



RAPPORT DE STAGE

Titre du stage : Conception d'un système de refroidissement laser d'un jet de strontium servant à générer un laser super-radiant.

BERRABAH Mohammed étudiant en 3-ème année de Licence Physique-Chimie option Science Génie des Matériaux et Biomatériaux

Dates du stage : 16/05/2022 au 16/06/2022

Enseignants référant : Virginie GUEGUEN (virginie.gueguen@univ-paris13.fr) et Paolo PEDRI(paolo.pedri@univ-paris13.fr)

Rapporteur universitaire : Paolo PEDRI (paolo.pedri@univ-paris13.fr)

Maitre de stage : Benjamin PASQUIOU (benjamin.pasquiou@univ-paris13.fr)

Directrice du laboratoire : Anne AMY-KLEIN (anne.amy-klein@univ-paris13.fr)

Année : 2021-2022

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
INTRODUCTION.....	4
I. LE LABORATOIRE PHYSIQUE DES LASERS.....	5
II. L'EXPERIENCE	6
III. OBJECTIFS	8
a. Le setup du laser rouge.....	8
b. Caractérisation des Lasers	12
c. Injection de Fibre Optique	18
d. Maintien de Polarisation.....	20
e. Contrôleur en température de la diode Laser	22
f. Lambda-mètre	26
g. Battement.....	29
CONCLUSION	30
ANNEXES.....	31
BIBLIOGRAPHIE	44

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé lors de ma recherche de stage et pendant mon stage.

Plus particulièrement Madame Manon BALLU et Monsieur David REY qui m'ont trouvé ce stage.

Je tiens à remercier mon maître de stage Benjamin PASQUIOU Ingénieur de recherche au sein du CNRS qui m'a chaleureusement accueilli pour ce stage d'un mois au sein de l'équipe GQM.

Je remercie également les autres membres de l'équipe GQM pour l'accueil chaleureux, leur disponibilité et les nombreux conseils et nombreuses explications qui m'ont été données notamment, Ziyad AMODJEE Post-doctorant, Bruno LABURTHE-TOLRA directeur de recherche et responsable de l'équipe GQM, Martin ROBERT-DE-SAINT-VINCENT Chercheur du CNRS, Pierre BATAILLE, Andrea LITVINOV et Husain AHMED tous les trois doctorants travaillant sur le projet Strontium.

Je remercie Charles GARCION et Julien LECOFFRE , doctorants de l'équipe Optiques et Interférométrie atomiques (OIA) de l'axe Atomes aux Interfaces, pour leur nombreux conseil et réponses à mes questions.

Je remercie aussi monsieur Tomas BADR qui était chargé de nous faire un atelier « prévention laser » concernant les risques et danger, et les précautions et bon comportement à adopter.

Je remercie également les responsables de ma formation, Madame Virginie GUEGUEN et Monsieur Paolo PEDRI, pour le suivi et l'encadrement tout au long de cette année.

INTRODUCTION

Lors de ma 3-ème année de Licence Physique-Chimie option Science Génie des Matériaux et Biomatériaux, je devais faire un stage, j'ai donc tout d'abord postulé à des offres dans des entreprises. J'ai déjà travaillé au sein d'une entreprise, mais je voulais découvrir le monde du travail en corrélation avec mon domaine de formation et avec mon projet professionnel.

Malheureusement après avoir postulé à plus de cent offres et n'ayant eu aucune réponse positive, je suis parti demander à certains de mes enseignants s'il était possible de me prendre en stage, Madame BALLU et Monsieur REY notamment.

Finalement, Madame BALLU et Monsieur REY ont réussi à me trouver une opportunité de stage avec Monsieur Benjamin PASQUIOU qui est ingénieur de recherche du CNRS dans l'équipe « Gaz Quantique Magnétique » au sein du Laboratoire Physique des Lasers.

Nous nous sommes donc vu rapidement pour qu'il m'explique ce sur quoi l'équipe travail et ce qu'il pouvait me proposer pour mon stage.

Nous nous sommes mis d'accord pour une période de stage de 5 semaines et il m'a donc donné mon sujet de stage et mes objectifs.

Je devais donc concevoir et assembler un système optique dédié au refroidissement laser du jet d'atomes de strontium pour l'expérience du laser super-radiant.

I. LE LABORATOIRE PHYSIQUE DES LASERS

Le Laboratoire Physique des Lasers est une Unité Mixte de Recherche du CNRS et de l'Université Sorbonne Paris-Nord. Les interactions entre la lumière et la matière sont le domaine d'étude du laboratoire. Les expériences vont des domaines de Physiques Fondamentales à la Physique appliquée comme : la Physique Quantique, atomique et moléculaire, dispositifs photoniques, optique Biomédicale etc...

Avec des lasers, ils étudient les propriétés quantiques de gaz à très basse température, ils sondent les propriétés d'atomes ou de molécules au voisinage de surfaces ou de nano-objets etc...

Il est constitué d'environ quatre-vingts personnes dont une dizaine de chercheurs C.N.R.S., une trentaine d'enseignant-chercheurs, plus de 25 doctorants et post-doctorants et quinze personnels techniques auxquels s'ajoutent aussi des stagiaires et des visiteurs étrangers.

Enfin, ils développent des nouvelles techniques pour stabiliser la fréquence d'un laser, ou pour créer de nouvelles sources de lumière grâce aux nanotechnologies.

L'activité de recherche du LPL se développe autour de cinq axes scientifiques principaux : l'axe « Gaz Quantique », l'axe « Lasers Pour le Vivant », l'axe « Photonique Organique et Nanostructure », l'axe « Métrologie, Molécules et Tests Fondamentaux » et l'axe « atomes aux interfaces »

Deux équipes composant l'axe de recherche « Gaz Quantiques », l'équipe « Condensats de Bose-Einstein » (BEC) et l'équipe « Gaz Quantiques Magnétiques » (GQM), étudient les propriétés de transports et de magnétisme de gaz dégénérés constitués de bosons ou de fermions ultra-froids. Les quatre dispositifs expérimentaux basés sur quatre espèces atomiques différentes (Rb, Na, Cr, Sr) permettent ainsi d'aborder des problématiques dans les domaines du magnétisme quantique et de la supraconductivité.

Dans l'équipe GQM que j'ai intégrée lors de ce stage, les activités de recherche se concentrent sur des expériences dans le domaine des gaz d'atomes ultra-froids. Nous les utilisons comme plateformes pour étudier les questions de corps multiples quantiques à la frontière de la physique de la matière condensée. Les travaux actuels se concentrent sur le magnétisme quantique et nous visons à produire des états fortement corrélés.

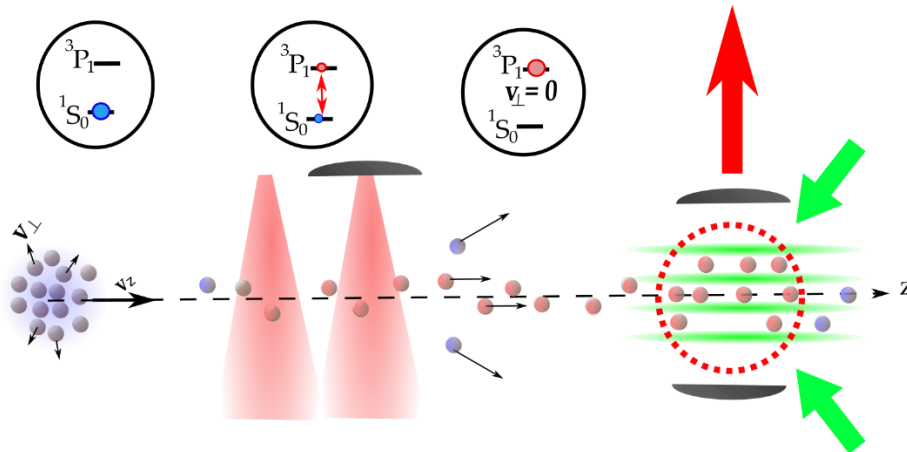
Il y a actuellement trois expériences, le projet Chrome, le projet Strontium et le projet du laser Super-radiant.

II. L'EXPERIENCE

La mesure précise du temps est essentielle pour notre société (synchronisation des réseaux télécom, GPS, ...) et pour résoudre des questions de physique fondamentale. Les meilleures horloges sont produites en laboratoires à partir d'atomes refroidis, piégés, et interrogés par lasers. La limite actuelle de stabilité de ces horloges vient de la stabilité du laser d'interrogation. Récemment, la proposition d'une nouvelle génération d'horloges a été formulée. Dans ce schéma, ce sont les atomes eux-mêmes qui émettent la lumière laser ultrastable. Pour ce faire, il faut préparer un jet d'atomes ultra froid, et les faire traverser le mode d'une cavité optique où ils pourront émettre de la lumière de façon super-radiante.

Dans des conditions contrôlées, l'émission collective de lumière par un ensemble d'émetteurs entraîne des effets intrigants, tels que l'émergence spontanée de l'enchevêtrement et des propriétés d'émission modifiées. Nous utiliserons le phénomène d'émission stimulée amplifiée appelé super-radiance, avec des milliers d'atomes à l'intérieur d'une cavité optique, pour créer une source de lumière avec une fréquence ultrastable et une largeur de ligne inférieure à celle des émetteurs individuels. Cette nouvelle source de lumière cohérente présente un intérêt particulier pour la métrologie des fréquences, car elle peut être utilisée comme une horloge optique avec une robustesse accrue aux perturbations, et éventuellement une complexité expérimentale réduite.

Un défi pour les lasers super-radiants actuels est de maintenir l'émission en continu. L'ambition de notre projet est de franchir cette étape en remplissant continuellement la cavité optique avec des atomes de strontium qui étaient pré-excités sur la transition d'inter-combinaison. En utilisant un simple faisceau thermique, nous visons à établir un fonctionnement continu dans une conception relativement simple et robuste.



Un laser super-radiant est un laser qui ne dépend pas d'une grande population de photons à l'intérieur de la cavité laser pour maintenir la cohérence.

Plutôt que de s'appuyer sur les photons pour stocker la cohérence de phase, il s'appuie sur les effets collectifs dans un milieu atomique pour stocker la cohérence. Un tel laser utilise la super-radiance de Dicke repompée (ou super-fluorescence) pour maintenir l'émission de lumière qui peut avoir une largeur de ligne considérablement plus étroite que celle d'un laser conventionnel.

Pour ce faire nous allons donc à l'aide d'un four envoyer un jet d'atomes de Strontium dans le tube, ce jet d'atome se dispersera dans les directions transverses. C'est pourquoi nous enverrons un laser « Bleu » d'une longueur d'onde de 461 nm, qui permet la transition de l'état $1S_0$ à l'état $1P_1$ (*voir annexe 1*), pour ralentir la vitesse des atomes dans les directions transverses, d'un ordre de grandeur de 20 m/s à 1 m/s. Après avoir suffisamment ralenti leur vitesse dans les directions transverses, la vitesse des atomes dans la direction axiale est ralenti au sein du ralentisseur Zeeman. Dans le ralentisseur Zeeman les atomes absorbent des photons et émettent une émission spontanée, lors de ce phénomène les atomes font un saut en arrière pour un cycle "absorption/émission", et leur vitesse passe de 500 à 10 m/s après plusieurs cycles (environ 10000). Une fois ralentis les atomes seront dirigé, toujours à l'aide du laser bleu, dans une cavité optique et le laser rouge à 689 nm, faisant des transitions entre les états $1S_0$ et $3P_1$ (*voir annexe 2*), lui permettant d'encore ralentir les atomes et de pré-exciter les atomes, et donc de les mettre dans le même état d'énergie avant d'entrer dans la cavité pour permettre une inversion de population, qui sera nécessaire pour avoir une émission spontanée qui provoquera l'émission stimulée et donc un laser super-radiant.

III. OBJECTIFS DU STAGE

Lors de ce stage, je devais donc assembler et concevoir le système de refroidissement laser, et pour se faire, il y avait de nombreuses étapes qui sont les suivantes :

Je devais tout d'abord prendre connaissance de l'installation des optiques et de l'espace nécessaire pour pouvoir optimiser la place utilisé pour l'assemblage de l'installation. Après cela la caractérisation des lasers que l'on allait utiliser était nécessaire pour pouvoir comprendre comment ils fonctionnaient par exemple. Ensuite, l'injection de fibre optique permettait de transporter les faisceaux laser d'un point A à un point B. Le maintien de polarisation est une étape nécessaire lorsque l'on utilise le refroidissement laser.

Nous avons utilisé un contrôleur en température, qu'il fallait également étudier pour comprendre son comportement et connaître les fluctuations en température du laser esclave. Nous devions mettre le Laser maître que l'on avait dans notre expérience et le laser maître situé dans une autre expérience, que l'on a transporté à l'aide d'une fibre optique également, à la même fréquence et pour ce faire l'utilisation du lambda-mètre était nécessaire. Finalement effectuer un battement permettait de vérifier la largeur spectrale de notre laser.

a. Le setup du laser rouge

Comme dis précédemment, j'étais donc chargé d'assembler et concevoir l'installation du laser rouge. Pour ce faire j'avais accès à un schéma, j'ai donc commencé par essayer de le comprendre, car il y avait beaucoup de choses que je ne connaissais pas et qu'on m'a donc expliquées au fur et à mesure.

Nous avons donc deux lasers, un laser rouge maître et un laser rouge esclave.

Des miroirs qui servaient à l'injection des faisceaux dans les fibres optiques par exemple.

Plusieurs fibres optiques, certaines monomodes d'autres multimodes.

Deux lentilles, une convexe de distance focale = 100 mm suivis d'une lentille concave de distance focale = -50 mm qui permettent de réduire la divergence du faisceau et de le collimater. J'ai donc placé ces deux lentilles de façon à ce que le faisceau soit collimaté, pour ce faire j'ai utilisé une feuille qui me permettait de suivre le trajet du faisceau sur une longue distance et de voir si le faisceau reste collimaté à longue distance.

Une lame demi-onde, également notée *lame* $\lambda/2$ est un instrument d'optique permettant de modifier l'état de polarisation de la lumière. Les lames demi-onde sont des lames à faces parallèles fabriquées dans un matériau biréfringent qui permettent d'introduire un retard de phase de la lumière de $\lambda/2$ entre les deux axes de biréfringence dits axe lent et axe rapide, c'est-à-dire un retard d'une moitié de longueur d'onde et un déphasage de 180° .

Une telle lame comme toute lame à retard de phase est spécifiquement adaptée à une onde monochromatique donnée.

Les cubes séparateurs de faisceau sont construits à l'aide de deux prismes à angle droit. La surface de l'hypoténuse de l'un des prismes est revêtue, et les deux prismes sont collés ensemble de manière à former un cube. Pour éviter d'endommager l'adhésif, il est recommandé de transmettre la lumière dans le prisme revêtu, qui comporte souvent une marque de référence sur la surface dépolie.

