

Rapport de Stage de 4ème année du Cycle Ingénieur à Polytech Paris Saclay

# SIEC

09 mai 2022 – 29 juillet 2022

## **Laboratoire Aimé Cotton**

Bâtiment 505 - Rue Aimé Cotton, 91405 Orsay Cedex, France

### **Responsable de stage : Yan PICARD**

yan.picard@universite-paris-saclay.fr

Tel : 06.70.28.43.52

### **Tuteur école : Kevin DUPRAZ**

kevin.dupraz@ijclab.in2p3.fr

Tel : 01.64.46.89.11

### **Chang ZHOU**

Département Photonique et Systèmes Optroniques (PSO)  
Assistant Ingénieur

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à mon maître de stage, **M. Yan PICARD**. Sa culture, son discours plein d'esprit et plein d'humour, son suivi régulier et les connaissances qu'il a patiemment et généreusement partagées tout au long du stage ont permis à mon stage de se dérouler dans de très bonnes conditions.

Ensuite, je tiens à remercier **M. Daniel COMPARAT** pour son encadrement patient, son enseignement désintéressé et ses conseils avisés, qui m'ont permis d'apprendre beaucoup de choses pendant le stage que je n'aurais pas pu apprendre en classe.

Je tiens également à remercier un autre stagiaire, **M. Sébastien LAVIELLE**, qui m'a beaucoup aidé tout au long du stage, il a été très serviable et gentil. J'ai effectué mon stage avec lui dans une ambiance agréable et détendue.

Je remercie également **M. Fabian ZOMER** et M. Bruno LUCAS de polytech, sans qui mon stage n'aurait pas été possible. Et **M. Kevin DUPRAZ**, qui a lu attentivement mon rapport de stage et m'a patiemment pointé mes problèmes à chaque étape, je lui en suis très reconnaissant.

Je suis particulièrement reconnaissant à ma famille et à mes amis de m'avoir soutenu pendant cette période, de m'avoir écouté et d'avoir répondu patiemment même quand eux et moi étions en décalage horaire.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé non citées dans ces lignes et qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce stage.

## Table des matières

<b>Remerciements .....</b>	<b>2</b>
<b>I.Présentation du Laboratoire .....</b>	<b>4</b>
- I.1 Présentation générale .....	4
- I.2 Organigramme .....	4
- I.3 LAC Tech' .....	7
<b>II.Présentation de mission et des résultats .....</b>	<b>9</b>
- II.1 Présentation générale .....	9
- II.2 L'excitation laser .....	10
- II.3 Le four de césium .....	13
- II.4 Le système d'acquisition temps et positions .....	14
- II.5 Simulation des trajectoires de particules avec Simion .....	15
<b>III.Présentation des apports personnels du stage .....</b>	<b>17</b>
- III.1 Séquence 1 .....	17
- III.2 Séquence 2 .....	19
- III.3 Séquence 3 .....	23
<b>IV. Apports personnel .....</b>	<b>27</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>28</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>29</b>
- A.1 Spectroscopie Laser .....	29
- A.2 Caractérisation du four de césium .....	31

## I. Présentation du Laboratoire

### I.1 Présentation générale

Dans le cadre de mon formation de quatrième année à Polytech Paris-Saclay, j'effectue un stage au laboratoire Aimé Cotton à Orsay du 9 mai au 29 juillet 2022.

Le laboratoire Aimé-Cotton (LAC), situé à Orsay, est une formation de recherche en évolution (FRE no 2038) du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et de l'université Paris-Saclay. Il fut créé à l'initiative du célèbre physicien Aimé Cotton, le projet fut démarré dès 1914 pour être finalement inauguré par Aimé Cotton le 9 Juillet 1928.

- **1927**

- Création du Laboratoire du Grand Electro-Aimant

- Créé en 1927, ce fut l'annexe du Laboratoire des recherches physiques de la faculté des sciences de l'Université de Paris. (1890-1970)

- **1951**

- Renommé en "Laboratoire Aimé Cotton"

- Premier laboratoire à prendre le nom d'une personne, cette initiative fut poussée par Pierre Jacquinot.

- **1967**

- Déménagement vers le campus d'Orsay

- Le LAC déménage sur le campus d'Orsay sous la direction de Robert Chabbal.

- **2015-2019**

- Le LAC devient une UMR

- Le LAC passe alors d'une UPR à une UMR sous triple tutelle (CNRS, Université Paris-Saclay, anciennement Paris-Sud, Ecole Normale Supérieure de Cachan).

- **2019-2021**

- Passage de l'UMR à la FRE

- L'UMR laisse place à la FRE 2038 reprenant le nom du laboratoire.

- **à partir de 2022**

- Le LAC à nouveau UMR

- A partir de janvier 2022, le LAC redeviendra une UMR sous la double tutelle du CNRS et de l'Université Paris-Saclay, avec un projet de relocalisation dans le bâtiment 505 sous la direction d'Olivier Dulieu.

### I.2 Organigramme

---

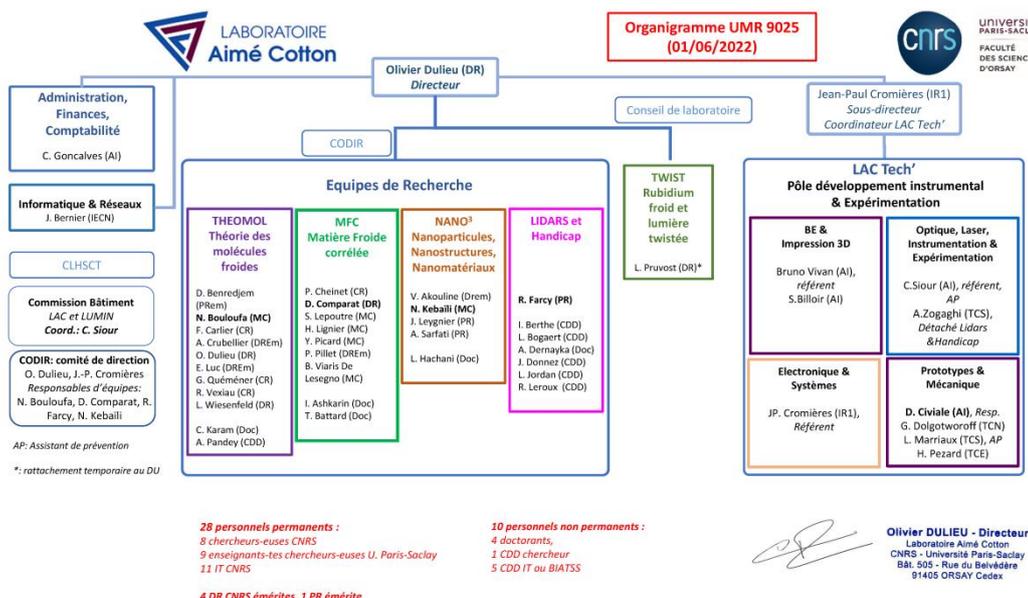


Figure 1: Organigramme du laboratoire

## • Théorie des Molécules Froides (THEOMOL)

L'équipe a réuni l'ensemble des théoriciens du laboratoire, organisés en 4 opérations de recherche (RO) :

OR1 : Structure : Atome, Molécule, Ion

OR2 : Formation, Refroidissement et Spectroscopie de Molécules Neutres et Ionisées

OR3 : Matière froide : dynamique, contrôle et applications

OR4 : Processus Microscopiques : Astrophysique, Plasma

Ces RUP impliquent des études très précises de la structure, des interactions, des collisions et du contrôle des systèmes quantiques. Chaque OR est coordonné par un responsable et implique plusieurs membres de l'équipe.

