).

J'ai travaillé principalement pour avoir 1 mW en sortie du banc optique. Dans ce cas, la puissance incidente sur les photodiodes est de 100 μW (voir paragraphe précédent sur les photodiodes). Pour le cas 10 mW en sortie du banc

- Test de diffraction des deux AOM utilisées (caractérisation des AOM) :**

J'ai commencé par caractériser l'efficacité conversion des deux modulateurs AOM. Il s'agissait de mesurer la puissance optique diffractée à l'ordre 1 ($F_D = F_L + F_{RF}$) en fonction de différentes valeurs de la puissance RF, pour une puissance optique incidente constante :

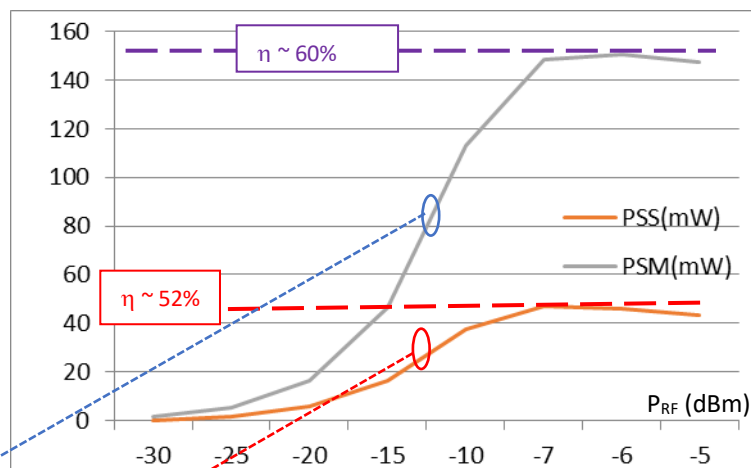
La puissance optique incidente a été fixée à 240 mW pour le laser master, et 80 mW pour le laser slave.

J'ai fait varier la puissance RF de -30 dBm à -5 dBm en sortie du générateur de fréquence à 110 MHz. Sachant que les deux amplis RF ont un gain de +33 dB, la puissance RF injectée dans les AOM varie donc de +3 dBm (2 mW) à +28 dBm (630 mW).

Le résultat de cette caractérisation est donné par la figure 10 ci-dessous.

Les résultats montrent que la puissance P_s des deux lasers master (P_{SM}) et slave (P_{SS}) augmentent avec la puissance P_{RF} jusqu'à une valeur maximale de P_{RF} de -7 dBm puis la P_s des deux lasers commence à diminuer.

Idéalement on doit travailler avec P_{RF} d'environ de -12 dBm, ce qui représente le meilleur point de fonctionnement des deux AOM, car c'est ici que la pente de la puissance P_s est la plus importante pour les deux lasers, l'efficacité correspondante est alors de 30 %.



- En absence de la RF, la puissance d'ordre « 0 » des deux AOM est de :
 $P=41.5\text{ nW}$ pour le Slave
 $P=181.4\text{ nW}$ pour le master

Efficiency ~ 30 %

Figure 10 : La puissance de sortie des deux lasers Master et Slave en fonction de la puissance RF.

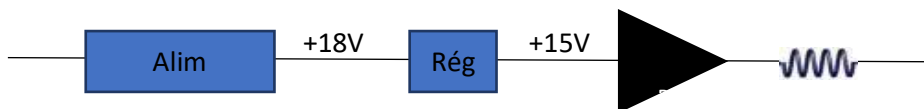
3. Deuxième étage du montage :

Le niveau supérieur du montage optique que j'ai développé ne contient que les photodiodes (voir figure 4) que j'ai alimentées par une alimentation de + 15 V. Le courant total consommée par les six photodiodes est de 355 mA. La puissance électrique totale consommée par ces 6 photodiodes disposées sur ce plateau optique est de 5.3W, Cette puissance électrique est transformée en chaleur dans le banc optique

J'ai été amené à faire moi-même toutes les soudures des câbles, du régulateur et y compris celles du filtrage des alimentations.