Les séparateurs de faisceau polarisants sont conçus pour diviser la lumière en faisceaux polarisés S réfléchis et en faisceaux polarisés P transmis (voir schéma ci-dessous). Ils peuvent être utilisés pour diviser la lumière non polarisée selon un rapport arbitraire, que l'on choisit avec la $\lambda/2$, ou pour des applications de séparation de polarisation telles que l'isolation optique.

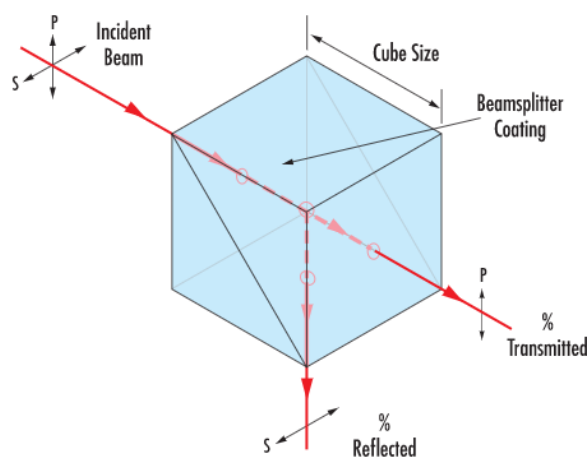


Schéma d'un cube polarisant et de son effet sur le faisceau

Un modulateur acousto-optique (voir annexe 3), également appelé cellule de Bragg, utilise l'effet acousto-optique pour diffracter et changer la fréquence de la lumière par ondes sonores (généralement proche des fréquences radio).

La propagation de l'onde acoustique dans le milieu se traduit par des variations de pression dans le milieu et donc par des variations d'indice optique du milieu.

Un oscillateur piézo-électrique est relié à un matériau, par exemple du verre. Un signal électrique oscillant force la cellule piézo-électrique à vibrer, ce qui crée des ondes sonores dans le verre. Ceci peut être imaginé comme des plans de dilatation et de compression, se déplaçant périodiquement, et venant changer l'indice de réfraction. Une interférence a lieu, similaire à celle créée lors d'une diffraction de Bragg. L'interaction peut être pensée comme le mélange de quatre ondes entre phonons et photons.

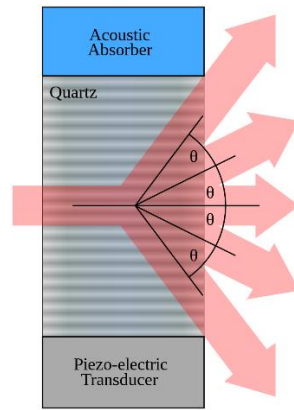


Schéma d'un modulateur acousto-optique

Un isolateur optique ou diode optique est un composant optique permettant la propagation de la lumière en sens unique. Ce type de composants est généralement utilisé pour éliminer les réflexions parasites dans une cavité laser. Les isolateurs optiques utilisent l'effet Faraday lequel fait tourner la polarisation par un effet magnéto-optique, et plus précisément le composant destiné à cet effet : le rotateur de Faraday.

Une cavité optique ou résonateur optique est un dispositif dans lequel certains rayons lumineux sont susceptibles de rester confinés grâce à des miroirs sur lesquels ils se réfléchissent. Ces cavités sont indispensables aux lasers pour que leur lumière passe plusieurs fois dans leur milieu amplificateur.

La façon la plus simple de réaliser une cavité optique est de placer deux miroirs plans ou sphériques face-à-face séparés d'une distance L . On retrouve cette configuration dans l'interféromètre de Fabry-Pérot, ainsi que dans de nombreux lasers de petite taille.

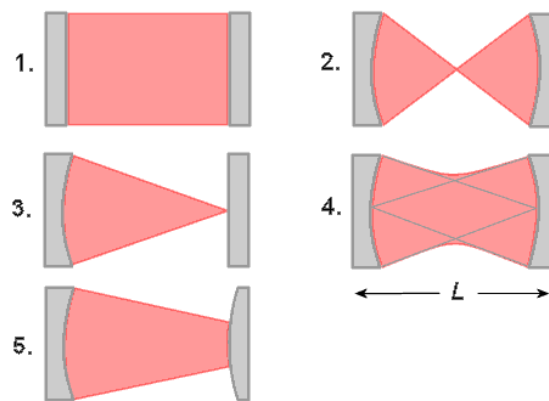
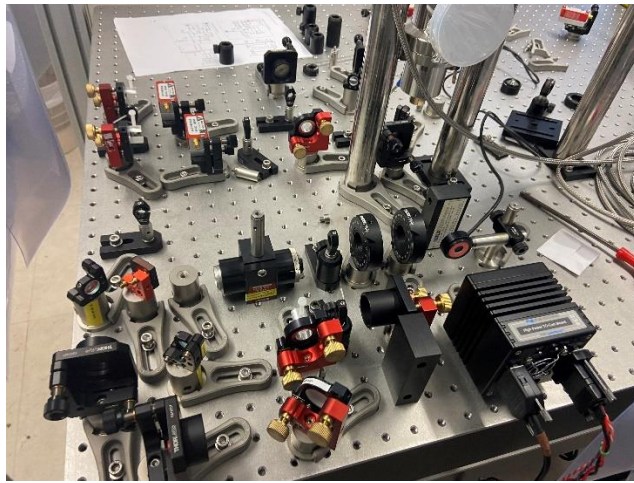
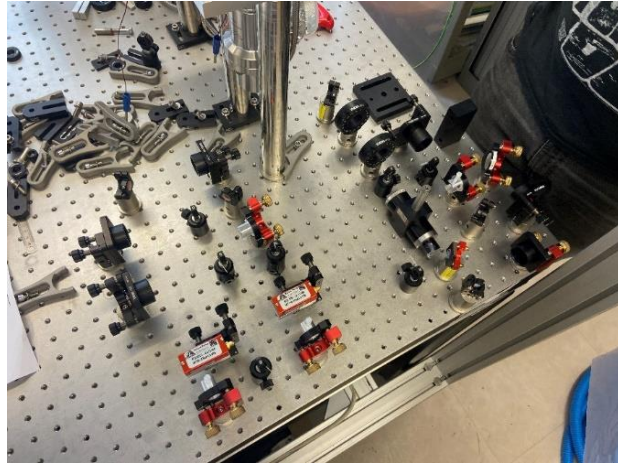
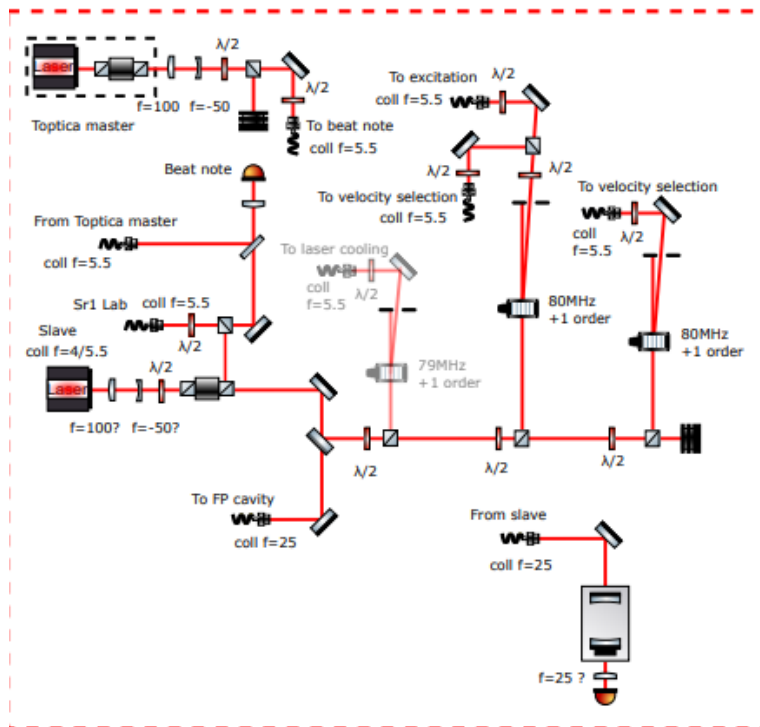


Schéma de différentes géométries de cavité possible



Breadboard red distribution



b. Caractérisation des Lasers

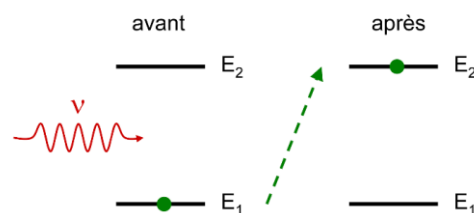
Un laser, acronyme issu de l'anglais light amplification by stimulated emission of radiation qui signifie « amplification de la lumière par émission stimulée de radiation », est un système photonique. Il s'agit d'un appareil qui produit un rayonnement lumineux reposant sur le processus d'émission stimulée. Une source laser associe un amplificateur optique à une cavité optique, encore appelée résonateur, généralement constituée de deux miroirs, dont un au moins est partiellement réfléchissant, c'est-à-dire qu'une partie de la lumière sort de la cavité et l'autre partie est réinjectée vers l'intérieur de la cavité laser.

On sait grâce à la physique quantique que les atomes peuvent passer d'un état d'énergie à un autre en étant excité. Le laser repose sur ce principe et il y a donc trois étapes pour parvenir à avoir un laser :

L'absorption d'un photon, l'émission spontanée d'un photon, l'émission stimulée de deux photons de même longueur d'onde que le photon qui a été absorbé.

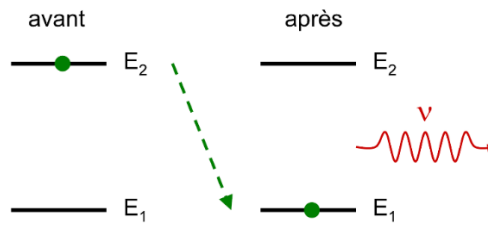
Pour pouvoir avoir une émission continue, il faut que la majorité des atomes soient au niveau supérieur du niveau fondamental, or on sait que ce n'est pas naturellement le cas, il faut donc faire un pompage pour avoir une inversion de population. Pour faire le pompage, on apporte de l'énergie aux atomes à l'état fondamental en appliquant une tension au moyen d'une tension électrique électriquement ou à l'aide d'un autre laser par exemple.

L'amplificateur est donc un ensemble d'atomes ou molécules que l'on fait passer d'un état fondamental ou faiblement excité à un état plus fortement excité, au moyen d'une source d'énergie extérieure (pompage). Ces atomes peuvent alors se désexciter vers un état inférieur, en émettant des photons ayant une fréquence ω . Ainsi, un rayonnement de fréquence passant à travers ce milieu peut être amplifié par des processus d'émission stimulée.



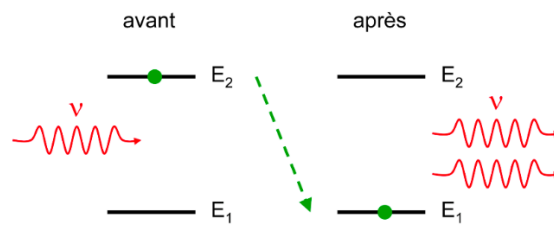
Absorption

Le photon d'énergie $h\nu$ fait passer l'atome de son état fondamental E_1 vers l'état excité E_2



Emission spontanée

La désexcitation de l'atome se produit de façon spontanée et s'accompagne de l'émission d'un photon dans une direction aléatoire.



Emission stimulée

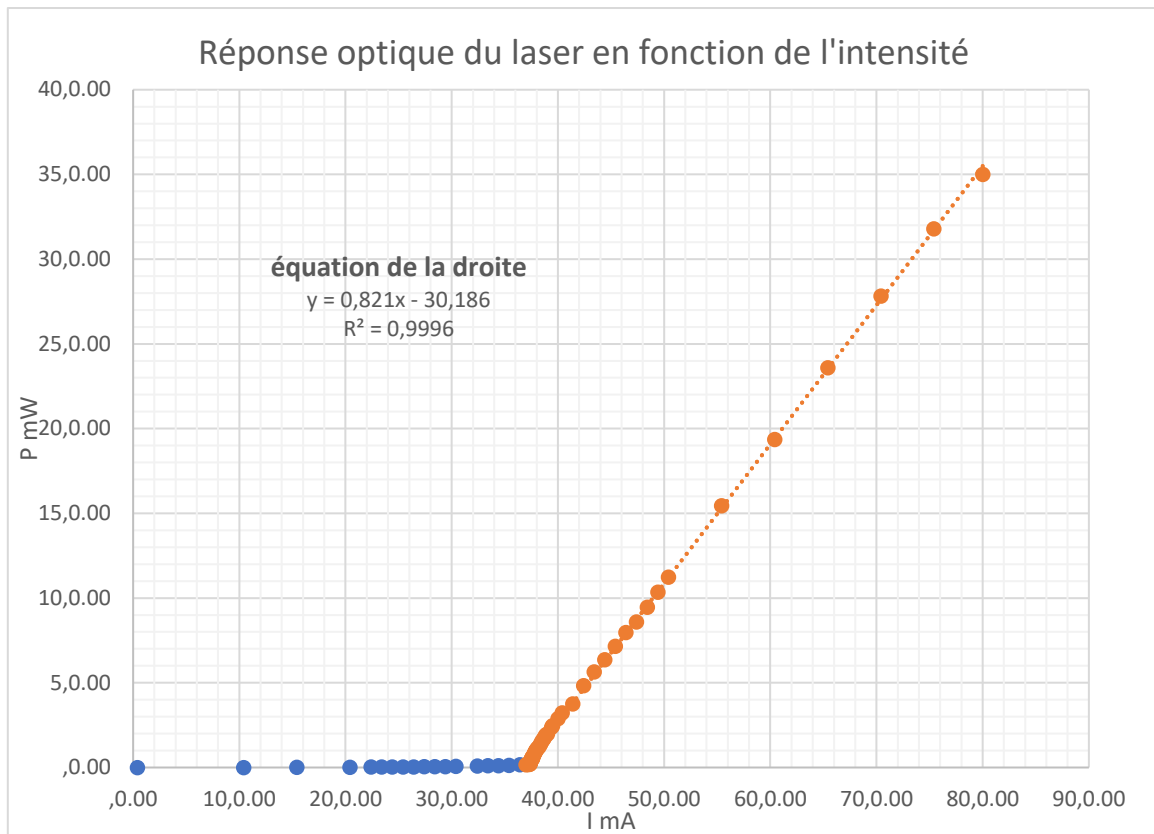
La désexcitation de l'atome est stimulée par l'arrivée du photon incident. Le photon émis vient s'ajouter au champ incident et tous les deux partent dans la même direction : il y a amplification et la lumière est cohérente

Nous avons trois laser, le laser Maître (STR2), d'une longueur d'onde de 689 nm, situé dans la salle de notre expérience qui délivre une puissance de 35 mW au total, un laser esclave qui délivre une puissance de 50 mW et un laser maître situé dans une autre salle (STR1), dont le faisceau est emmené jusqu'à notre salle grâce à une fibre optique.