Les trois premières RUP seront dédiées à l'étude de la matière froide et ultrafroide, et la quatrième réunira l'étude des processus microscopiques en astrophysique et en physique des plasmas.

Ces dernières années, des chercheurs du monde entier ont réussi à produire des molécules froides dans leur état fondamental absolu, et l'équipe a joué un rôle majeur dans les avancées qui rendent cela possible. La question est maintenant de trouver les conditions optimales permettant d'atteindre la dégénérescence quantique afin d'obtenir des condensats de ces molécules dans leur état fondamental absolu.

OR1, OR2 et OR3 s'intéressent à l'exploration des ouvertures et des perspectives qui s'ouvriront, comme la manipulation et le contrôle de ces molécules, en faisant d'elles une plateforme alternative pour les simulations quantiques. Les processus astrophysiques (OR4) sont complémentaires des études précédentes car ils font intervenir des paramètres différents (en

particulier la masse) mais sont de forme similaire. Ainsi, l'équipe traitera des collisions non réactives (désexcitations ro-vibrationnelles) ou des collisions réactives, comme l'échange de charge entre des ions moléculaires et des espèces neutres. L'équipe étudiera également les processus microscopiques qui se produisent dans les plasmas chauds liés à la fusion.

#### • Matière Froide Corréée(MFC)

La problématique de l'axe MFC, qui comporte actuellement 7 chercheurs permanents, se développe autour de trois opérations de recherche: Mesures Fondamentales, Atomes de Rydberg et Sources d'ions et d'électrons froids. L'équipe a connu un renouvellement profond de la thématique, et des développements expérimentaux très importants, à partir des sujets des molécules froides et des gaz de Rydberg gelés. Ces deux thématiques se poursuivent avec une expérience de manipulation et refroidissement de la molécule de BaF, des études spectroscopiques et d'interactions à quelques corps comme entre atomes de Rydberg de Cs et d'Yb, mais l'axe s'ouvre aussi à la physique fondamentale des particules via la manipulation laser d'atomes d'antimatière ou bien en questionnant le caractère ponctuel de l'électron et son dipôle électrique (EDM) éventuel.

#### • NANO<sup>3</sup>

Les activités de recherche de l'équipe (nanoparticules, nanostructures et nanomatériaux) s'inscrivent dans le cadre de la recherche et de l'ingénierie de la matière à l'échelle nanométrique. Leurs principales contributions continuent de reposer sur la production, la recherche et l'utilisation d'agrégats préfabriqués en phase gazeuse et/ou en solution. Cela peut être fait en étudiant les propriétés de leurs nanoparticules à jet libre, ou en les déposant ou en les transférant sur des substrats pour synthétiser des nanostructures et/ou des matériaux nanostructurés, comme alternative à la gravure photolithographique pour la manipulation atome par atome ou la technologie de fabrication chimique. Les activités de l'équipe ont connu une évolution majeure des thématiques et des paradigmes, de la physique de l'agrégation (l'agrégation est le sujet) à l'interface de la physique des systèmes complexes (l'agrégation est l'outil) avec la chimie, la biologie et/ou l'ingénierie. Une de leurs priorités est la valorisation des nanostructures à haute valeur ajoutée applicative. Ils ont diversifié leurs approches de synthèse et de caractérisation, tout en se concentrant sur des sujets historiques au laboratoire (milieux de dilution, agrégats, jets atomiques et moléculaires, lasers, spectroscopie, etc.). Les activités de recherche s'articulent autour de 2 activités de recherche qui sont au cœur des préoccupations sociétales actuelles : la santé et l'énergie.

#### • Lidars et Handicap

Le groupe développe des capteurs optroniques à destination des déficients visuels. Il est à l'origine des différentes cannes électroniques actuellement utilisées par les déficients visuels : Tom Pouce I, Tom Pouce II, Tom Pouce III.

Ces capteurs ont la particularité d'être capable de détecter des obstacles furtifs comme les

---

poteaux noirs fins anti-stationnement dans toutes les conditions climatiques, avec un très faible encombrement et une très faible consommation énergétique. Le nombre d'utilisateurs non-voyants des cannes électroniques issue du laboratoire est supérieur à celui des utilisateurs de chien guide en France.

Nous travaillons sur les différents supports de la mobilité : Cannes, déambulateurs, fauteuils électriques.

- **Lumière twistée et applications(TWIST)**

Pas encore d'informations précises

- **NanoOptique**

Cette activité s'articule sur deux axes de recherche centrés sur les propriétés optiques d'agrégats d'argent :

- Suivi optique en temps réel et in-situ de la réponse optique moyennée sur un ensemble de nanostructures formées à partir d'agrégats déposés (nanostructures dendritiques notamment) sur substrat de graphite (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)
- Etude des propriétés optiques de « nanofractales » uniques par Spectroscopie à Modulation Spatiale.

Cette deuxième voie nécessitait une amélioration préalable des substrats (notamment diminution de la densité surfacique et création contrôlée des défauts pour la nucléation hétérogène) tandis que la première voie était directement complémentaire de l'expérience de synthèse et dépôt d'agrégats et devant in fine s'y intégrer. Pour cela, c'est la première voie qui a été choisie en vue d'accéder à terme, à la fois à un suivi du taux de dépôt d'agrégats (partie proche UV du spectre correspondant aux transitions interbandes) et surtout à une détermination expérimentale des temps caractéristiques de la dynamique de formation des nanostructures (via l'évolution du spectre de résonances de plasmons de surfaces localisées (LSPR)).

### **I.3 LAC Tech'**

Le LAC Tech' est la plateforme technologique du LAC regroupant les métiers de soutien aux expériences. Il opère autour du développement instrumental et de l'expérimentation. Il est fonctionnel depuis le 1/1/2020 et regroupe 11 personnels évoluant dans 6 compétences métiers relevant tous de la BAP C. Le LAC Tech' est dirigé, coordonné et animé par Jean-Paul Cromières. Il est organisé autour de quatre branches qui travaillent ensemble pour accompagner le laboratoire dans ses projets scientifiques ou pour réaliser des prestations extérieures :

- (i) **Bureau d'études et Impression 3D**

Le bureau d'études reçoit les demandes de travaux des équipes de recherches. Il est en charge de

---

la réalisation d'études, de la mise en plan, du suivi de réalisation d'ensembles mécaniques d'un projet d'instrumentation scientifique. Ce service gère aussi les deux imprimantes 3D du laboratoire.