Filtrage de l'alim + 15V



Asservissement en puissance :

1. Branchement :

Comme indiqué sur la figure 2, on utilise les photodiodes P1 et P3 pour asservir les puissances optiques du laser master et du laser slave respectivement. Les photodiodes P2 et P4 sont utilisées pour le contrôle (outloop) de ces opérations de stabilisation.

Chacune de ces photodiodes ne reçoit que la puissance optique issue d'un seul laser. Les photodiodes (P5 et P6) servent pour l'asservissement en phase du laser slave sur le laser master, et le contrôle de l'action. Elles reçoivent donc les deux faisceaux laser en même temps. J'ai installé ces deux dernières photodiodes mais je n'ai pas travaillé sur la stabilisation en phase des lasers. La stabilisation des puissances optiques a nécessité toute la durée de mon stage.

L'asservissement en puissance dans les boucles 1 ou 2 consiste à garder cette puissance constante avec une stabilisation exigée par le CNES de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} entre 1 s et 1000 s. Le protocole expérimental est donné dans la figure (8).

2. Principe :

Chaque photodiode P1 à P4 convertit la puissance optique qu'elle reçoit en signal électrique. Comme dit dans le paragraphe photodiodes, la conversion est de 2 Volts pour 100 μ W. Cette tension de photodiode est comparée alors à une tension de référence ultrastable. Le signal fournit par cette comparaison sert à asservir la puissance optique reçue par la photodiode, par l'intermédiaire du contrôle de la puissance RF reçue par l'AOM, figure(8)

3. Circuit électrique :

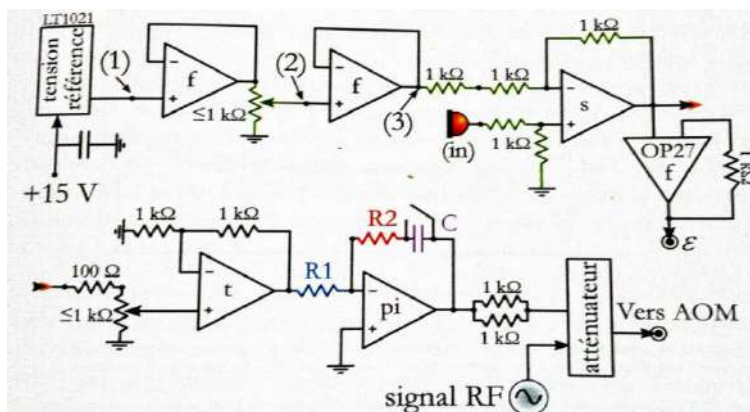


Figure 11 : Schéma du circuit électronique de l'asservissement des puissances lasers, (Extrait de la thèse de F. Tricot (SYRTE, 2018)).

Le banc optique qui est composé exclusivement de composants fibrés, s'est avéré très sensible aux fluctuations de la température extérieure. Pour améliorer la stabilité de puissance, j'ai dû isoler thermiquement le mieux possible mon banc optique. Au début, j'ai mis une couverture en tissu et une autre couverture dite de survie en dessus de banc optique. Par la suite, j'ai fini par le mettre complètement dans une enceinte en bois sous une couverture en tissu et cacher les fibres des deux lasers sous une couverture de survie, figure (12).



Figure 12 : Le banc optique à l'intérieur d'une boîte en bois

4. Appareils de mesure et logiciels utilisés :

La gestion des signaux électriques issus des six photodiodes, ainsi que le signal issu d'une thermistance utilisée pour le contrôle de la température du banc optique sont connectées à une centrale d'acquisition « Agilent » elle-même reliée à un ordinateur. Le logiciel d'acquisition s'appelle « measv_4_1 ». Une fois l'acquisition faite pendant la durée souhaitée, je récupère les données contenant l'ensemble des informations concernant : le voltage de chaque Pi, le temps, la température intérieure et extérieure du banc optique. Je fais mes modifications dans un premier temps avec le logiciel « origine 7,5 », une opération qui consiste à définir l'origine du temps « 0 » et à transformer les températures données en Ohms en Degrés, par une formule donnée par le constructeur de thermistances. En effet, la thermistance est une résistance dont la valeur est sensible à la température. La relation entre la valeur de la thermistance et la température est logarithmique. La valeur de la thermistance à +25°C est de 5000 Ohms. La référence donnée par le constructeur est *NTCLE305E4502S*.