On veut que le laser maître rouge STR2 aie une longueur de raie inférieure à 7 kHz, car la transition naturelle des atomes de Strontium entre l'état $1S_0$ et l'état $3P_1$ est de 7 kHz, mais ce n'est pas le cas. Alors on va injecter le laser maître STR1 qui est stable et a une longueur de raie de 1 kHz, dans le laser esclave qui renverra un laser à la puissance initiale qu'il avait, c'est-à-dire 50 mW et une fréquence et stabilité égale à celle du laser STR1.

J'ai pu observer la réponse optique du laser STR2, grâce à un puissance-mètre, j'ai caractérisé la puissance du laser en fonction de l'intensité du laser à une température de 20°C.

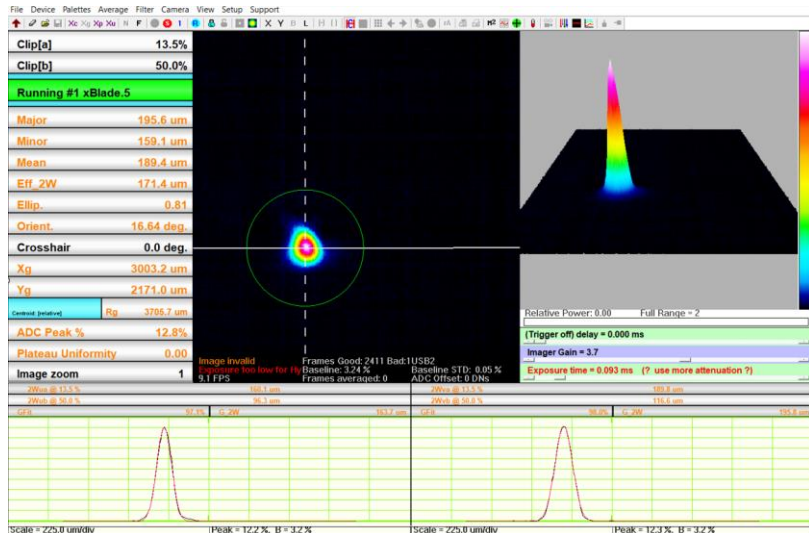
(Voir Annexe 4)



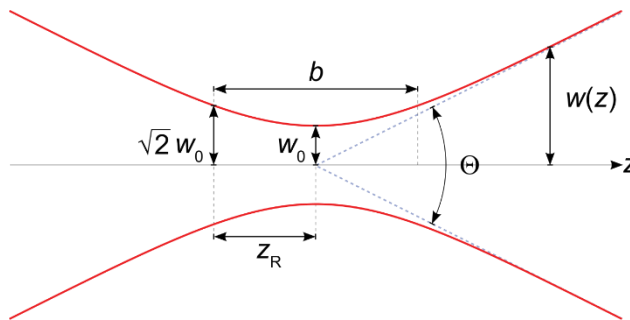
A l'aide de la courbe de la puissance en fonction de l'intensité et de l'équation de la partie linéaire de la courbe on peut donc observer et calculer que le laser se met à laser à 36,8 mA. C'est donc le seuil d'oscillation du laser, avant ça on peut observer une fluorescence.

On a donc décidé de se placer à 40 mA pour être au-dessus du seuil où le laser lase, on avait donc une puissance de 3 mW en sortie du laser.

Après cela, je devais caractériser le col du faisceau du laser (waist). Pour faire cela comme dis précédemment, j'ai installé deux lentilles cylindriques pour réduire la taille du faisceau, rajouter une densité neutre et une dernière lentille de distance focale de 200 mm pour que je sache vers où le faisceau se focalise, à 20 cm, faisceau que j'envoyais sur une caméra et je pouvais donc observer la taille du waist sur un logiciel appelé Data Ray (voir annexe 5). Ce logiciel permet de caractériser la taille du waist en fonction de la position.



Sur le logiciel, est affiché le double de la taille du waist, c'est-à-dire le diamètre du col du faisceau.



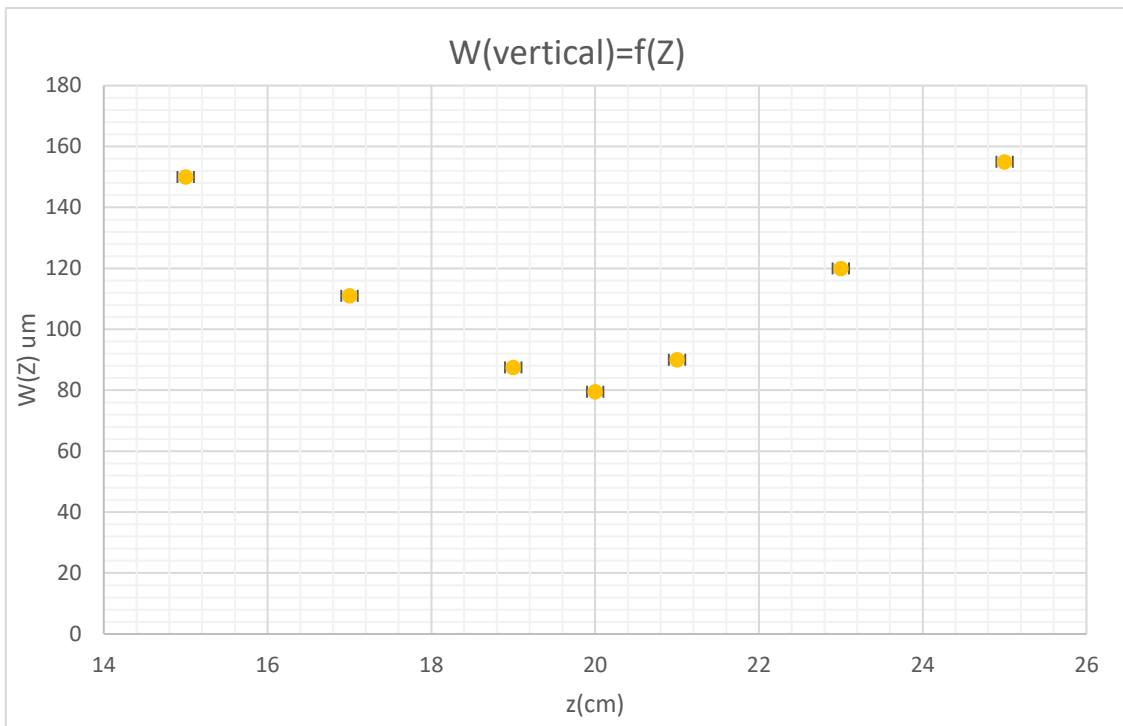
Après avoir vérifié où est-ce que j'avais le waist le plus petit w_0 , j'ai calculé la longueur de Rayleigh Z_R pour savoir jusqu'à quelle distance je devais prendre des points pour pouvoir caractériser correctement mon faisceau gaussien qui est caractérisé par le waist, la longueur d'onde et la longueur de Rayleigh.

Pour calculer la longueur de Rayleigh j'ai utilisé cette formule :

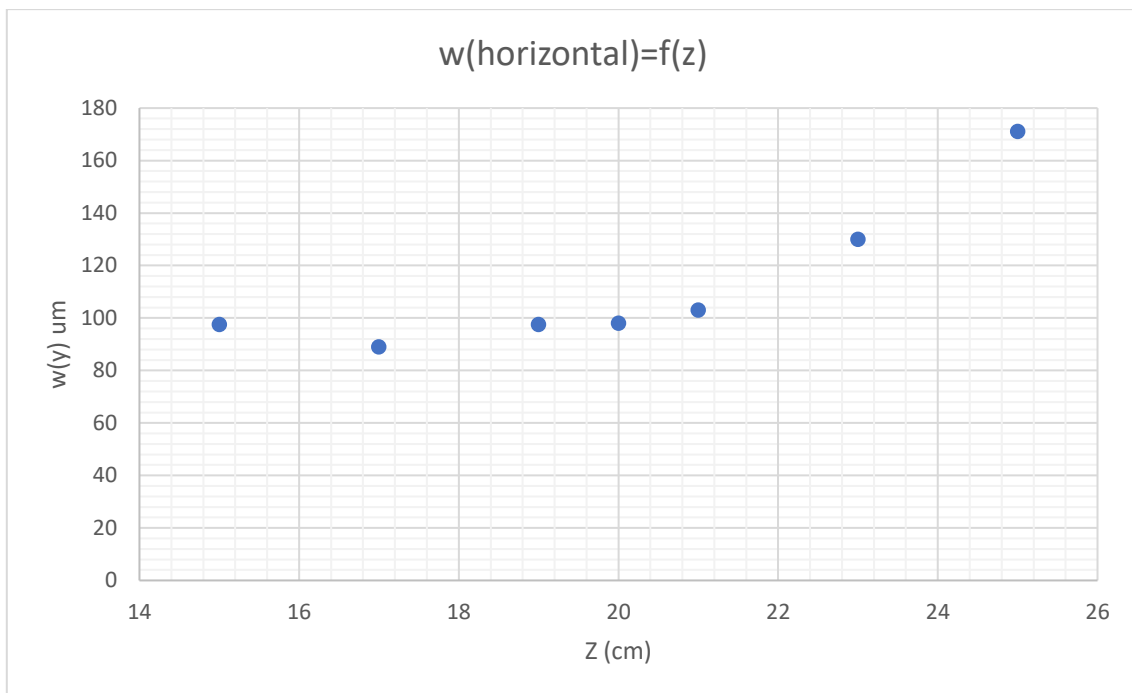
$$z_R = \pi \frac{w_0^2}{\lambda}$$

Avec $\lambda = 689 \text{ nm}$, $w_0 = 159/2$

J'ai donc $Z_R = 28 \text{ mm}$, j'ai finalement décidé de prendre des mesures allant de 5 cm vers l'avant et vers l'arrière de la position où le waist était le plus petit.



On peut donc observer que la courbe suit bien le comportement d'un faisceau gaussien et que mon waist est de $79,5\mu\text{m}$.



Comme on peut l'observer le faisceau ne focalise pas au même endroit selon l'axe x et y. Le faisceau focalise à 20 cm, avec un waist de $79.5\mu\text{m}$ pour l'axe des y. Tandis que pour l'axe des x le faisceau se focalise à 17cm pour un waist de $89\mu\text{m}$. Ce qui veut dire que le faisceau ne sera pas focaliser sur les deux axes au même endroit pour l'injection dans la fibre optique.

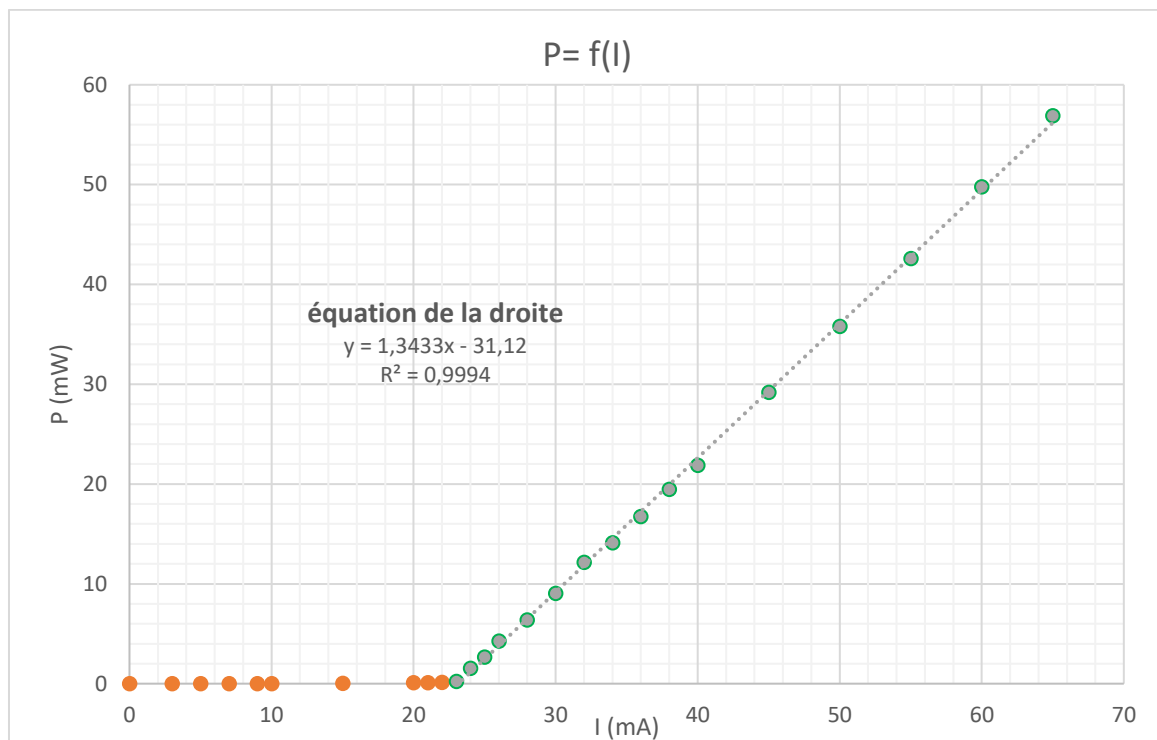
Après avoir assemblé la monture qui accueillera la diode laser du laser esclave rouge, j'ai caractérisé sa puissance en fonction de l'intensité. (Voir annexe 6)



Un contrôleur me permettait de savoir l'intensité électrique fournie à la diode laser qui était aussi reliée au contrôleur en température.

On m'a précisé que lorsque l'on envoyait 0mA d'intensité, il était affiché sur le contrôleur -20 mA donc en réalité, lorsque sur le contrôleur était afficher 0 mA nous étions à 20 mA.

J'ai donc encore une fois pu mesurer la puissance en sortie, en fonction de l'intensité à l'aide de mon puissance mètre. Je savais que je ne devais pas dépasser les 50 mW en puissance pour ne pas abîmer la diode. (Voir annexe 7)



A l'aide de la courbe tracée de la puissance en fonction de l'intensité et de l'équation de la partie linéaire de la courbe on observe donc que le laser lase à partir de 23,2 mA donc à 4mA affichés sur le contrôleur. C'est le seuil d'oscillation laser à partir de laquelle le laser passe d'un régime d'émission amplifiée à un régime d'émission stimulée. Avant ce seuil on observe une fluorescence.

Je décide donc de me placer à 25 mA ce qui donne une puissance de 2,7mW en sortie du laser pour pouvoir collimater le faisceau avec une lentille de collimation de focale 5,5mm.

c. Injection de Fibre Optique

Les fibres optiques étaient nécessaires pour transporter les faisceaux lasers d'un point A à un point B.

La fibre optique est un guide d'ondes qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection.