#### **(ii) Optique et Lasers**

Le service reçoit les demandes de travaux des équipes de recherche. Il est en charge de développement et d'exploitation de dispositifs optiques et lasers en lien avec des projets expérimentaux. Il assure la conception, mise au point de montages et la définition de protocoles de réglage de sources laser solides destinées notamment à la production de matière froide ou à la production d'anti hydrogène. Ces applications particulières requièrent un excellent contrôle des niveaux d'énergies à transmettre aux particules, soit des caractéristiques de longueur d'onde et de largeur spectrale d'une grande précision.

#### **(iii) Electronique et systèmes**

Le service Electronique & Systèmes du LAC Tech' est actuellement composé de deux ingénieurs de recherche. Le service conçoit des équipements électroniques originaux indispensables aux besoins des expériences réalisées au laboratoire. Une grande part des activités concerne le développement de systèmes électroniques associés à des projets pour lesquels aucune solution commerciale n'existe. Il peut également être impliqué de manière importante dans les projets scientifiques portés par des chercheurs. Les développements assurés par le service portent aussi bien sur la réalisation de fonctions simples (amplificateurs spécifiques, modulateurs, synthèse et mesure de signaux, capteur de distance par mesure de temps de vol, etc.) que sur des projets d'envergure proches de l'expérience de physique (mesure de longueur d'onde et asservissement laser, électronique de contrôle optique de mouvement d'une particule, etc.). Les compétences et savoir-faire du service sont l'électronique numérique (composants programmables FPGA Xilinx et microcontrôleurs Microchip), l'électronique analogique généraliste, les radiofréquences, la mesure de signaux de faible amplitude, la synthèse de signaux, le traitement du signal, la commutation de moyennes tensions. Programmation en langages évolués tels que LabVIEW ou le C, langage de synthèse numérique VHDL. Le service accueille régulièrement des stagiaires étudiant en IUT ou en écoles d'ingénieur.

#### **(iv) Prototypes et Mécanique**

Leur savoir-faire et leurs compétences particulières résident dans l'usinage de pièces mécaniques de précision. Ils conçoivent et fabriquent des pièces individuelles ou des assemblages mécaniques complets nécessaires aux expériences de physique et d'optique en laboratoire. Ils sont à l'origine de nombreux prototypes répondant aux exigences des travaux expérimentaux. Leur atelier dispose d'une machine-outil conventionnelle et de deux fraiseuses CNC, couvrant un large éventail de capacités d'usinage. Ils réalisent également de petites conceptions sur le logiciel Solidworks.

---

## II. Présentation de mission et des résultats

### II.1 Présentation générale

Le faisceau d'ions focalisé (FIB) est une technique d'analyse ponctuelle, de dépôt et d'ablation de matériaux, il est en production commerciale depuis environ vingt ans et il est principalement utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs, la science des matériaux et la biologie. Un dispositif FIB est un instrument scientifique similaire à un microscope électronique à balayage (SEM), sauf qu'il ne s'agit pas d'un faisceau d'électrons. Le système FIB utilise des faisceaux d'ions finement focalisés qui peuvent fonctionner à des courants de faisceau faibles pour l'imagerie ou à des courants de faisceau élevés pour la pulvérisation ou le fraisage spécifiques à un emplacement, et en condition des courants de faisceau inférieurs, la résolution d'imagerie FIB est comparable à celle du SEM, mais les deux modes d'imagerie de FIB utilisent des électrons secondaires et des ions secondaires, respectivement, tous deux produits par un faisceau d'ions primaires, il offre donc de nombreux avantages d'imagerie par rapport au SEM. Mais contrairement au SEM, le FIB est intrinsèquement destructeur pour l'échantillon.

Nous avons pu utiliser la technique FIB pour contrôler la position finale de chaque ion ou atome à l'échelle nanométrique sur une cible donnée, mais ce processus était lent et présentait de nombreuses incertitudes, nous avons donc utilisé une nouvelle source d'ions basé sur des ions piégés à froid ou des atomes piégés à froid ionisés par des photons, et il a une résolution très élevée. Mais l'ionisation directe des atomes froids produit des faisceaux d'ions de nature indéterminée. Heureusement, nous pouvons maintenant utiliser le piégeage à froid d'atomes photoionisés ou de faisceaux atomiques pour déterminer la corrélation entre les ions et les électrons, permettant un meilleur contrôle (voire complet) sur chaque ion individuel dans le faisceau.

Ce que nous allons faire, c'est utiliser une nouvelle source d'ions (ou source d'électrons) pour améliorer considérablement la résolution de l'instrument FIB. Étant donné que la résolution des instruments FIB est limitée par les multiples de dispersion d'énergie, d'aberration sphérique et d'aberration chromatique de la source primaire en optique ionique (généralement un métal liquide ionisé par champ), nous utilisons une colonne de faisceau d'ions focalisée unique : refroidie par laser atome et manipuler des particules chargées.

Dans cette expérience, nous avons utilisé le jet atomique de Césium comme source initiale de particules. En raison de l'incertitude des positions et des vitesses des particules, nous utilisons un four qui produit une dispersion à faible vitesse des particules. En même temps, nous avons utilisé trois lasers (852nm, 1470nm, 794.606nm) pour exciter les atomes dans un état de Rydberg, ce qui leur permet de s'ioniser spontanément et de libérer des électrons avec peu d'apport d'énergie. Les faisceaux d'ions Cs<sup>+</sup> obtenus à partir d'atomes refroidis par laser ont une très faible divergence angulaire et une très faible dispersion d'énergie, ce qui leur permet d'atteindre de très bonnes performances également à de faibles énergies de faisceau. Ensuite, nous projetons chaque électron et ion sur deux détecteurs de position temporelle à gauche et à droite avec un double spectromètre composé d'un extracteur, d'une lentille et d'un déflecteur, afin que nous

---

puissions obtenir la corrélation entre les électrons et les ions. Ensuite, nous utilisons des déflecteurs et une électronique rapide pour corriger la trajectoire de chaque ion en temps réel après avoir analysé la position des électrons, ce qui donne une source d'ions unique hautement focalisée et déterministe.

## II.2 L'excitation laser

Nous avons utilisé un système optique dans lequel trois lasers ionisaient les atomes de césium au centre du double spectromètre. Un four tire un jet continu de césium au centre de l'expérience, et les atomes sont immergés dans un champ électrostatique créé par deux électrodes. Ces électrodes avec un trou au centre permettent de projeter des ions et des électrons issus de l'ionisation des atomes de césium sur deux détecteurs.