La relation entre la température et la valeur de la résistance de la thermistance est :

$$1/T = A + B \cdot \ln(R_T) + C \cdot [\ln(R_T)]^3$$

Où A, B et C sont des constantes dépendantes du type de thermistance utilisée (données constructeur)

R_T la valeur de la résistance mesurée à une température donnée

T la température correspondante

Puis je passe à l'analyse des données à l'aide d'un second logiciel « stable 32 » pour avoir les deux courbes représentant la variation de la puissance optique en fonction du temps, et la variance d'Allan. La variance d'Allan est un outil mathématique ou estimateur très utilisé en métrologie. Il sert à analyser les fluctuations relatives d'une grandeur physique en fonction du temps d'intégration. Dans mon cas, il me permet d'analyser les fluctuations relatives de la puissance optique dont je moyenne les variations, pour différentes durées d'intégration allant de quelques secondes à quelques milliers de secondes.

Résultats :

Durant ce stage, j'ai beaucoup travaillé à optimiser les paramètres et le mode de fonctionnement du banc optique, de façon à satisfaire les spécifications en termes de stabilité de puissance optique qui est de 10^{-3} en valeur relative, entre 1 s et 1000 s.

Plusieurs expériences sont faites, et plusieurs ont été modifiées dans l'objectif ci-dessus. Je vais me baser sur les résultats majeurs obtenus à partir des expériences importantes quant aux autres expériences notamment celles qui n'ont finalement rien apporté pour la stabilité, elles seront présentées dans l'annexe.

I. Les mesures faites avant l'asservissement :

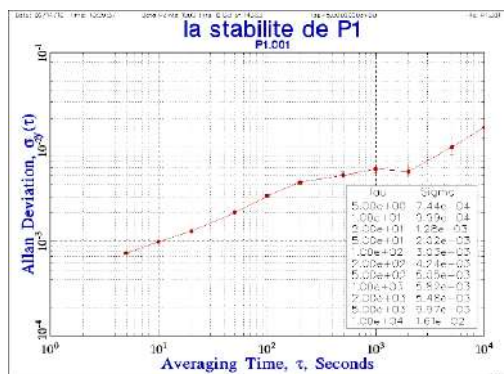
J'ai commencé par évaluer la stabilité intrinsèque de puissance de chacun des lasers (master et slave).

Dans cette partie, le fonctionnement des photodiodes est identique pour chacune des expériences effectuées. Dans ce qui suit, je vous montre des résultats avec quelques photodiodes pour différentes expériences seulement afin de ne pas encombrer le rapport, les photodiodes P1 et P2 appartiennent au laser master, et P3 et P4 au laser slave.

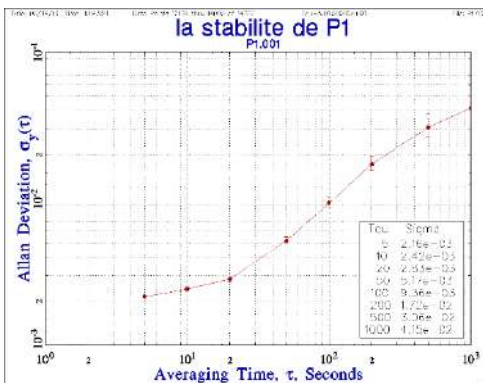
1) La forte dépendance en température :

Ma première expérience consistait à connaître le degré de sensibilité de mon banc optique à la température du laboratoire (la climatisation, les nombreux appareils qui chauffent le labo). Pour cela j'ai lancé deux acquisitions, la première en mettant une couverture sur mon banc optique, et la deuxième sans la couverture.