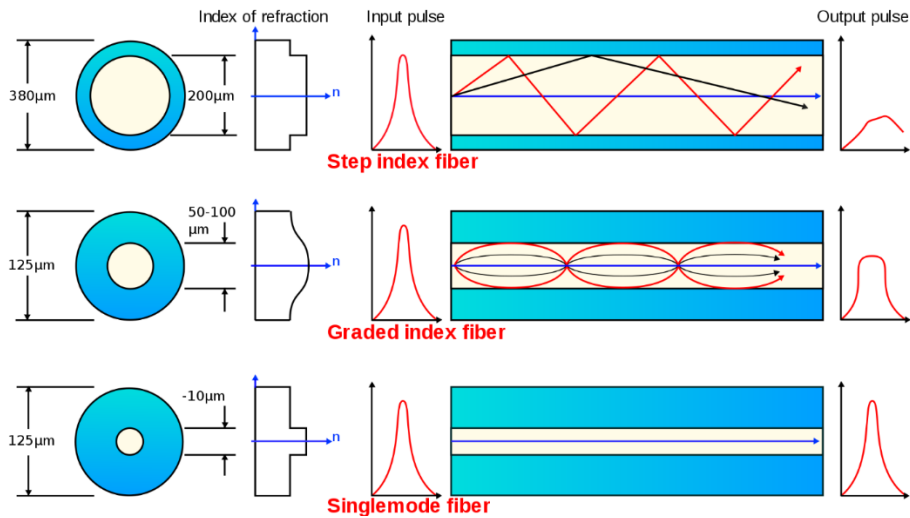
Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

Le cœur est un support physique qui transporte les signaux optiques entre une source de lumière et un équipement récepteur. Le cœur est constitué d'un fil continu de verre ou de plastique, caractérisé par son diamètre externe dont la taille est exprimée en micromètres (μm).

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et comparé à la longueur d'onde utilisée : les fibres monomodes et multimodes.

Les fibres multimodes (dites MMF, pour Multi Mode Fiber), ont été les premières sur le marché. Elles ont pour caractéristique de transporter plusieurs modes spaciaux ou trajets lumineux. Elles sont caractérisées par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres. Les trois calibres de fibre multimode les plus courants sont 50 μm , 62,5 μm et 100 μm .

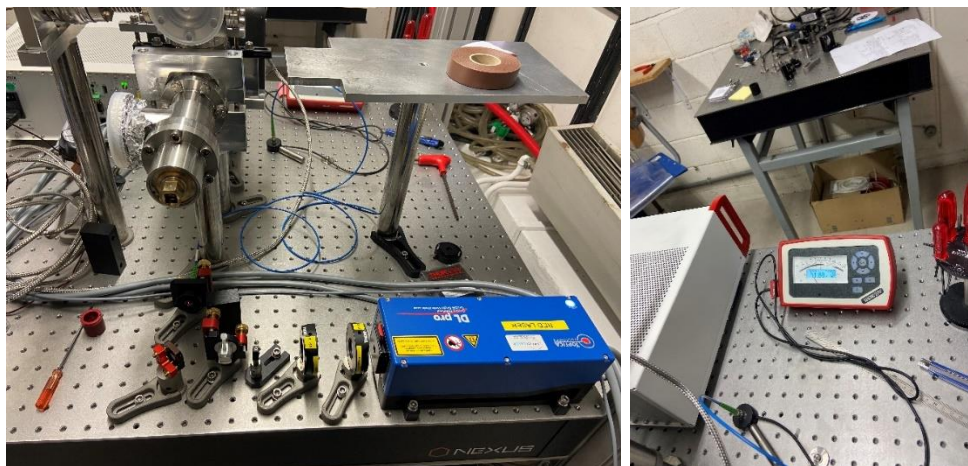
A la différence du multimode, le câble en fibre optique monomode, leur cœur très fin n'admet ainsi qu'un mode de propagation, le plus direct possible, c'est-à-dire dans l'axe de la fibre. Les pertes sont donc minimales (moins de réflexion sur l'interface cœur/gaine) que cela soit pour de très hauts débits et de très longues distances.



Pour transporter le faisceau de notre laser maître, j'ai donc utilisé une fibre monomode, avec un diamètre pour le cœur de 4,5 μm environ (réf: PM630-HP), en entrée de cette fibre il y avait une lentille de collimation et en sortie de même. Grâce à un puissance mètre installé en sortie de fibre, j'ai pu optimiser le transfert de la puissance en sortie de sorte à avoir le moins de pertes possibles.

J'injectais donc le faisceau dans le collimateur de fibre à l'aide d'un miroir, grâce à des vis je réglais verticalement et horizontalement le miroir et le collimateur de fibre. Lorsque j'arrive à un stade où la puissance en sortie stagne, alors je rapproche la lentille de collimation (Lentille de distance focale 5,5 mm) de l'entrée de la fibre.

Finalement, pour une puissance de 3,0 mW en entrée, j'ai réussi à avoir une puissance de 2,2 mW en sortie ce qui fait un rendement de 73 %. Ce n'est pas un bon rendement ni un mauvais, c'est raisonnable car avec une diode laser on peut avoir un meilleur rendement, mais cela nous donnera un mauvais mode gaussien, on atteint tout de même rarement les 85% de rendements.



d. Maintien de Polarisation

La polarisation est une propriété qu'ont les ondes vectorielles (ondes qui peuvent osciller selon plus d'une orientation) de présenter une répartition privilégiée de l'orientation des vibrations qui les composent. Les ondes électromagnétiques, telles que la lumière, ou les ondes gravitationnelles ont ainsi des propriétés de polarisation.

Dans une onde électromagnétique polarisée (linéairement), le champ électrique et le champ magnétique oscillent simultanément dans des directions perpendiculaires l'une à l'autre. Par convention, la polarisation de la lumière décrit la vibration du champ électrique et quand l'onde est polarisée linéairement, ce champ oscille dans une seule direction. Quand une onde est constituée de deux composantes polarisées à 90° l'une de l'autre, ET en déphasage de 90° également l'une par rapport à l'autre, alors, sa polarisation semble tourner autour de l'axe de propagation de l'onde. On parle dans ce cas de polarisation circulaire ou elliptique (quand les deux composantes n'ont pas la même intensité).

On veut que la polarisation et la puissance soient fixe et ne varient pas même lorsque la fibre vibre ou s'il y a un changement de température, car selon la polarisation utilisée les atomes feront des transitions différentes.

On sait que la fibre à un axe de polarisation privilégié et que pour faire le maintien de polarisation, il faut qu'on trouve la bonne polarisation pour la fibre.

Pour cela j'ai placé, en sortie de fibre, une lame demi onde (2) qui servira à modifier la polarisation du laser, un cube polariseur et le capteur du puissance mètre, qui sera relié à un oscilloscope que j'ai dans un premier temps calibré à 100 mV/division en ordonnées et 50 ms/division ce qui me permettra de trouver à l'aide d'une lame demi-onde en sortie(2) la Tension maximale et Tension minimum. On cherche cela de sorte à avoir le plus grand écart possible et après cela on se place à la moitié de la position de la lame demi-onde(2) de sorte qu'en sortie de cube on ait 50% de la puissance optique en transmission et 50% de la puissance optique en réflexion c'est dans cette configuration que le faisceau est le plus sensible aux fluctuations.

Après cela je zoom sur l'oscilloscope, c'est-à-dire je passe de 100mV/division en ordonnées à 10mV/division et on bouge ou chauffe la fibre de sorte à voir si les fluctuations sont grandes.

Ensuite on tournera l'angle de la lame demi-onde en entrée de fibre(1) et on recommence les étapes dites précédemment jusqu'à ce qu'on n'ait aucunes fluctuations.

Malheureusement, je n'ai pas réussi à faire le maintien de polarisation, c'est une étape nécessaire pour l'expérience, mais elle fut assez compliquée pour moi. Il fallait être minutieux et faire preuve de patience.

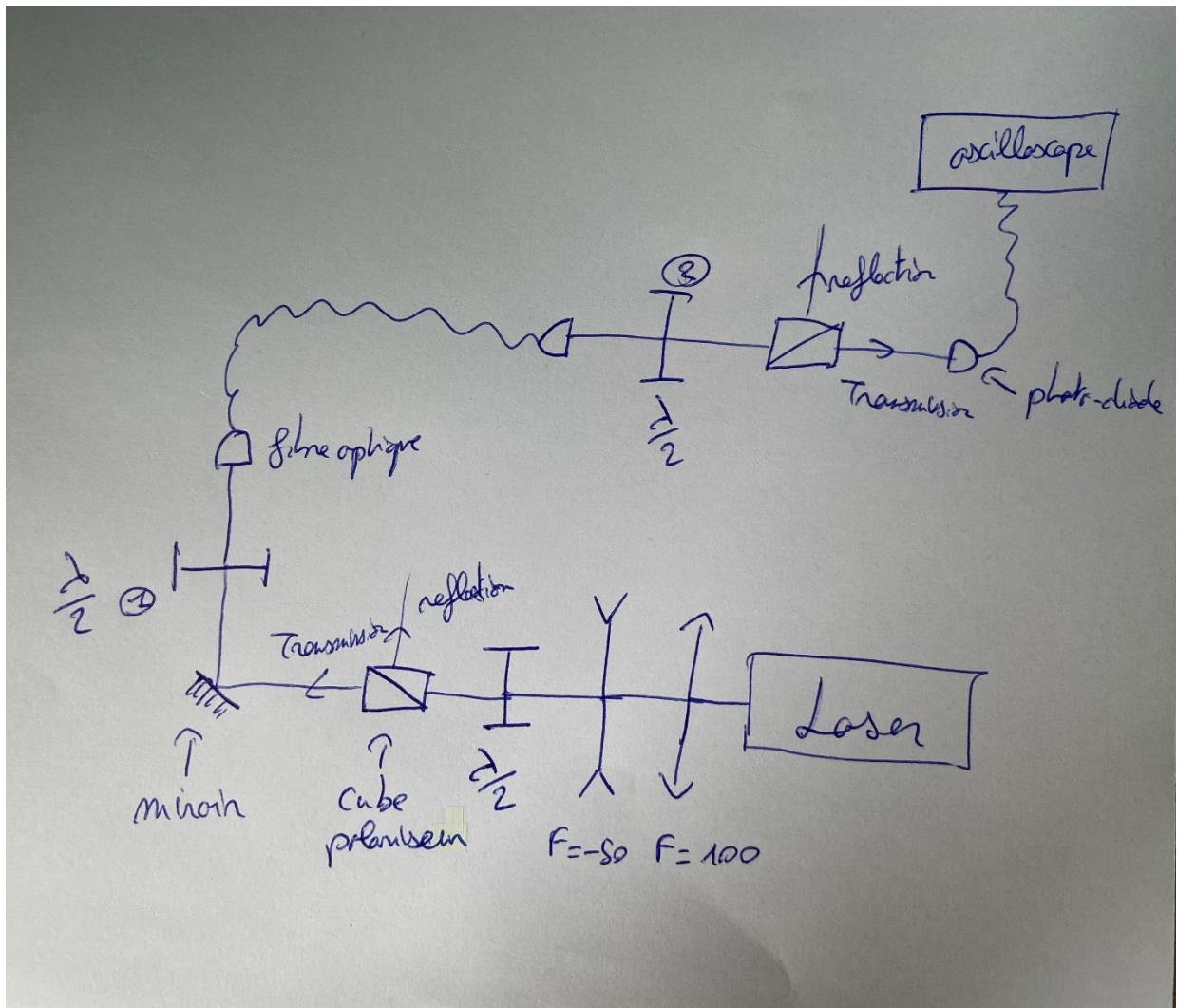


Schéma de l'installation pour faire le maintien de polarisation

(Voir annexe 8)

e. Contrôleur en température de la diode Laser

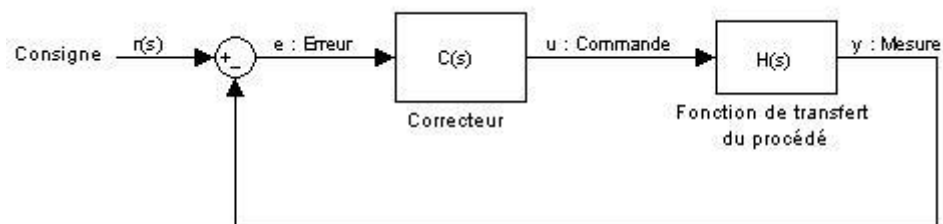
Nous voulons contrôler la température de la diode qui est connectée au module Peltier qui permet de contrôler la température, pour savoir s'il faut chauffer ou refroidir, on a un thermistor.

Le contrôleur en température permettait d'imposer au thermistor une valeur en sachant que le thermistor est une résistance dépendant de la température. On pouvait donc contrôler la température en contrôlant la résistance du thermistor via le module Peltier.

Les modules Peltier exploitent l'effet Peltier, par lequel un courant électrique est converti en une différence de température.

Le contrôleur en température utilise donc la technique d'asservissement en comparant le thermistor (thermistance) à une résistance de consigne.

Un asservissement est un système dont l'objet principal est d'atteindre le plus rapidement possible sa valeur de consigne et de la maintenir, quelles que soient les perturbations externes. Le principe général est de comparer en permanence la valeur de consigne et la valeur réelle de la grandeur à asservir de manière à la corriger efficacement. On parle également de système commandé par rétroaction négative ou en boucle fermée.



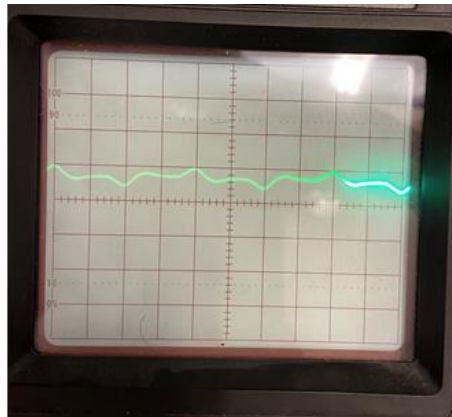
Nous utilisons donc ce système, car le mode d'émission du laser dépend fortement de la température et doit donc être très stable.

Pour pouvoir savoir comment variait la température, j'ai donc branché à la sortie du signal d'erreur du contrôleur en température un oscilloscope, qui m'a donc donné un signal d'erreur, pour une résistance de consigne de 12,5 kΩ correspondant à une température d'environ 20,23°C, de $0 \pm 0,4$ mV, c'est-à-dire que nous avons des fluctuations pic à pic de 0,8 mV. J'ai pu trouver la valeur de la température correspondant à une résistance de 12500 Ω en utilisant une formule qui m'a été donnée par Fabrice WIOTTE ingénieur électronicien du LPL (voir annexe 9):

$R(T) = R(25) \times e^{[B(25/100)(1/T - 1/T25)]}$ c'est la résistance du thermistor en fonction de la température en kelvins.