Le dispositif global est représenté sur la figure 2 :

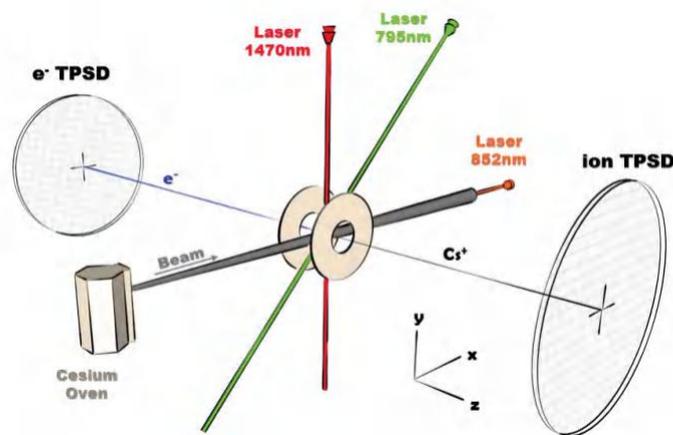


Figure 2: Organisation des 3 lasers autour du jet de césium

Le laser 852 nm est contre-propagé par rapport au jet de césium, le laser 1470 nm est placé perpendiculairement au jet, et le laser TISA (795 nm) est placé à 45°. La polarisation du laser TISA est définie comme : S sur l'axe (axe Z) du double spectromètre et P sur le plan (x, y) perpendiculaire au laser. Ils permettent à la sélection Doppler de réduire la dispersion de vitesse des atomes excités sur l'axe et sur l'axe.

Le diagramme d'excitation de l'atome de césium à trois photons est illustré à la figure 3 :

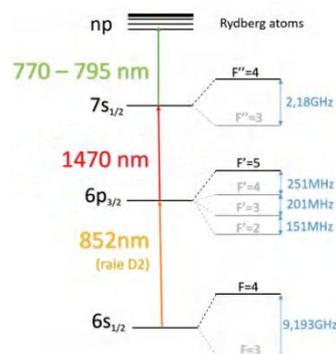


Figure 3: Schéma d'excitation du césium à 3 photons.

Le banc optique et l'électronique d'asservissement des deux premiers lasers sont une réplique optimisée désormais utilisée dans un projet expérimental d'étude des états de Rydberg, destiné aux étudiants de l'ENS. Ce nouveau système optique est plus compact et plus facile à décrire. Le troisième laser peut provoquer une ionisation directe (photoionisation) du césium, mais il s'agit en fait d'une auto-ionisation de l'état de Rydberg, car les électrons sont libérés sans apport d'énergie, ce qui minimise leur dispersion de vitesse.

• **Asservissement du laser 852 nm**

Le premier laser à 852.347 excite l'état fondamental ultrafin  $6S_{1/2}F = 4$  au niveau d'énergie ultrafine  $6P_{2/3}F' = 5$  (la raie D2 du césium, voir Figure 3). Ce laser est placé en contre-propagation par rapport au jet du fait de l'effet Doppler et afin de sélectionner une classe de vitesse bien précise.

Le laser 852 que nous avons utilisé est centrée sur la raie D2 du césium (la transition de  $6S_{1/2}$  à  $6P_{2/3}$ ) avec une largeur spectrale d'environ 600KHZ et des puissances jusqu'à 10mW. La raie D2 est observée à une température laser d'environ 45° C ( $V_{th} \approx 1,5V$ ) et un courant d'environ 130mA.

Le contrôle du niveau de liquide ultrafin  $6P_{2/3}F' = 5$  est réalisé par l'ensemble d'absorption saturable représenté sur la figure 4. Il se compose de deux cubes polarisants, un cube qui divise le faisceau en deux et de deux miroirs qui entourent l'ampoule à vapeur de césium. Puisque le coupleur de fibre est polarisé, le rapport de puissance de sortie du premier cube est ajusté en tournant le collimateur du faisceau.

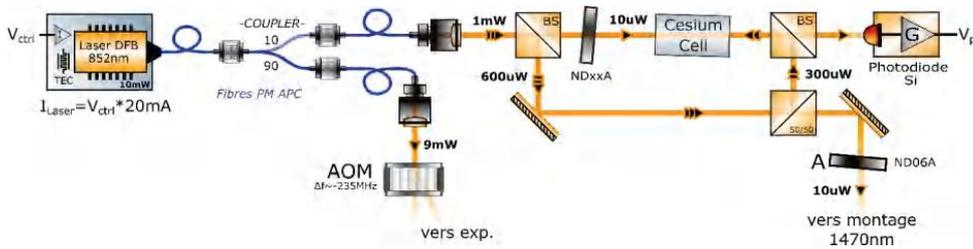


Figure 4: Montage à absorption saturée du laser 852nm.

L'exécution d'un balayage autour de la raie D2 du césium observe des pics d'absorption distincts au niveau hyperfin, nous obtenons  $6P_{2/3}F' = 5$  sur lequel nous espérons nous appuyer, l'absorption au niveau hyperfin de la raie D2 du césium obtenue à l'aide d'un composant d'absorption saturable pic, comme le montre la figure 5 :

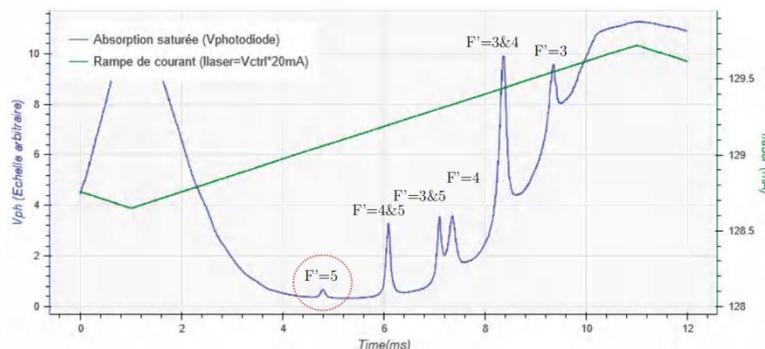


Figure 5: Pics d'absorption des niveaux hyperfins de la raie D2 du césium.

On retrouve des niveaux hyperfins  $F'=3, 4, 5$  et des intersections entre les niveaux 3&5, 3&4 et 4&5.

La pulsation du laser doit être réduite. Pour réduire cette fréquence, nous avons utilisé le seul modulateur acousto-optique (AOM) qui respecte cette limite. Elle nécessite l'adjonction d'un ensemble optique d'asservissement sur la transition souhaitée. L'asservissement est réalisé grâce à la détection de synchronisation numérique (DSN) à faible coût, qui peut être contrôlée via une interface Web (voir Figure 6).

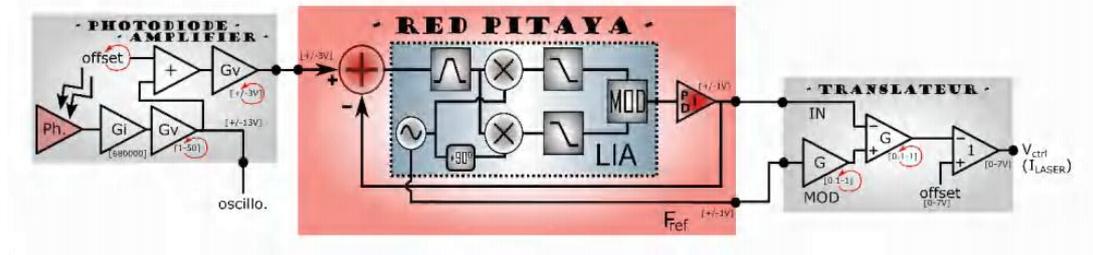


Figure 6: Montage électronique pour l'asservissement du laser 852nm.