Les résultats sont comme suit :



Le banc optique est sous une couverture



Le banc optique sans une couverture

J'ai constaté que la puissance des photodiodes fluctue énormément après avoir enlevé la couverture, ce qui se traduit par une stabilité moins bonne. Elle est passée de 7.10^{-4} à 2.10^{-3} à court terme, et de 5.10^{-3} à 4.10^{-2} à long terme (1000s). Donc la couverture est indispensable, je l'ai mise tout au long de mon stage, puis j'ai fini par mettre mon banc optique complètement dans une enceinte en bois sous une couverture en tissu dans la partie asservissement en puissance pour assurer une meilleure isolation encore.

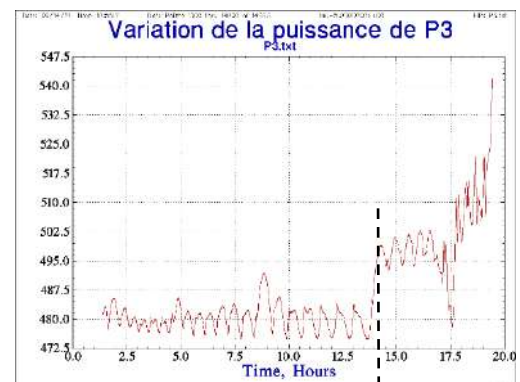
II. Les mesures faites après l'asservissement :

Je travaille avec les photodiodes P2 et P4 qui servent à contrôler la puissance.

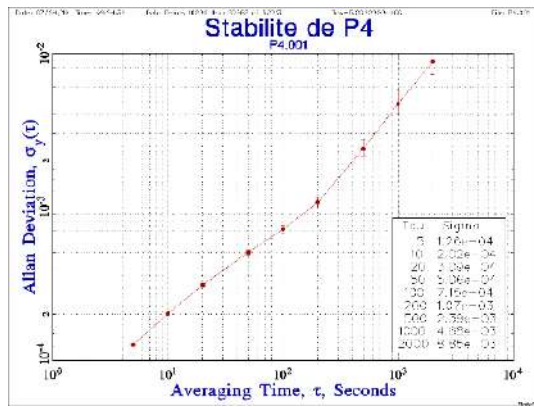
Dans ce qui suit, je cherchais la meilleure stabilité de puissance pour les deux lasers, pour cela plusieurs paramètres à contrôler donc plusieurs acquisitions à lancer.

1) Influence du RIN du laser slave :

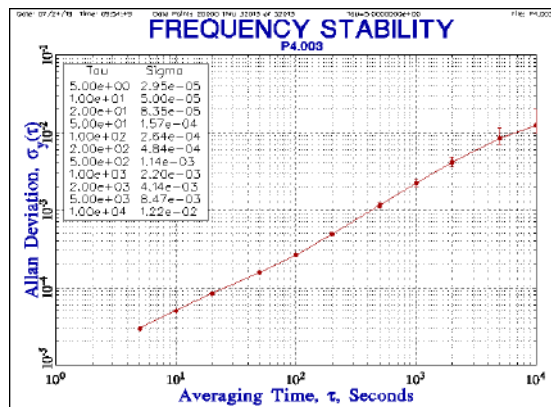
Le laser slave (laser à fibre dopée Yb) possède une boucle interne de stabilisation de puissance dite compensation du RIN. Le laser master (Nd : YAG n'en possède pas pour le modèle dont nous disposons).



L'instant où j'ai enlevé la couverture.