Donc avec $R(T) = 12500 \Omega$, $B(25/100) = 3988 K$, $T(25) = 298,15K$, $R(25) = 10000$

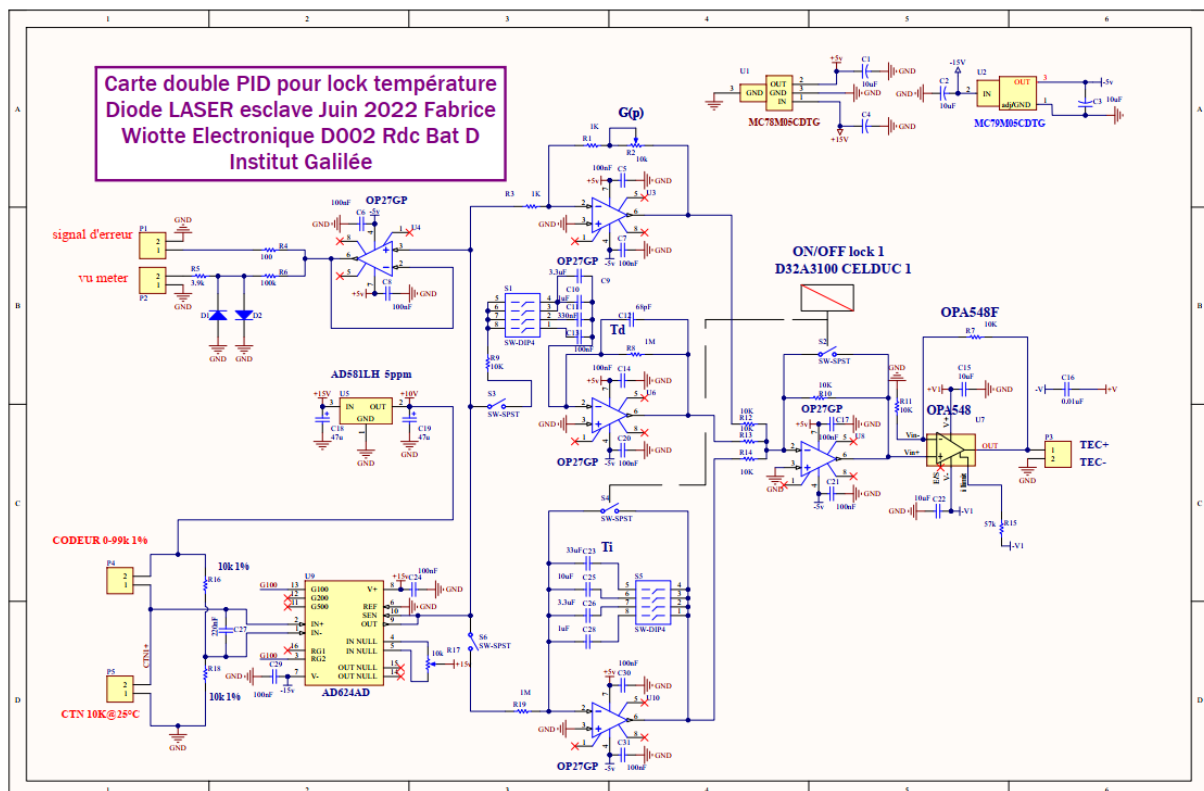
$$\text{On a } T = \frac{B\left(\frac{25}{100}\right)}{\ln\left(\frac{R(T)}{R(25)}\right) + \frac{B\left(\frac{25}{100}\right)}{T(25)}} = 293,38\text{K} = 20,23^\circ\text{C}$$



J'ai calibré l'oscilloscope de façon à ce que soit affiché on ordonnée 1 mV/division et en abscisse 5 ms/division. La période étant de 20ms ce qui est très rapide et normal, car l'appareil est en 50Hz, ces fluctuations pourraient donc être électroniques et pas nécessairement directement lié à la température.

Cette valeur pour le signal d'erreur me permet ensuite d'avoir la valeur de fluctuation du thermistor et de finalement avoir la valeur de la fluctuation en température.

Pour cela, j'ai dû utiliser un document qu'on m'a transmis concernant le fonctionnement du contrôleur en température.



En utilisant mes connaissances en électronique et avec l'aide de Ziyad j'ai donc pu avoir la valeur des fluctuations du thermistor ici CTN.

J'ai donc fait un schéma simplifié pour pouvoir calculer et je me suis aussi servis des feuilles de données de la boîte noire pour savoir ce qu'il y avait dedans.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

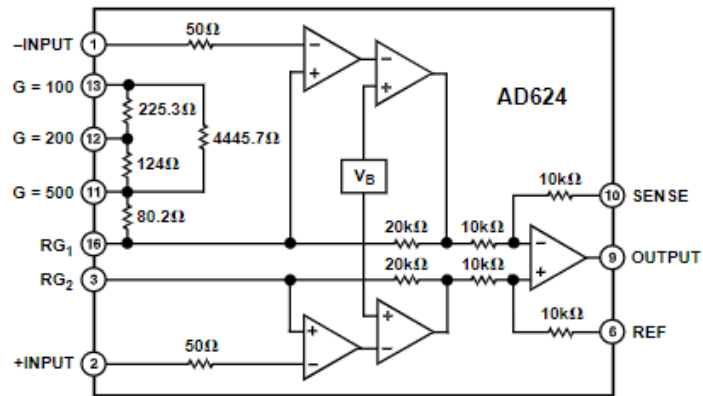


Schéma du contenu de la boîte noire dans le contrôleur en température

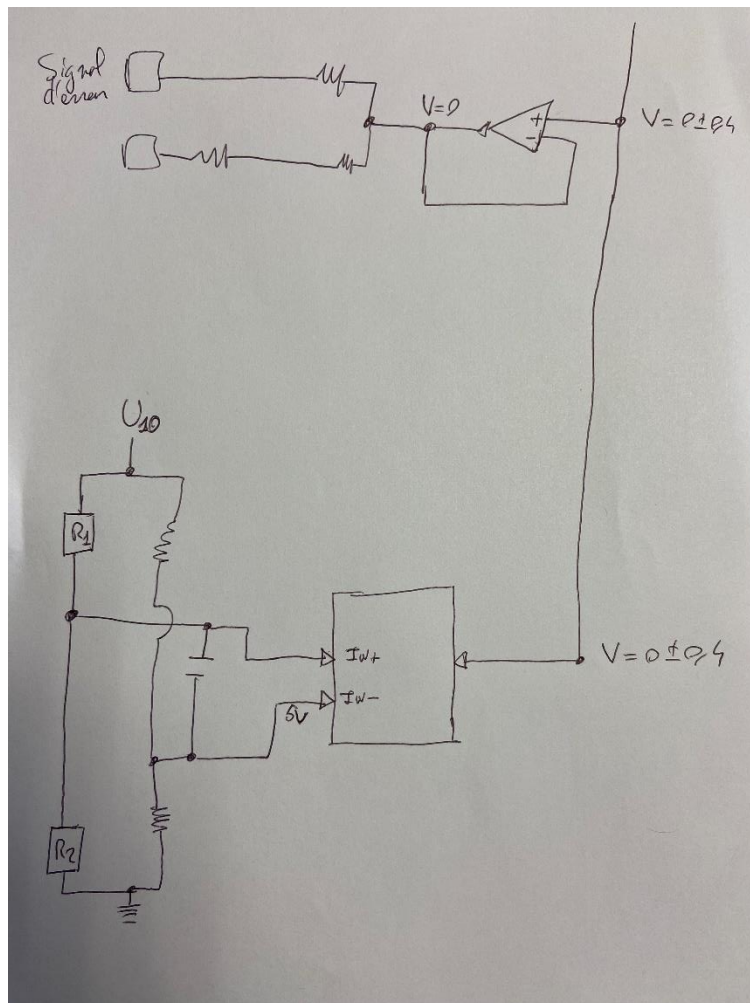


Schéma simplifié de la partie nécessaire du contrôleur en température pour les calculs suivants

En utilisant la formule du diviseur de tension je pouvais donc exprimer V_{IN+} en fonction des résistances :

$$V_{IN+} = U_{10} * \frac{R1}{R1+R2}$$

Ensuite après cela je pouvais donc exprimer la formule suivante :

$$e(t) = V_{OUT} = G(V_{IN+} - V_{IN-}) \text{ Donc } e(t) = G(U_{10} * \frac{R1}{R1+R2} - V_{IN-})$$

Or si on veut les fluctuations du thermistor $\delta R1$ alors on dérive $e(t)$ en fonction de $R1$

$$\text{Donc } e(t) = G(U_{10} * \frac{R1}{R1+R2} - V_{IN-}) \longrightarrow \frac{de(t)}{dR1} = \frac{R2}{(R1+R2)^2} \text{ Avec } \delta e(t) = \frac{de(t)}{dR1} \delta R1$$

$$\text{Alors } \delta R1 = \frac{\delta e(t) (R1+R2)^2}{R2}$$

Avec résistance de consigne = $R2 = 12,5 \text{ k}\Omega$, résistance du thermistor = $R1 = 12,5 \text{ k}\Omega$,

signal d'erreur = $e(t) = V_{OUT} = 0$, $\delta e(t) = 0,0004 \text{ V}$

$U_{10} = 10 \text{ V}$, $V_{IN-} = 5 \text{ V}$, $G = 100$

$$\text{On a } \delta R1 = 20 \Omega$$

Maintenant que j'ai la fluctuation du thermistor je peux, grâce au manuel fournis avec le contrôleur en température, (voir annexe 10) calculer à l'aide de l'équation de Steinhart-Hart la fluctuation en température :

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3$$

Avec $A = 1,12924 \cdot 10^{-3}$, $B = 2,34108 \cdot 10^{-4}$ et $C = 0,87755 \cdot 10^{-7}$

Pour avoir la variation en température donc δT il fallait que je dérive cette formule donc :

$$-\frac{dT}{T^2} = B \frac{dR}{R} + 3C (\ln(R))^2 * \frac{dR}{R}$$

$$dT = -\frac{T^2 * dR (B + 3 * C * (\ln(R))^2)}{R}$$

Avec $dR = 20 \Omega$, $R = 12500 \Omega$ et $T = 293,4 \text{ K} = 20,23^\circ \text{C}$

$$\delta T = 0,035 \text{ K}$$

Donc nous avons une fluctuation en température de $0,035 \text{ K}$ centre à pic, nous avons donc un asservissement qui fonctionne correctement.

f. Lambda-mètre

Le Lambda-mètre est un interféromètre qui permet de savoir qu'elle est la fréquence du laser et de voir ses différents modes et sauts de mode. J'ai pu voir qu'il était bien monomode étant donné qu'il avait des pics fins et bien définis (voir annexe 11).

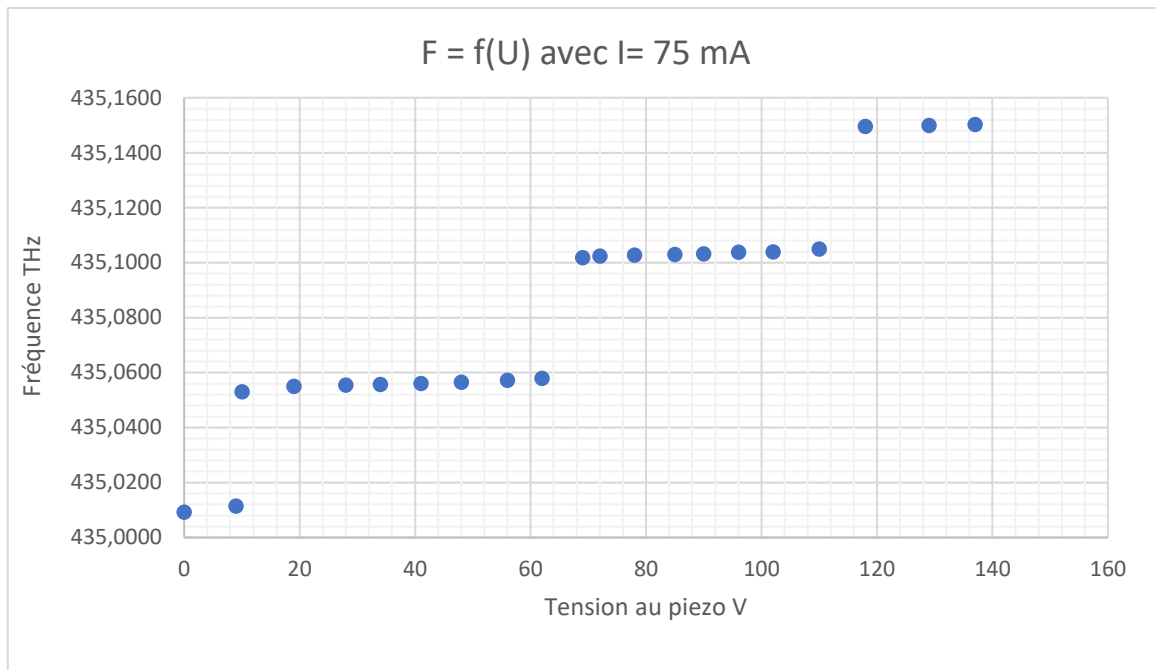
Je devais donc mettre le laser maître STR2 à la même fréquence que le STR1 qui est de 434,8290 THz. J'ai donc pu observer, pour le STR2, qu'un mode du laser avait une gamme de fréquence de 100 MHz, c'est-à-dire que la fréquence pouvait augmenter de 100 MHz avant que le laser ne change de mode. J'ai également remarqué que la diode présente une hystérésis : le saut de mode n'advient pas à la même valeur de courant, selon que l'on augmente ou diminue l'intensité du courant et de la tension au piézo.

Pour pouvoir modifier la fréquence du laser, je pouvais intervenir sur deux paramètres, la tension au piézo dans le laser et l'intensité du laser. Lorsque la tension au piézo augmentais la fréquence augmentais et inversement pour l'intensité (voir annexe 12). Etant donné que l'on veut travailler avec le maximum de puissance en sortie du laser alors je me suis placé à une intensité de 75 mA ce qui donne une puissance de 31 mW. J'ai ensuite augmenté la valeur de la tension au piézo de 0 à 140 V ce qui m'a permis d'observer les gammes de fréquence pour lesquelles on changeait de mode.