• Asservissement du laser 1470 nm

Le laser que nous avons utilisé, le 1470nm, est centré sur la transition de  $6P_{2/3}$  à  $7S_{1/2}$  (1469,89nm), avec une largeur spectrale typique de 1 MHz et peut atteindre des puissances de 8mW. La raie d'absorption qui nous intéresse est observée à une température laser d'environ 25°C ( $V_{th} \approx 2,5V$ ) et un courant d'environ 56mA.

Le contrôle du niveau d'énergie hyperfine  $7S_{1/2} F'' = 4$  est obtenu par la composante d'absorption à deux photons illustrée à la Fig. 7. Ce montage nécessite l'obtention d'un laser qui a été contrôlé au niveau de la raie D2 du césium et placé dans une cellule à césium par rétropropagation. Cela permettrait au laser 1470nm d'exciter uniquement des atomes à vitesse nulle avec un état de  $7S_{1/2}$  et une transition de  $6P_{2/3}$  à  $7S_{1/2}$ . La puissance des deux faisceaux doit être maintenue faible pendant ce processus pour éviter une saturation transitoire.

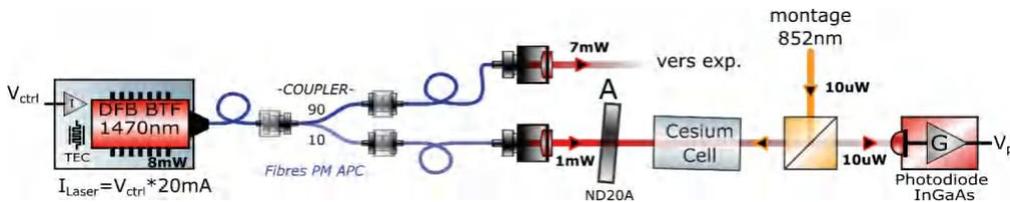


Figure 7: Montage d'absorption à 2 photons du laser 1470nm.

La durée de vie de l'état  $7S_{1/2}$  ( $\tau_{7S_{1/2}}$ ) est d'environ 48,4ns, c'est-à-dire  $\Gamma_{7S_{1/2}} = \frac{1}{\tau_{7S_{1/2}}} = 20.7\mu s^{-1} = 2\pi * 3.3\mu s^{-1}$ , donc notre largeur à mi-hauteur est d'environ 3,3MHz. Un balayage de courant a été effectué sur l'état  $7S_{1/2}$  du césium, et un pic d'absorption au niveau d'énergie hyperfine  $F''=4$  a été observé (voir Fig. 8). Nous utilisons le même système que le laser 852nm

pour l'asservissement.

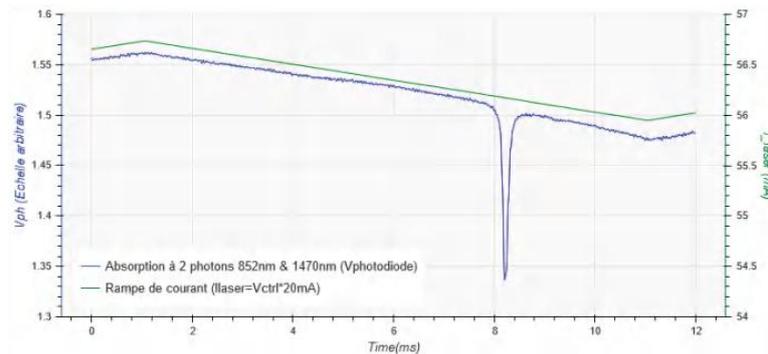


Figure 8: Pic d'absorption du niveau hyperfin  $7S_{1/2}F''=4$ .

• Asservissement du laser 794.606 nm

Le dernier laser est un laser Ti:Sapphire. Sa longueur d'onde est réglable de 725nm à 875nm et sera utilisée à environ 1W de puissance et 100KHZ de largeur spectrale. Sa longueur d'onde est contrôlée par un lambda-mètre avec une résolution d'environ 2MHZ et lui est connecté via Internet. A l'aide de l'interface web, nous pouvons sélectionner la longueur d'onde de notre choix pour contrôler le laser. Il peut "balayer" une grande surface près du seuil d'ionisation du césium, avec suffisamment de puissance pour ioniser le césium directement dans les bonnes circonstances. Il permet donc une excitation de l'état ultrafin  $7S_{1/2}F'' = 4$  à l'état de Rydberg  $nP_{2/3}$  ou  $nP_{1/2}$ .

### II.3 Le four de césium

Le but de cette expérience est de créer une nouvelle source de particules chargées à partir de l'ionisation d'atomes de césium, permettant de mieux focaliser le faisceau. La position et la vitesse de la particule (ion ou électron) à contrôler sont étroitement liées à l'incertitude de la position et de la vitesse de l'atome qui produit la particule. Par conséquent, une attention particulière doit être portée à la masse du nuage de particules précurseurs. Le four à césium a été choisi pour montrer qu'il est possible d'obtenir une source d'ions performante à partir d'un jet relativement simple. Une vue en coupe du four est représentée sur la figure 9 .

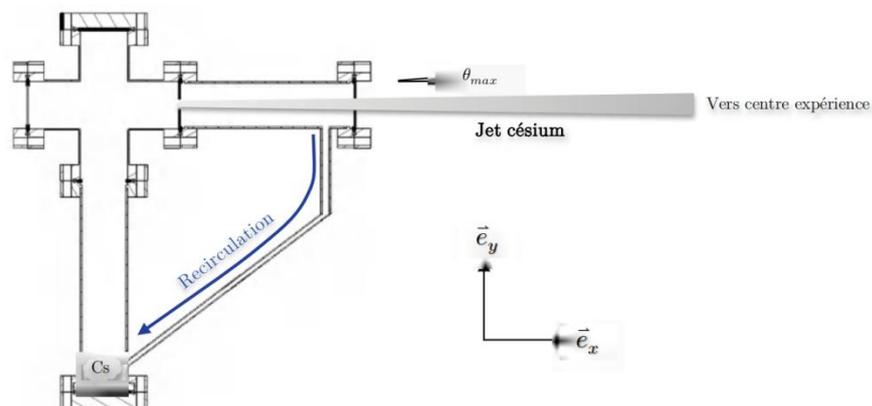


Figure 9: Plan en coupe du four de césium.

Le césium se dépose sur la partie inférieure de la croix en atmosphère sèche. L'ensemble du four est alors placé sous vide et entouré de ruban chauffant pour faire varier et réguler sa température. L'augmentation de la température se traduit par une différence de pression avec l'enveloppe externe, ce qui crée un jet en forçant le césium à travers les deux trous.

## II.4 Le système d'acquisition temps et positions

L'expérience demandait que la position initiale de l'électron soit déterminée le plus précisément possible après chaque ionisation du césium pour déterminer la position de son ion partenaire, et inversement. Cette réversibilité a nécessité la conception d'un double spectromètre pour les ions et les électrons générés par ionisation au césium au centre de l'expérience. Le spectromètre double est illustré à la figure 10. Une fois les atomes ionisés, les ions et les électrons sont projetés sur leurs détecteurs respectifs dans des directions opposées. Pour ce faire, les deux plaques sont séparées par 10 avec une différence de potentiel de 2200V ( $1=0$  et  $2=-2200V$ ), en soumettant les particules à un champ d'environ 220V/mm et en les accélérant en leur donnant un potentiel d'environ 1100eV au centre de la particule expérimentale.