RIN ON

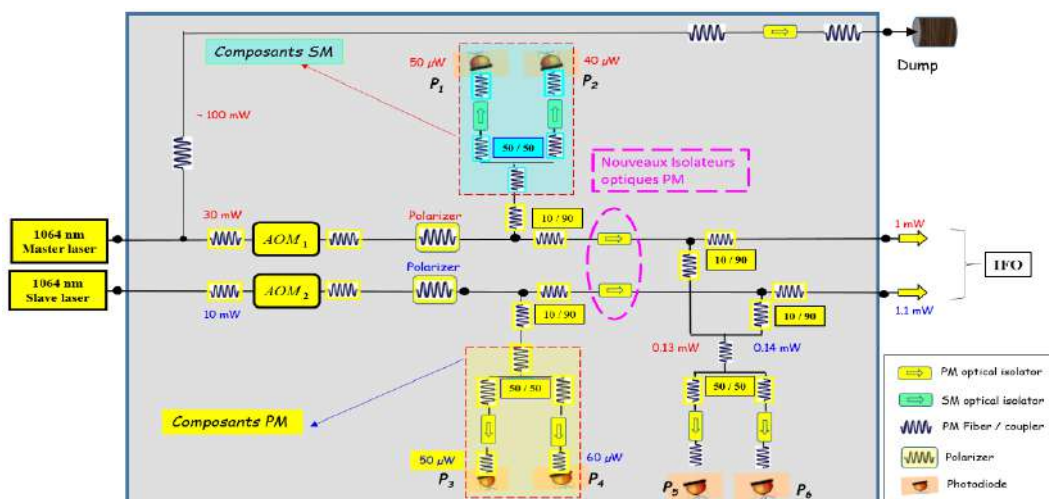


RIN OFF

Le résultat important que j'ai obtenu est que la compensation interne du RIN du laser slave rajoute du bruit d'amplitude qui affecte le bon fonctionnement du laser. La meilleure stabilité est obtenue avec le RIN OFF. Elle est de 10^{-5} à court terme et de 10^{-3} à long terme comme le montre les figures ci-dessus, lorsque la boucle d'asservissement en puissance est mise en action.

La compensation RIN est automatique, ne pouvant pas la régler nous-même donc je l'ai désactivée.

2) Influence des composants SM et PM et l'ajout d'autres isolateurs optiques :



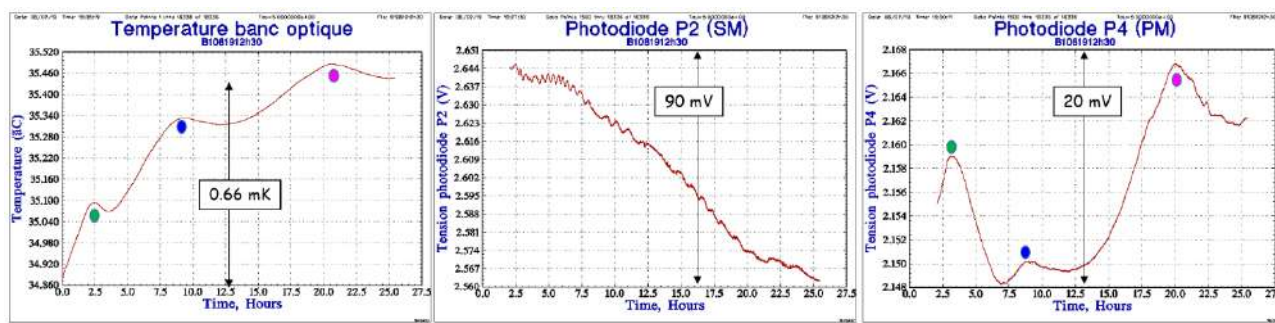
Nouveau banc optique

Au bout de plusieurs essais de stabilisation de puissance, on a constaté que la meilleure stabilité atteinte est de 10^{-5} pour les deux lasers. Afin d'améliorer la stabilité, on a pensé à changer le montage, donc deux nouvelles opérations sont faites :

- La première consiste à changer les composants PM (Maintien de polarisation) par des composants SM (single mode) dans la boucle d'asservissement du laser master. Il s'agit d'un coupleur 50/50 opérant en mode SM, et de deux isolateurs optiques également SM devant les photodiodes P1 et P2 (voir figure ci-dessous). Mais, nous avons gardé les composants PM dans la boucle d'asservissement en puissance du laser slave. En effet, nous avons suspecté que le rapport « 50/50 » du coupleur optique PM n'est pas constant mais qu'il était dépendant de la température du banc à laquelle il était soumis.
- La deuxième consiste à rajouter deux isolateurs PM séparant la partie asservissement de la partie battement (cercle rouge) afin d'isoler au mieux cette partie et d'éviter le feedback de la deuxième partie.