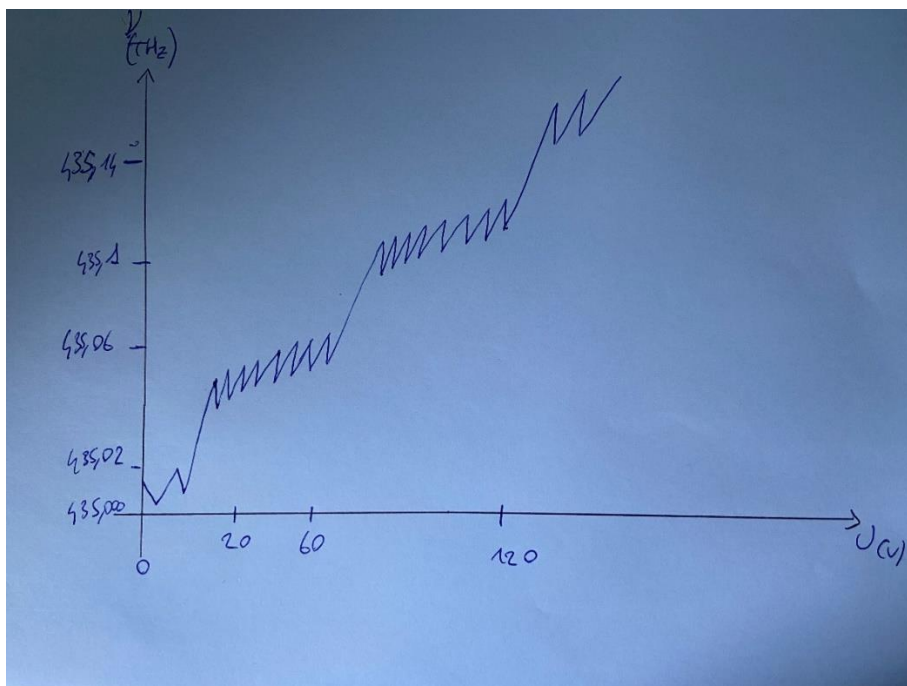
Après avoir observé cela, j'ai pu trouver la bonne combinaison de ces deux paramètres pour avoir la même fréquence que le laser STR1. Il fallait donc une tension au piézo de 106 V une intensité de 73 mA pour une puissance de 29,7 mW

J'ai d'abord commencé par modifier uniquement la tension au piézo sans utiliser le feedforward qui permettait d'augmenter la tension et de diminuer proportionnellement l'intensité de 0,8 fois par rapport à l'intensité de départ.

La courbe de la fréquence en fonction de la tension au piézo (voir annexe 13) :



Malheureusement je n'ai pas pris tous les points nécessaire, j'ai uniquement pris les point à la fréquence maximale de chaque mode mon graphique aurait dû avoir l'allure suivante :



Ce schéma est représentatif de ce que j'ai pu observer sur le lambda-mètre. On observe donc deux types de sauts de modes du laser différent. L'un étant un saut vers le bas et l'autre un saut vers le haut uniquement qui arrive trois fois.

Voici tout de même un zoom sur ce qui se passe après le premier saut de mode vers le haut :

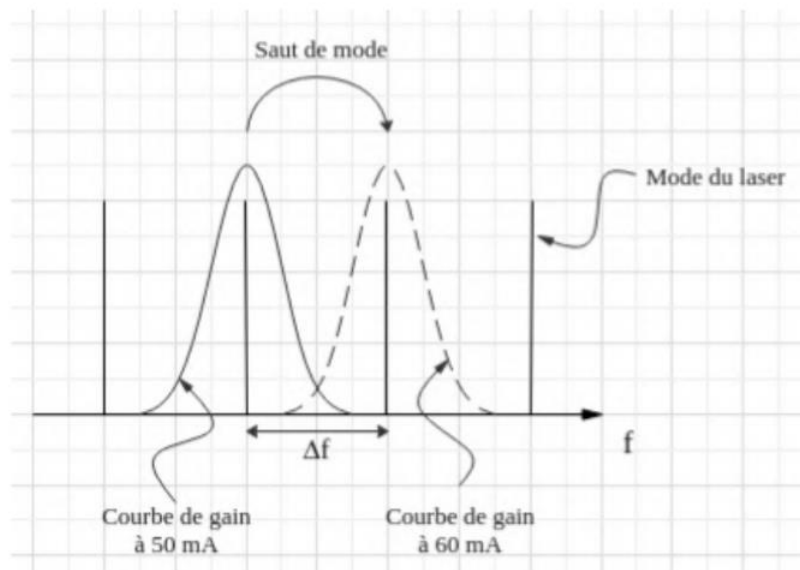
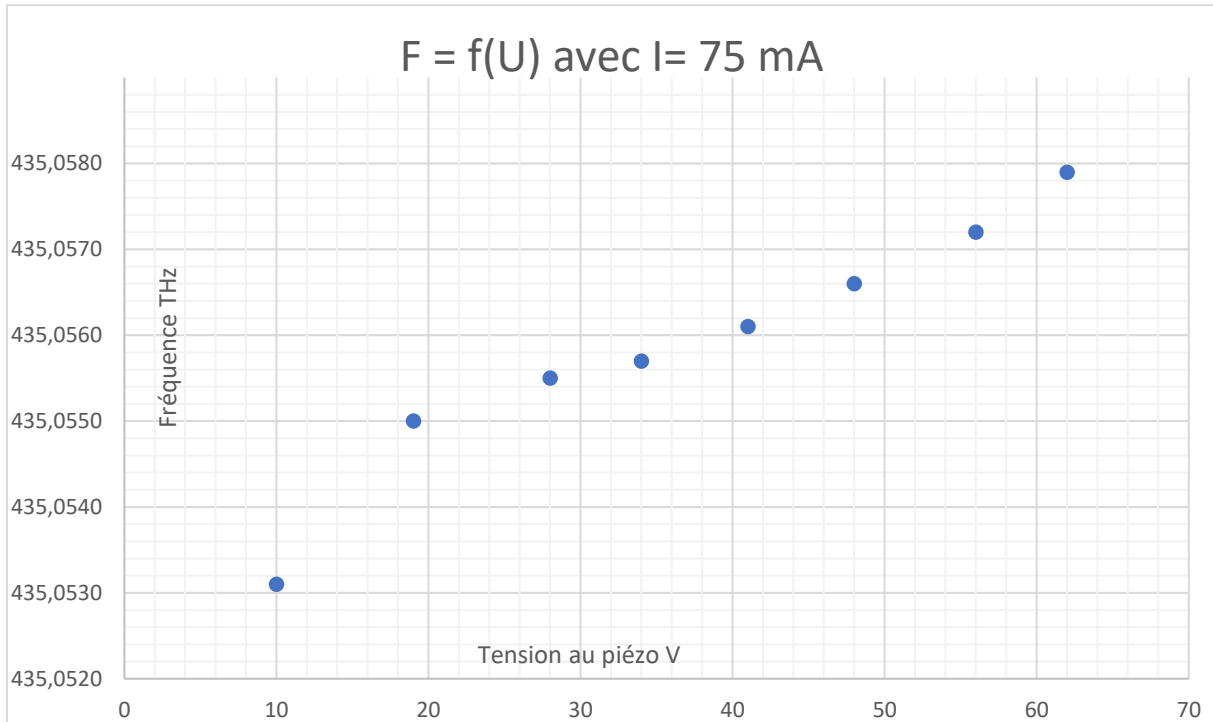


Schéma explicatif d'un saut de mode

Pour pouvoir mieux caractériser et étudier les différents modes et saut de modes du laser, il faudrait prendre plus de points pour un mode par exemple avec un échantillonnage plus fin. Cela permettrait donc d'observer s'il y a d'autres saut de mode qu'on ne peut pas observer actuellement avec les mesures que j'ai prises et bien sûr il faudrait aussi prendre la fréquence maximale et minimale pour chaque mode pour avoir une courbe représentative de ce que j'ai pu observer sur le lambda-mètre.

g. Battement

Le battement permet de vérifier la largeur spectrale de notre laser STR2, de la comparer à celle du laser STR1 qui est donc celle de référence. On veut donc voir sur l'oscilloscope un signal sinusoïdal montrant la différence de Fréquence entre les deux lasers. On voulait voir des oscillations uniquement lorsque les deux faisceaux passaient dans la photodiode et lorsqu'il n'y en avait qu'un nous devons voir une courbe plate.

J'ai donc fais le montage suivant pour faire ce battement :

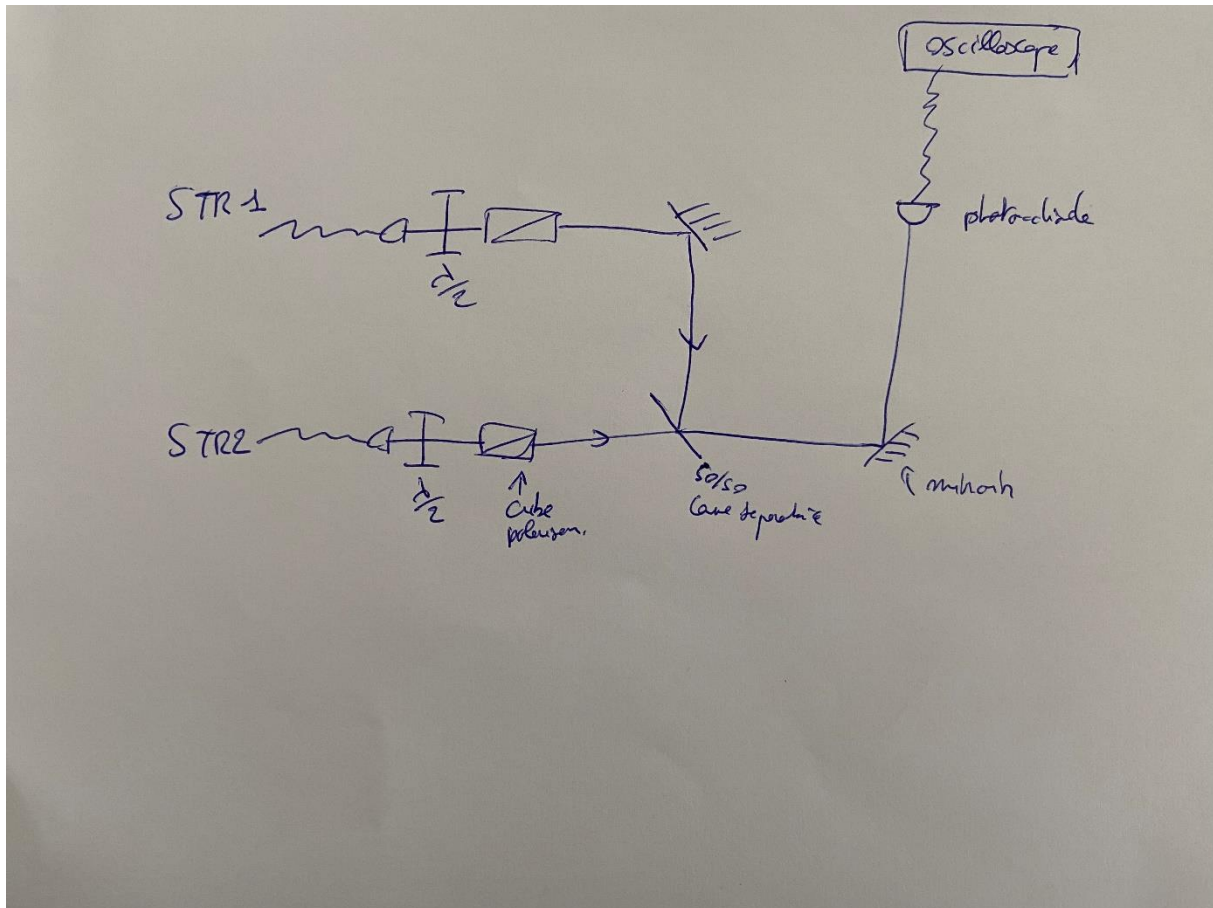


Schéma de l'installation des éléments optiques pour effectuer un battement (voir annexe 14)

Pour pouvoir observer un battement correctement, il fallait collimater le faisceau des deux lasers et les superposer. Pour les superposer, il fallait se servir de vis se situant sur les montures des miroirs et de la lame séparatrice 50/50, qui permettent de régler l'angle et donc la position du faisceau verticalement et horizontalement. On voulait que les faisceaux soient superposés sur la lame séparatrice jusqu'à la photodiode.

Malheureusement, le battement ne pouvait pas être fait, car le laser STR1 avait des fluctuations de la polarisation et de l'intensité après le cube dû au fait que la fibre optique vibre à cause d'un ventilateur. En effet, nous observions que lorsque l'on cachait un faisceau, il y avait quand même une courbe sinusoïdale. Cela montre donc aussi que le maintien de polarisation est très important.

CONCLUSION

Ce stage m'a permis de découvrir un sujet dont je n'avais encore jamais entendu parler, les horloges atomiques et le laser super-radiant. Bien qu'étant des sujets de physiques fondamentales assez complexes à mon niveau, j'ai énormément appris, que ce soit d'un point de vue théorique ou expérimental et pratique.

Bien que je n'ai pas rempli entièrement l'objectif de ce stage qui était d'assembler et concevoir une installation optique de refroidissement laser pour le jet d'atomes de Strontium, j'ai lors de mon stage été initié à la recherche. J'ai pu comprendre le but de l'expérience dans les grandes lignes et j'ai pu utiliser de nombreuses compétences acquises et en apprendre de nouvelles.

Lors de ce stage, je me suis rendu compte qu'il fallait savoir gérer son emploi du temps soi-même, c'est-à-dire se fixer des objectifs chaque jour sinon je n'avançais pas dans mes objectifs, j'ai aussi dû par moment chercher, sur internet ou dans des documents, par moi-même ce qui me permettait d'avancer dans mes objectifs. J'ai aussi pu remarquer qu'à certains moments, il était nécessaire de faire appel à d'autres membres du laboratoire pour avoir des conseils et se faire guider et donc pouvoir aller de l'avant.

Grâce à Benjamin PASQUIOU on m'a fait visiter différents ateliers du LPL comme l'atelier d'optique, qui est une chose rare de nos jours, Thierry BILLETON m'a accueilli et expliqué de nombreuses choses. L'atelier mécanique que Mathieu GONCALVES m'a fait visiter et où j'ai dû leur demander de modifier certaines pièces nécessaires à mon installation.

J'ai aussi pu assister à une présentation du projet d'un chercheur d'un autre laboratoire et j'ai aussi pu assister à une après-midi où les étudiants en thèses présentaient leur thèse, bien que tout n'était pas forcément accessible à mon niveau d'étude, ce fut intéressant de voir ce à quoi cela pouvait ressembler.

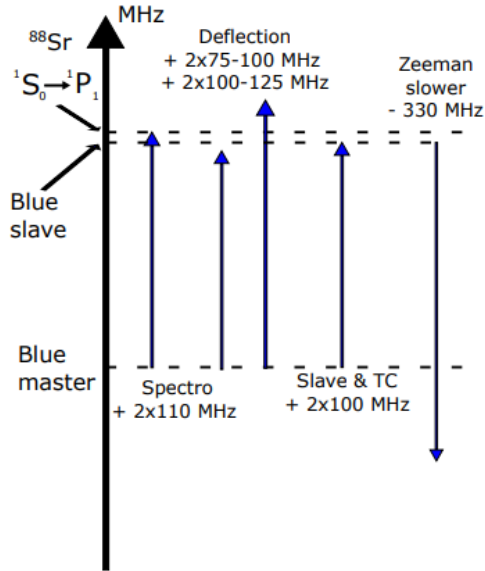
Bien que je voulais faire mon stage en entreprise et sur les matériaux, avoir fait mon stage au sein du LPL m'a permis de découvrir la recherche et ce qu'est la vie de chercheur, de constamment s'informer, d'être curieux et d'échanger avec les autres chercheurs. Il faut être passionné.