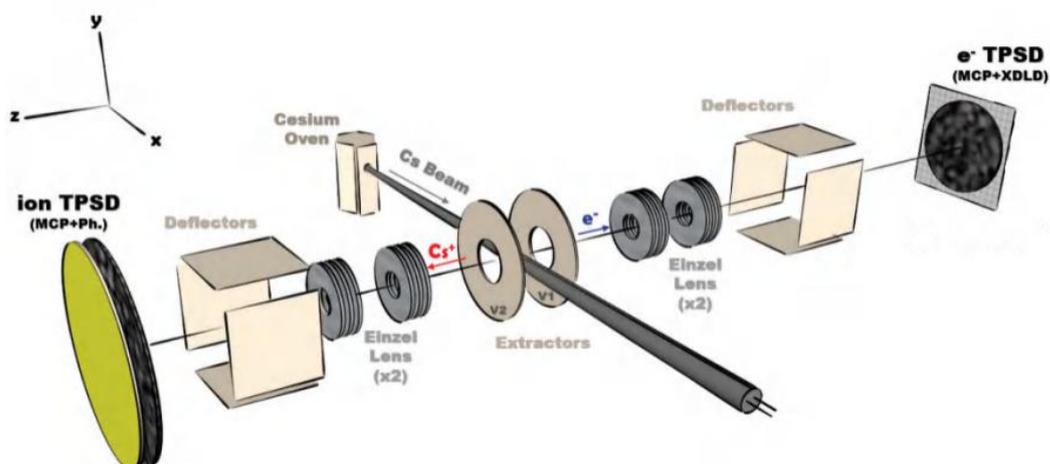


Figure 10: Le double spectromètre.

Pour déterminer les positions et les temps d'arrivée des électrons et des ions Cs+, il faut installer un détecteur à l'extrémité des deux spectromètres dédiés, et installer un système d'acquisition permettant de restituer au plus juste les différentes mesures. Développé par Yan Picard et ses collègues, ce système comprend un logiciel dédié, un détecteur "COBRA" avec caméra et boîtier de déclenchement, un circuit d'amplification, un circuit de balayage CFD (Constant Fraction Discriminator) et un centre de temps (TDC-V4), comme le montre la figure 11. Ce que j'ai fait, c'est remonter tout le système avec Yan en raison du déménagement du labo.

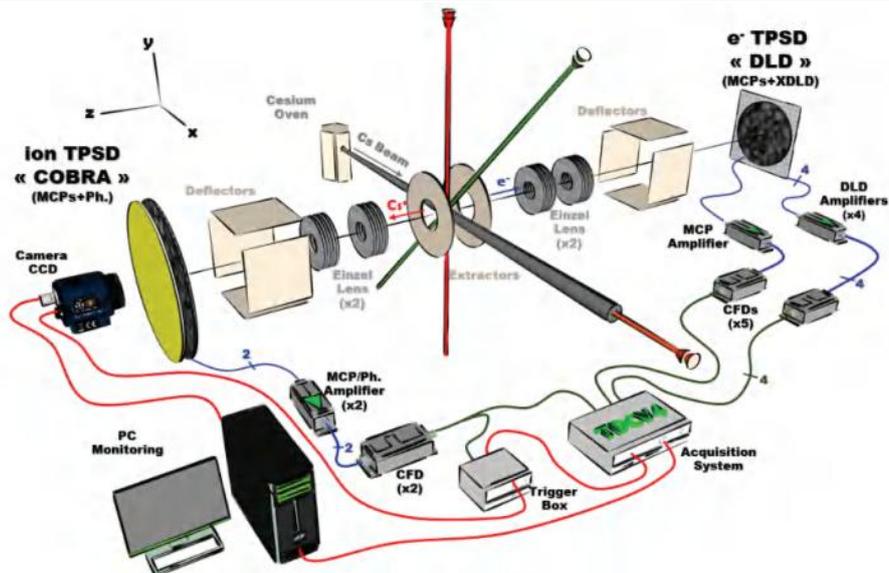


Figure 11: Schéma fonctionnel du dispositif expérimental.

- Ces deux différents types de détecteurs sont sensibles au temps et à la position et sont communément appelés « TPSD » (détecteurs sensibles au temps et à la position). Ils peuvent être utilisés à la fois pour la détection d'ions et la détection d'électrons, mais différent en termes de vitesse et de précision.

- Le détecteur "COBRA" se compose d'un ensemble de 3 MCP (Micro Channel Plates) qui amplifient le signal d'impact des particules des millions de fois, d'un écran phosphoreux qui clignotera après chaque impact, et d'une caméra rapide à l'endroit où ces événements sont enregistrés .

- Un deuxième détecteur nommé "DLD" (Delay Line Detector). Il comprend également un ensemble de 3 MCP pour amplifier le signal à l'emplacement de l'impact de chaque particule, et une anode, fournissant l'emplacement 2D de la particule incidente.

- Numériseur de temps (TDC-V4) capable de renvoyer le signal de temps à l'ordinateur à partir des MCP des deux détecteurs et de la ligne à retard du détecteur "DLD".

- Yan utilise un logiciel développé en C++ pour traiter les données des scanners et des caméras, qui peuvent extraire les positions bidimensionnelles des électrons et des ions Cs+ et leurs temps de vol relatifs.

## II.5 Simulation des trajectoires de particules avec Simion

Nous utilisons le logiciel simion pour simuler les champs électrostatiques et les trajectoires des électrons, ce qui peut nous fournir des simulations 2D et 3D. SIMION est un programme de simulation d'optique ionique qui calcule les champs électriques des électrodes définissant les tensions et les trajectoires des ions dans ces champs, y compris les radiofréquences facultatives (quasi-statiques), les champs magnétiques et les collisions, étant donné une configuration

d'électrodes avec effet de tension et de conditions initiales des particules . Il est largement utilisé pour simuler des lentilles, la spectrométrie de masse et d'autres types d'optique de particules.

Dans nos expériences, le logiciel simion a été utilisé pour trouver et créer automatiquement les structures des lentilles Einzel, des extracteurs et des spectromètres doubles, et pour simuler l'excitation de l'état de Rydberg des atomes de Cs, l'ionisation des atomes de Cs, et l'électron et les ions de Trajectoire de la zone d'ionisation au détecteur.

L'expérience nécessitait d'accélérer les électrons en les plaçant dans un champ électrique uniforme. Pour ce faire, la partie principale de l'extracteur doit être constituée de deux plaques parallèles d'une épaisseur de 2 mm, d'un espacement de 10 mm et d'un diamètre de trou de 4 mm. Il existe actuellement deux méthodes : l'une est l'extracteur de grille et l'autre est le trou d'extraction (la grille est retirée).