Après avoir mis en action les deux boucles de stabilisation en puissances du laser master et du laser slave, j'ai enregistré pendant 27 heures, les variations de la température interne du banc optique, et les variations des puissances stabilisées du laser master et du laser slave. Le but est de mettre en évidence (ou pas) des corrélations puissances optiques (mesurées outloop) avec la température du banc.

Les figures ci-dessus montrent une dépendance nette de la mesure outloop de la puissance optique stabilisée dans le cas d'une utilisation de composants PM (figure de droite). Ce comportement n'est pas visible dans le cas d'une utilisation de composants SM (figure au centre).



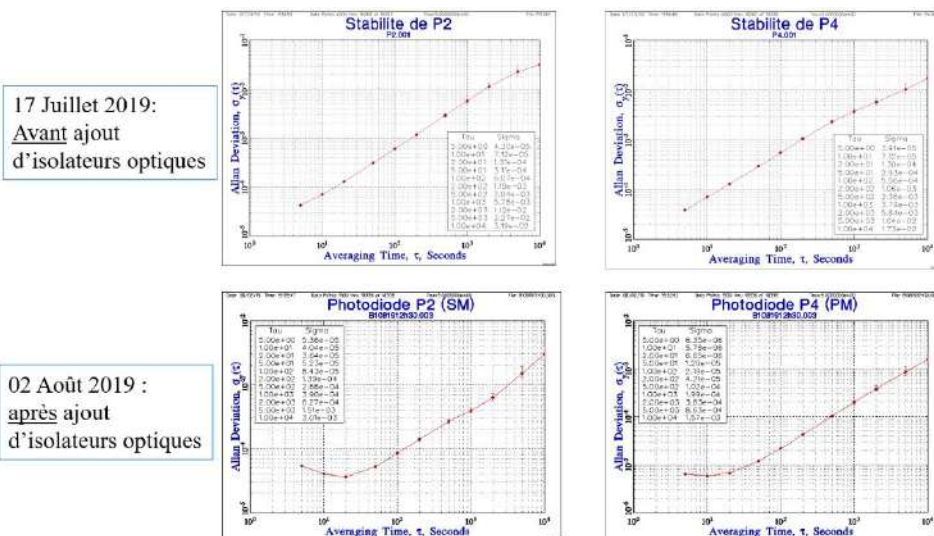
Résultats obtenus pendant une période de mesures de 27 heures.

A gauche : Variations de la température du banc optique pendant 27 heures amplitude ~ 0.66 mK

Au centre : Variations de la puissance optique (mesure outloop) avec les composants SM

A droite : Variations de la puissance optique (mesure outloop) avec des composants PM

Pour montrer l'apport des isolateurs optiques placés avant la boucle d'asservissement en phase, je montre ci-dessous les résultats obtenus sans isolateurs (17 juillet 2019) et avec isolateurs (2 août 2019).



Résultats comparatifs sans et avec isolateurs optiques :

A gauche : Stabilité de puissance du laser master

A droite : Stabilité de puissance du laser slave

Le fait d'avoir ajouté des isolateurs optiques, a permis d'obtenir un meilleur comportement pour les deux lasers, ce qui se traduit par une meilleure stabilité.

Quant au changement des composants PM en SM, il a permis, comme on peut le voir de mettre en évidence d'une indépendance entre la puissance du laser master et la température. Le fait d'introduire des composants SM élimine la sensibilité en température.