Je voulais donc au départ uniquement continuer mes études dans un Master en Science Génie des Matériaux, désormais mon projet d'étude et professionnel ont légèrement changé, j'aimerais continuer à étudier la Physique Fondamentale et les Matériaux et donc si possible lier ces deux domaines d'études.

ANNEXES

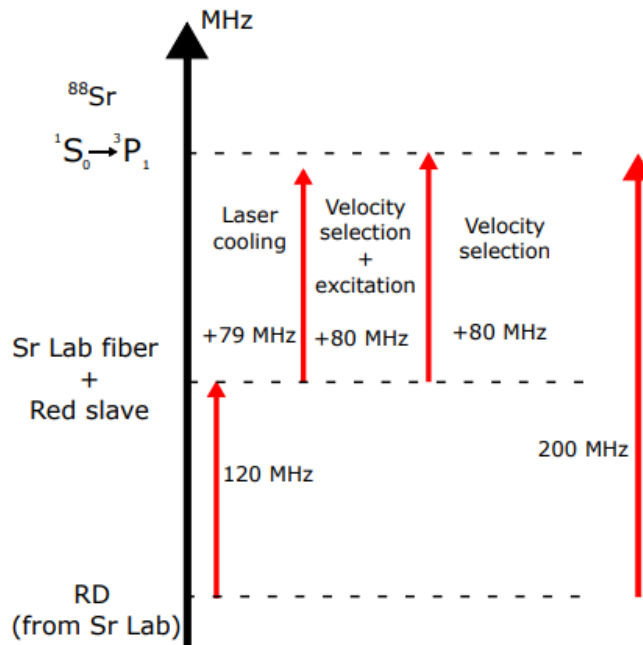
Annexe 1 :

Transition de l'état $1S_0$ à l'état $1P_1$



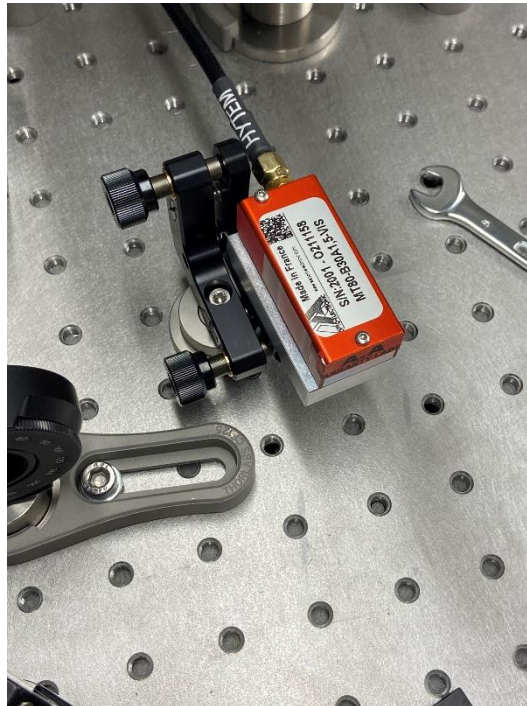
Annexe 2 :

Transition de état $1S_0$ à l'état $3P_1$



Annexe 3 :

Modulateur Acousto-optique



Annexe 4 :

Caractérisations des lasers :

Laser rouge maitre STR2

Courant (mA)	Puissance optique émise par le laser (mW)
0,4000	0,0030
10,4000	0,0070
15,4000	0,0130
20,4000	0,0220
22,4000	0,0270
23,4000	0,0300
24,4000	0,0340
25,4000	0,0380
26,4000	0,0420
27,4000	0,0480
28,4000	0,0540
29,4000	0,0610
30,4000	0,0700
32,4000	0,0910
33,4000	0,1040

34,4000	0,1200
35,4000	0,1390
36,4000	0,1630
37,0000	0,1760
37,1000	0,1790
37,2000	0,1830
37,3000	0,1870
37,3600	0,1980
37,3700	0,2300
37,3800	0,2600
37,3900	0,3100
37,4000	0,3390
37,4100	0,3700
37,4400	0,4100
37,4500	0,4300
37,5000	0,5100
37,5500	0,5900
37,5600	0,6070
37,5700	0,5170
37,5800	0,5340
37,5900	0,5460
37,6000	0,5630
37,6500	0,6590
37,7000	0,7280
37,7500	0,7970
37,8000	0,8650
37,8500	0,9200
37,9000	0,9800
37,9500	1,0460
38,0000	1,1020
38,1000	1,1760
38,2000	1,2100
38,3000	1,3400
38,4000	1,4500
38,5000	1,5600
38,6000	1,6670
38,7000	1,7630
38,8000	1,8610
38,9000	1,9530
39,0000	1,9750
39,4000	2,3870
39,5000	2,4720
40,0000	2,8800
40,4000	3,2300
41,4000	3,7500

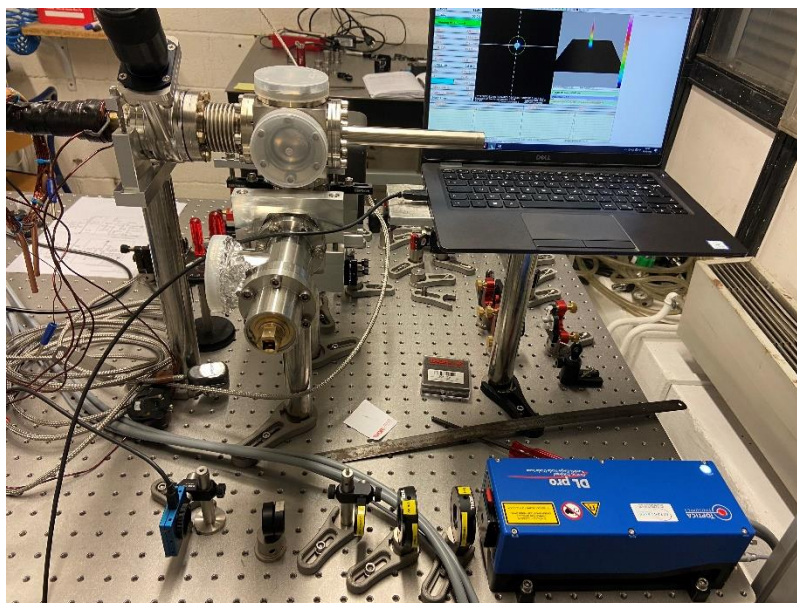
42,4000	4,8300
43,4000	5,6400
44,4000	6,3600
45,4000	7,1600
46,4000	7,9700
47,4000	8,6000
48,4000	9,4700
49,4000	10,3600
50,4000	11,2300
55,4000	15,4600
60,4000	19,3700
65,4000	23,6000
70,4000	27,8200
75,4000	31,8000
80,0000	35,0000

Annexe 5 :

Caractérisation du waist :

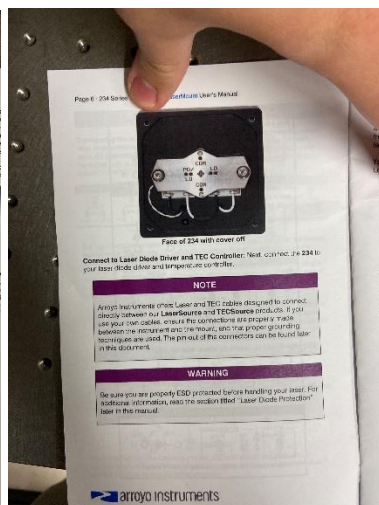
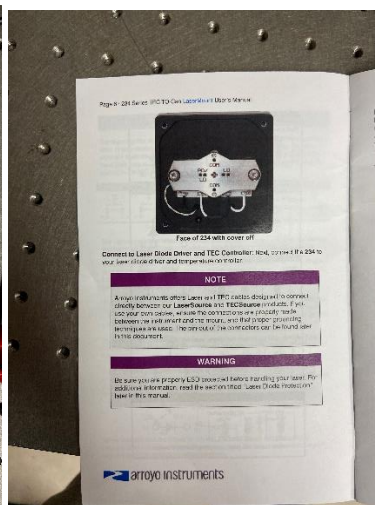
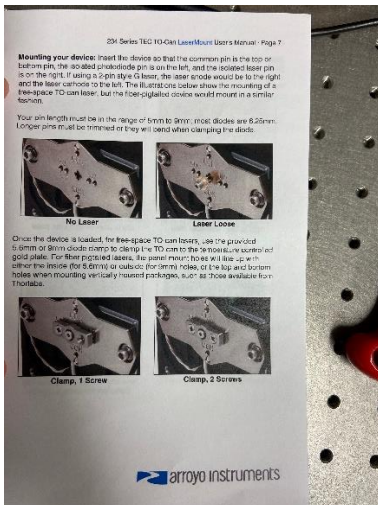
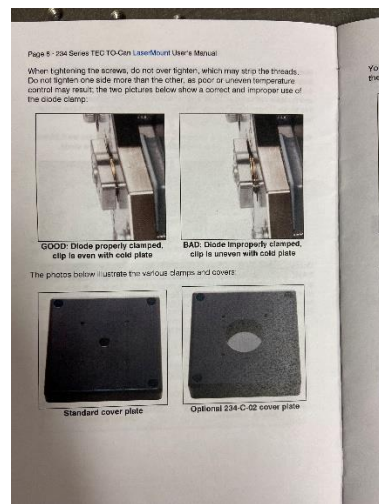
X (cm)	delta x	waist vertical (um)	delta waist	waist horizontal (um)
15	0,1	150	5	97,5
17	0,1	111	2	89
19	0,1	87,5	2	97,5
20	0,1	79,5	3	98
21	0,1	90	12	103
23	0,1	120	10	130
25	0,1	155	14	171

Installation pour la caractérisation du waist



Annexe 6 :

Monture de la diode laser pour le laser esclave



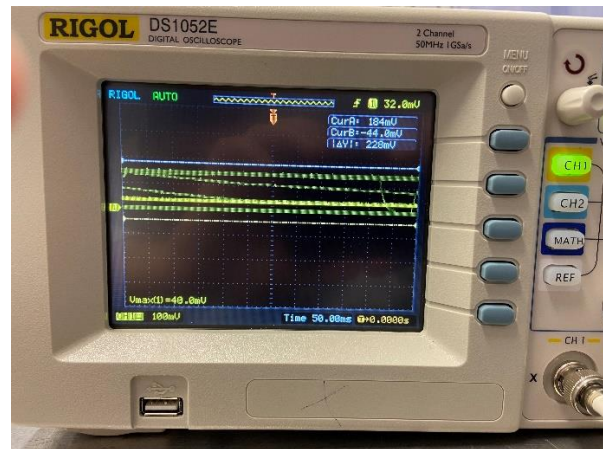
Annexe 7 :

Laser rouge esclave

P (mW)	I (mA)
0,001	0
0,006	3
0,011	5
0,016	7
0,021	9
0,023	10
0,038	15
0,099	20
0,105	21
0,129	22
0,233	23
1,546	24
2,658	25
4,27	26
6,38	28
9,06	30
12,17	32
14,13	34
16,75	36
19,47	38
21,87	40
29,2	45
35,8	50
42,6	55
49,8	60
56,9	65

Annexe 8 :

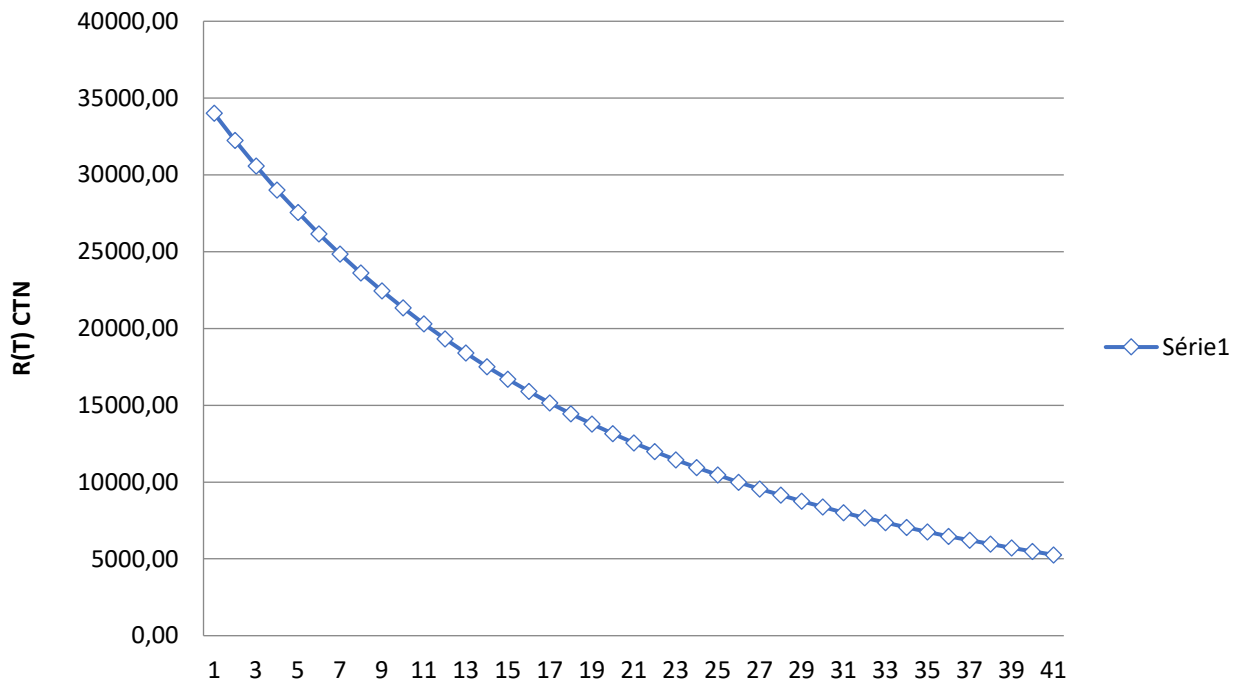
Installation pour le maintien de polarisation



Annexe 9 :

R(T) CTN en ohms	T en Kelvins	T en °C
34015,09	273,15	0
32250,98	274,15	1
30590,21	275,15	2
29026,07	276,15	3
27552,34	277,15	4
26163,24	278,15	5
24853,38	279,15	6
23617,75	280,15	7
22451,70	281,15	8
21350,89	282,15	9
20311,25	283,15	10
19329,03	284,15	11
18400,71	285,15	12
17522,99	286,15	13
16692,83	287,15	14
15907,35	288,15	15
15163,89	289,15	16
14459,94	290,15	17
13793,18	291,15	18
13161,42	292,15	19
12562,61	293,15	20
11994,84	294,15	21
11456,32	295,15	22
10945,37	296,15	23
10460,42	297,15	24
10000,00	298,15	25
9562,72	299,15	26
9147,29	300,15	27
8752,49	301,15	28
8377,17	302,15	29
8020,26	303,15	30
7680,76	304,15	31
7357,72	305,15	32
7050,24	306,15	33
6757,49	307,15	34
6478,68	308,15	35
6213,07	309,15	36
5959,95	310,15	37
5718,67	311,15	38
5488,62	312,15	39
5269,20	313,15	40