### III. Présentation des apports personnels du stage

#### III.1 Séquence 1

Je suis arrivé au laboratoire Aimé Cotton le 9 mai 2022, il vient de déménager dans le bâtiment 505, il y a donc beaucoup d'instruments expérimentaux qui n'ont pas été assemblés pour le moment. Lors de mon premier jour de travail, Yan m'a patiemment fait visiter le laboratoire et m'a aidé à obtenir une carte pour entrer et sortir du laboratoire et une carte pour manger.

Le laboratoire a des réunions régulières le vendredi à 11h00, généralement Daniel est le modérateur. Nous discutons du travail de cette semaine, du travail de la semaine prochaine, lisons ensemble de la littérature et discutons de certaines tâches de laboratoire .

Ensuite, afin de me donner une compréhension plus détaillée de l'ensemble du projet expérimental et du fonctionnement, Yan m'a donné une biblio à lire. Au cours de la semaine suivante, ma tâche principale consiste à aider Yan à transporter l'équipement expérimental et à organiser l'ensemble du laboratoire, ainsi qu'à remplacer certains équipements expérimentaux endommagés avec Sebastian, puis à lire la biblio.

Pendant tout le processus, j'ai eu une meilleure compréhension de l'agencement général du laboratoire et je connaissais la répartition des tâches et des lieux de travail pour chacun. Par exemple, je sais qui chercher lorsqu'il manque des pièces telles que des vis et comment trouver les instruments optiques et électriques nécessaires. Au cours de ce processus, j'ai vu des équipements expérimentaux que je n'avais jamais vus en classe, ce qui m'a ouvert les yeux.

En raison de mon manque de connaissances en mécanique quantique, j'ai également eu besoin de lire des livres et de la littérature pertinents tout au long du stage. Un merci spécial à Daniel, qui m'a donné une description rapide et détaillée des changements d'état excité et de niveau d'énergie des atomes que je ne comprenais pas. Cela m'a permis de mieux comprendre ce qu'il y a dans la section laser.

Puis j'ai travaillé avec un autre stagiaire de l'ENS, M. Sebastian LAVIELLE, pour régler les lasers 852nm et 1470nm. Il avait été stagiaire ici pendant trois mois avant que je vienne ici, c'était un collègue amical et gentil, et il était très intelligent. Il m'a beaucoup aidé tout au long du stage. Dans les semaines suivantes, j'ai travaillé avec lui pour ajuster le chemin optique (il a terminé la construction de l'ensemble du chemin optique dans les trois premiers mois de son stage), ce que nous devons faire est d'ajuster les équipements optiques tels que les miroirs, lentilles, etc., et trouvez des éléments tels que les rapports dont pics avait besoin, comme indiqué précédemment.

La figure 12 est un schéma d'agencement gloire des lasers 852 nm et 1470 nm.

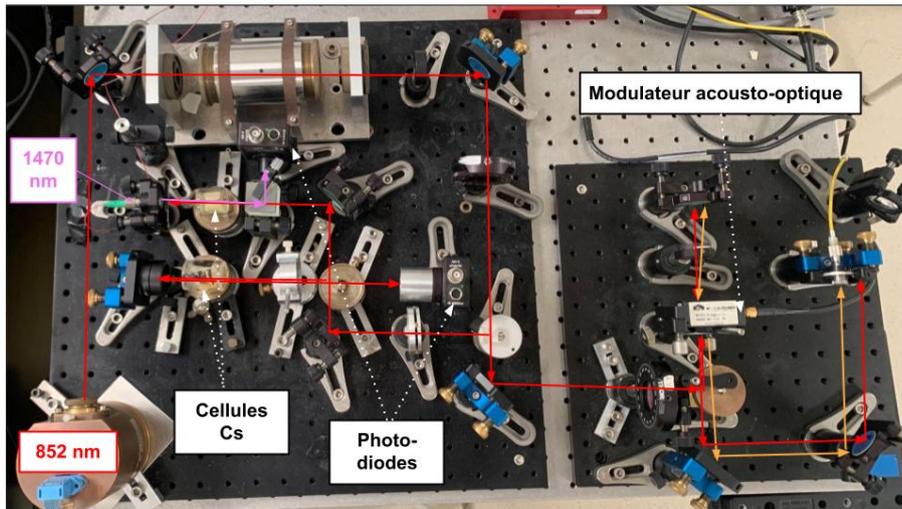


Figure 12: Chemin de lumière des lasers 852nm et 1470nm.

Nous avons trouvé les trois pics ( $F=3,4,5$ ) requis pour le laser 852nm au début de la troisième semaine (vers le 23 mai), comme le montre la figure 13. La difficulté de ce procédé est que le pic  $F=5$  est difficile à observer. Nous devons constamment ajuster l'optique, ce qui est un processus compliqué. Cela demande beaucoup de patience et de concentration. Parce qu'il est possible de manquer accidentellement trois pics.

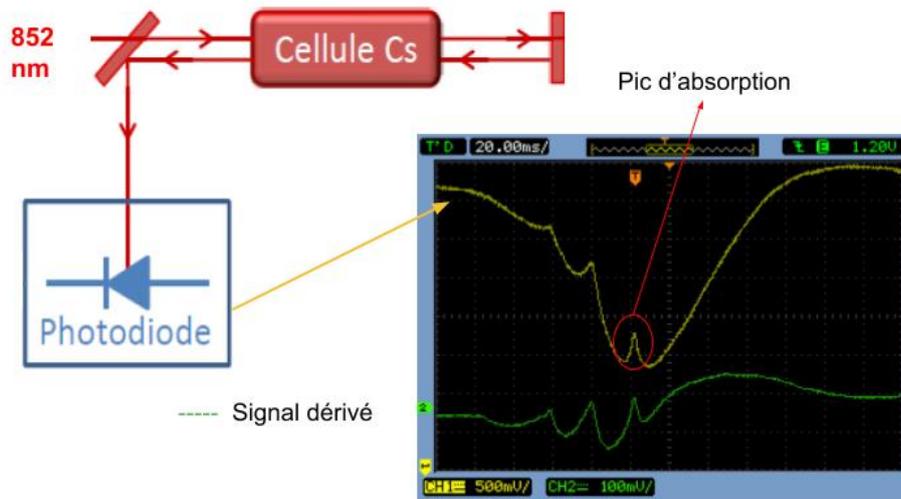


Figure 13: Pic d'absorption de laser 852nm.

Nous avons réussi à trouver le pic nécessaire pour le laser 1470nm au milieu de la quatrième semaine (vers le 31 mai). Dans ce processus, j'ajuste principalement le chemin optique sous la direction de Sebastien, afin que Sebastien puisse déboguer la partie électronique. La puissance du laser 1470nm est un peu faible, nous l'avons ajustée en tournant la vis avec un tournevis et avons obtenu le résultat souhaité.

Dans le processus, j'ai vu de nombreux instruments optiques que je n'avais jamais vus auparavant. Par exemple, un instrument comme une caméra qui peut observer des rayons lumineux infrarouges.

Au laboratoire, nous devons suivre strictement les règles expérimentales et chaque appareil doit

être fixé avec des vis.