J'ai obtenu ces résultats la dernière semaine avant le dépôt de mon mémoire, plus exactement le 2 août, une autre acquisition d'une expérience identique est lancée pour quinze jours, je présenterai les résultats le jour de ma soutenance.

Difficultés rencontrées :

Pendant les trois mois de mon stage, j'ai appris énormément de notions dans le domaine des lasers, de l'optique, des fibres optiques, et du principe de la stabilisation. J'ai appris à utiliser de nombreux instruments de laboratoire (générateur de fréquence, alimentation stabilisée, centrale d'acquisition ...).

Néanmoins, j'ai été confrontée à plusieurs difficultés, comme dans chaque projet de recherche d'ailleurs, les points importants de ce que j'ai rencontré comme difficulté sont :

- L'installation de banc prend énormément de temps, et son installation n'est jamais définitive, on change dedans au fur et à mesure qu'on voit une anomalie, ou qu'on veut essayer de faire autrement pour améliorer les résultats.
- Le fait d'ouvrir le banc optique ça provoque une déstabilisation de température, ce qui veut dire il faut attendre à chaque fois au minimum 10 h pour la re-stabilisation de celle-ci puis prendre en compte les résultats obtenus.
- Les boîtiers d'asservissement demandent d'être revérifiés par le laboratoire d'électronique, ce qui n'est pas toujours immédiat vu la préoccupation sur ce laboratoire.

Conclusion :

Mon travail de stage a porté sur la stabilisation en puissance de deux lasers opérant à 1064 nm.

Le banc optique que j'ai développé est totalement fibré. Les composants fibrés impliqués dans ce banc étaient à l'origine tous à maintien de polarisation (PM). Vu la sensibilité observée vis-à-vis de la température, j'ai modifié ce banc en insérant des coupleurs et des isolateurs optiques monomodes (SM), mais pas PM. L'objectif du stage est d'atteindre une stabilité de puissance meilleure que 10^{-3} en valeur relative.

La stabilité de puissance intrinsèque des lasers slave et master respectivement (avant stabilisation) était :

- 2.4×10^{-3} à 10 s et 4.5×10^{-2} à 1000 s (avant stabilisation)

J'ai utilisé dans un premier temps une isolation passive autour du banc optique. J'ai mis une couverture de survie et aussi une boîte en bois autour du banc optique. La stabilité de puissance mesurée était alors devenue :

- 1×10^{-3} à 10 s et 5×10^{-3} à 1000 s (avant stabilisation)

J'ai observé que lorsqu'on utilise la fonction RIN interne d'un laser (RIN ON, stabilisation interne du constructeur), la stabilisation en puissance que j'ai placée permettait d'obtenir :

- 2×10^{-4} à 10 s et 5×10^{-3} à 1000 s (après stabilisation)

Lorsque je supprime la fonction RIN interne (RIN OFF), la stabilisation s'est améliorée à :

- 5×10^{-5} à 10 s et 2×10^{-3} à 1000 s (après stabilisation)

J'ai remplacé les composants PM par des composants SM dans la boucle de stabilisation, et j'ai rajouté des isolateurs optiques pour isoler la fonction stabilisation de puissance et le résultat est devenu :

- 5.7×10^{-6} à 10 s et 2×10^{-4} à 1000 s (après stabilisation)

Le dernier résultat répond complètement aux spécifications demandées. La stabilité à long terme demeure limitée par la dérive en température du banc optique. Le travail se poursuit pour déterminer comment s'en affranchir.

Lors de mon stage, j'ai réussi à atteindre une stabilité plus importante que celle demandée par LISA, néanmoins le temps m'a manqué et je n'ai pas pu entamer la partie d'asservissement en phase du laser slave sur le laser master. Mon stage se termine en s'ouvrant sur cette dernière étape pour laquelle j'ai pu entrevoir partiellement le travail nécessaire à venir et prendre connaissance des instruments qui seront utilisés. Si l'occasion m'en était donné, je poursuivrai volontiers ces travaux jusqu'à leur aboutissement.