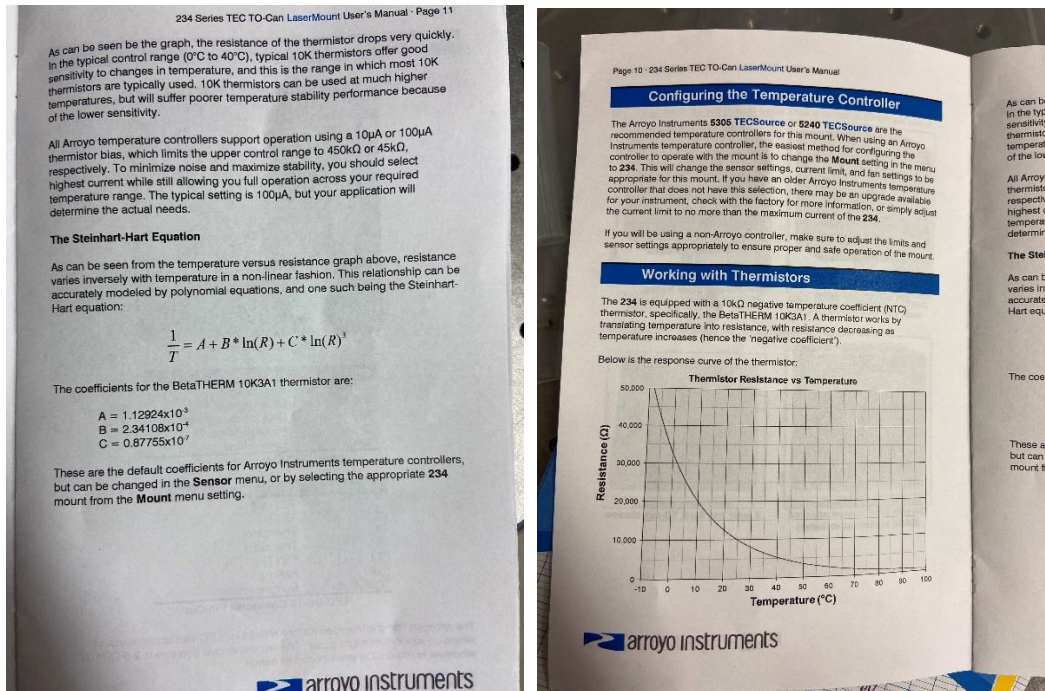
Courbe CTN B57861S103F4 10k@25°C



44	Resistance CTN en fonction de la température en Kelvins
45	$R(T)=R(25) \times e[B(25/100)(1/T-1/T25)]$
46	T(25)=298,15K
47	B(25/100)=3988 K
48	

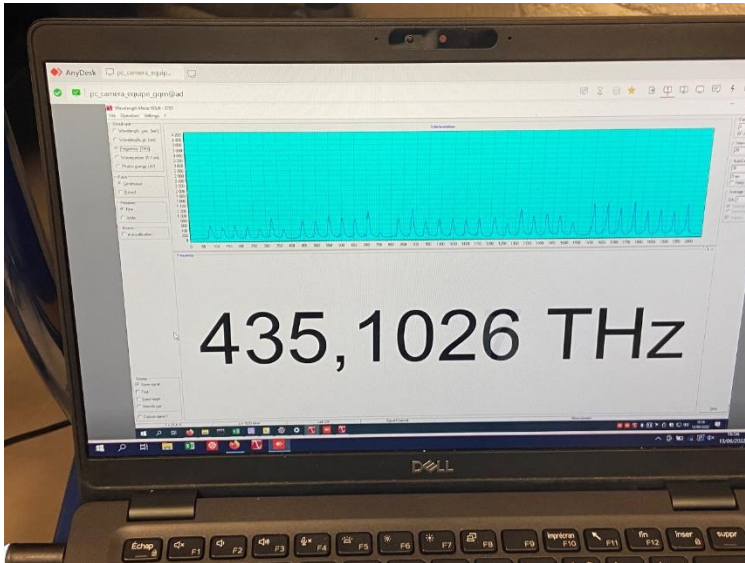
Annexe 10 :

Documentation du contrôleur en température



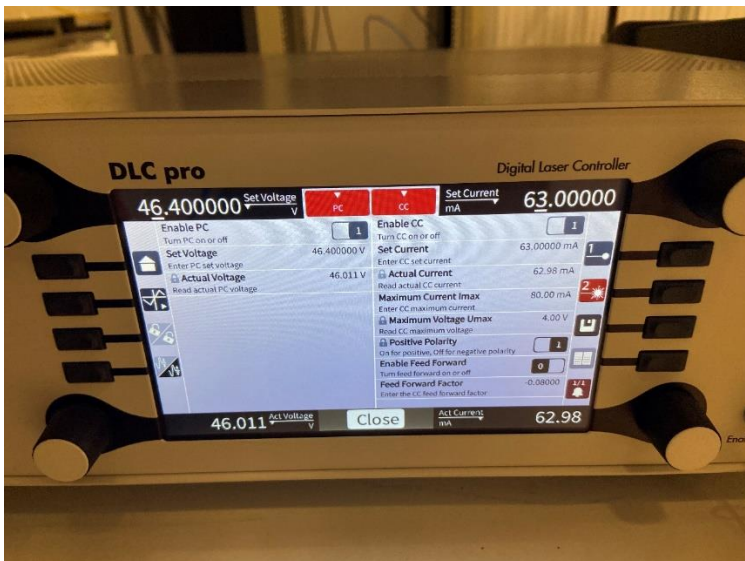
Annexe 11 :

Lambda-mètre



Annexe 12 :

Contrôleur d'intensité et de tension au pièzo



Annexe 13 :

Sans feedforward

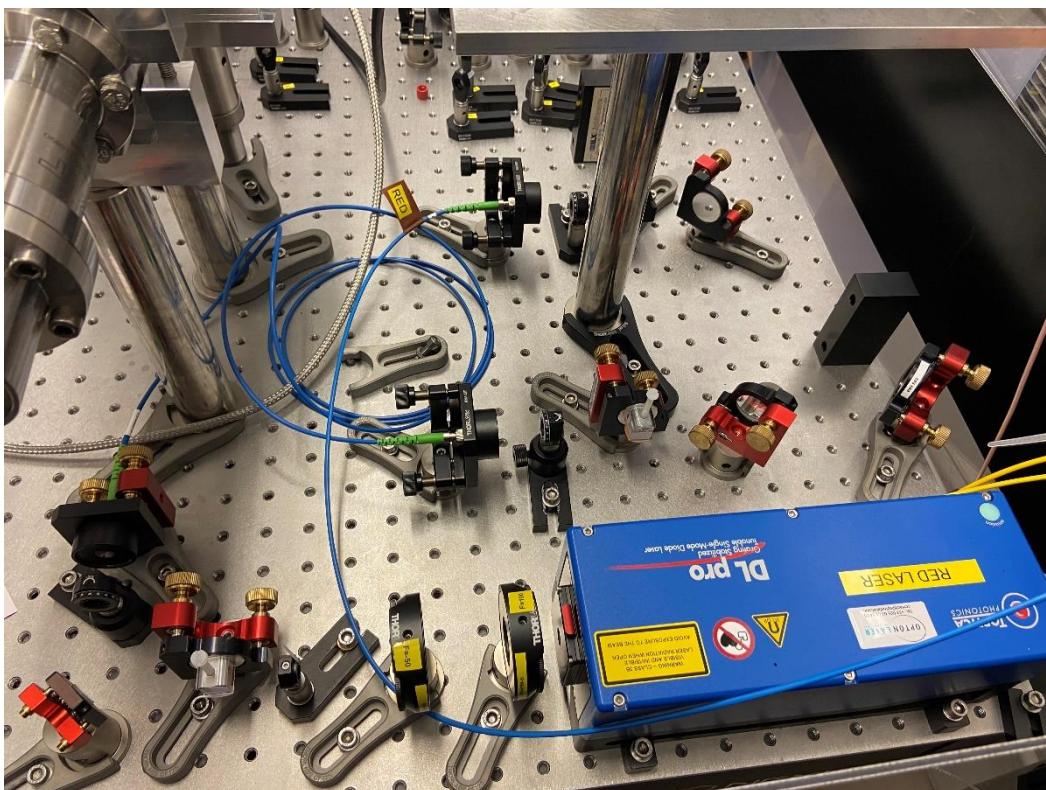
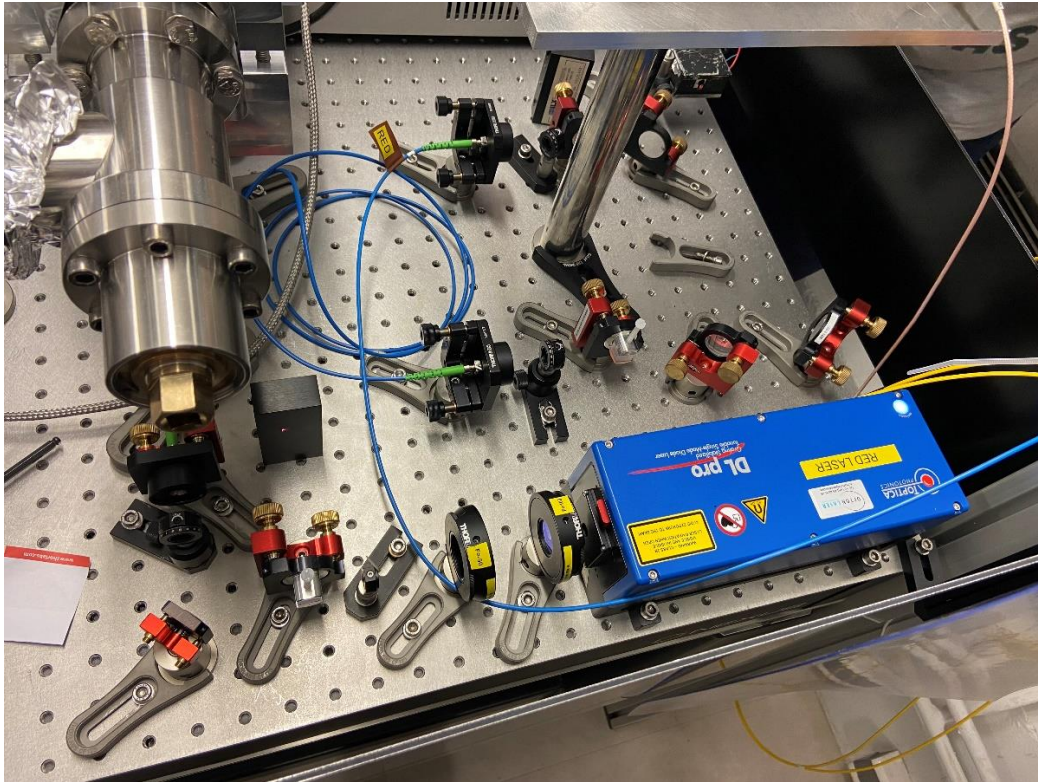
U Piezo (V)	I (mA)	f (THz)
0	75	435,0093
9	75	435,0115
10	75	435,0531
19	75	435,055
28	75	435,0555
34	75	435,0557
41	75	435,0561
48	75	435,0566
56	75	435,0572
62	75	435,0579
69	75	435,1018
72	75	435,1024
78	75	435,1028
85	75	435,103
90	75	435,1033
96	75	435,1038
102	75	435,104
110	75	435,105
118	75	435,1496
129	75	435,15
137	75	435,1503

Avec feedforward de -0,8

U Piezo (V)	I (mA)	f (THz)
14	80	434,801
104	73	434,829
110	73	434,831
122	71,64212	434,835

Annexe 14 :

Installations des optiques pour le battement



BIBLIOGRAPHIE

<https://www.thorlabs.com/>

<http://www-lpl.univ-paris13.fr/FR/Index.awp>

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48099/AD/AD624AD.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

<https://www.youtube.com/watch?v=CP-xVUtnR74>

<https://www.youtube.com/watch?v=pGNaHXwa52w>

<https://www.youtube.com/watch?v=UDwncuoIZLY>

https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1596&pn=PM630-HP#2625

http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/pdf/OPI_fr_M01_C01.pdf

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Superradiance>

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-superradiance-outil-technologie-physique-quantique-62599/>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Polarisation_\(optique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polarisation_(optique))

<http://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/04/refdp201021p12.pdf>

<http://venturi.marc.free.fr/Revisions/LaserDiapos.pdf>

<http://jfon.fr/wp-content/uploads/2017/10/D3-3-1-Laser-Principes-Proprietes.pdf>

<https://www.nature.com/articles/ncomms3109>

Rugged mHz-Linewidth Superradiant Laser Driven by a Hot Atomic Beam Haonan Liu , Simon B. Jäger , Xianquan Yu, Steven Touzard, Athreya Shankar , Murray J. Holland , and Travis L. Nicholson

https://fr.wikipedia.org/wiki/Miroir_semi-r%C3%A9flectant

<http://www.optique->

[ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C03/co/Contenu_02.html#:~:text=Un%20laser%20est%20dit%20%C2%AB%20monomode,les%20modes%20TEM00q%20lasent.&text=La%20r%C3%A9partition%20spectrale%20des%20modes,une%20approche%20%C2%ABondes%20planes%C2%BB.](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C03/co/Contenu_02.html#:~:text=Un%20laser%20est%20dit%20%C2%AB%20monomode,les%20modes%20TEM00q%20lasent.&text=La%20r%C3%A9partition%20spectrale%20des%20modes,une%20approche%20%C2%ABondes%20planes%C2%BB.)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Peltier

https://fr.wikipedia.org/wiki/Refroidissement_thermo%C3%A9lectrique

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermo%C3%A9lectricit%C3%A9>

<https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/terminale-s/optique/laser.html>

<https://femto-physique.fr/optique/pdf/presentation-laser.pdf>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Longueur_de_Rayleigh

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hyst%C3%A9r%C3%A9sis>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Coh%C3%A9rence_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coh%C3%A9rence_(physique))

https://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_wavemeter

<https://www.highfinesse.com/en/wavelengthmeter/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Interf%C3%A9rom%C3%A8tre_de_Michelson

<https://focenter.com/fr/explication-des-fibres-de-maintien-de-la-polarisation/>

<https://www.edmundoptics.fr/knowledge-center/application-notes/optics/what-are-beamsplitters/>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Refroidissement_d%27atomes_par_laser

<https://teams.femto-st.fr/equipe-ohms/yb-superradiant-laser>

<https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE47-0006>