### III.2 Séquence 2

Lorsque nous sommes prêts pour les lasers 852nm et 1470nm, nous devons les coupler à la section électronique avec des fibres optiques. J'ai donc sélectionné plusieurs fibres multimodes et les testé une par une, car certaines fibres étaient défectueuses. Après cela, j'ai réussi à trouver de la fibre pour 852nm et 1470nm.

C'est un processus amusant, c'est facile, mais je fais attention à prendre soin de la fibre et à empêcher le laser de pénétrer dans mes yeux (même si je porte des lunettes qui bloquent le laser).

Vient ensuite le dernier laser, nous avons choisi 794.606nm, son aspect est montré sur la figure 14 :



Figure 14: Le dernier laser.

Nous faisons tourner la sonde sur le laser et modifions la longueur d'onde du laser pour trouver la longueur d'onde souhaitée. Nous pouvons voir la longueur d'onde en temps réel directement depuis l'ordinateur, comme le montre la figure 15 :



Figure 15: Le longueur d'onde de le dernier laser .

Après avoir réglé les trois lasers, il faut les coupler à la partie électronique. Le laser 794.606nm est injecté à l'intérieur de l'instrument de partie électronique à travers des miroirs et des lentilles. Le schéma du chemin optique est illustré à la figure 16.

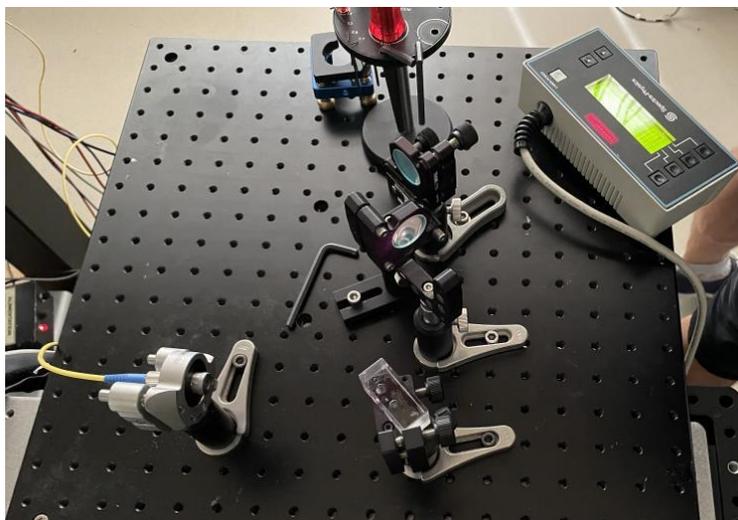


Figure 16: Chemin de lumière de laser 794.606nm.

Après sa transmission, il passe à travers un miroir, il va à la verticale de la partie électronique, puis il passe à travers un autre miroir, (et plus tard on rajoute une lentille), puis il est injecté à l'intérieur de l'appareil électronique par le dernier miroir, et il peut être le voir à l'autre bout (ce qui montre qu'il a réussi à pénétrer l'électronique).

Les lasers 852nm et 1470nm sont connectés directement à la partie électronique via une fibre optique et polarisés à travers le cristal, comme le montre la figure 17.

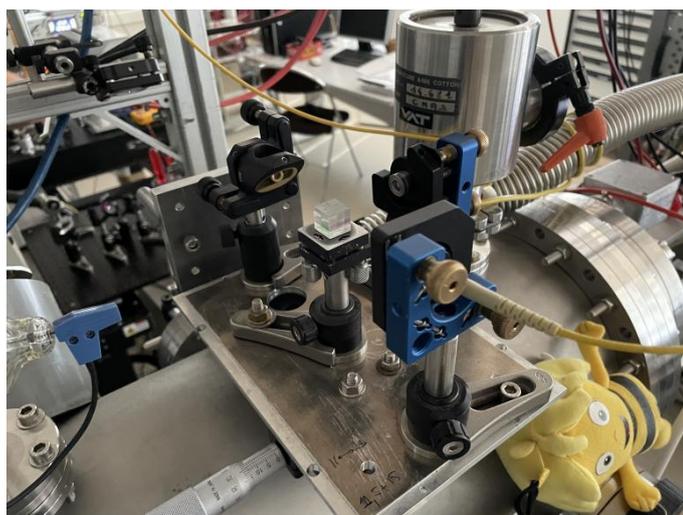


Figure 17: Chemin de lumière des lasers 852nm et 1470nm.

Ensuite, nous assemblons le four à césium. Cette étape est effectuée dans le laboratoire de chimie, car nous devons nettoyer tous les appareils assemblés et utiliser des gants en caoutchouc pour effectuer toutes les opérations, ce qui consiste à réduire les dommages et l'impact de la

peau humaine sur l'appareil pour ne pas polluer le vide dans l'enceinte.

Dans le processus, Yan m'a appris à identifier et à utiliser la terme de KF, la terme de CF et la terme de ISO-F.

La terme de KF est illustrée à la figure 18, le principe de fonctionnement est le suivant : une bague de centrage portant un joint torique est placée entre les deux flasques puis les flasques sont alignés et rapprochés. La pince à écrou papillon (des pinces à chaîne sont également disponibles) est placée autour des deux faces de la bride et l'écrou papillon est serré. Les deux faces de bride sont pressées l'une vers l'autre, comprimant ainsi le joint torique.

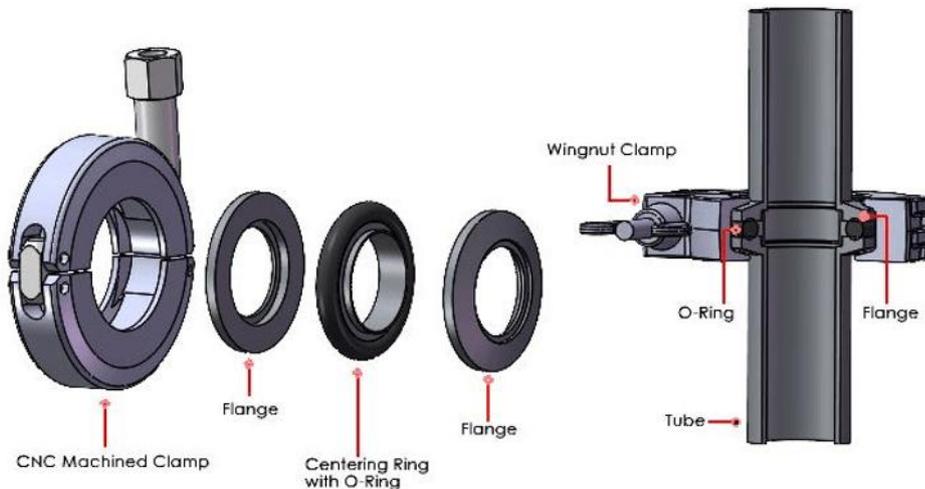


Figure 18: Terme de KF.

La terme de CF est illustrée à la figure 19, le principe de fonctionnement est le suivant : un couteau est usiné dans les deux brides d'accouplement. Ensuite, un joint métallique fabriqué à partir d'un matériau plus doux (généralement du cuivre) est placé entre les deux brides. Au fur et à mesure que les boulons sont serrés, les bords du couteau coupent le cuivre des deux côtés, créant un joint étanche.

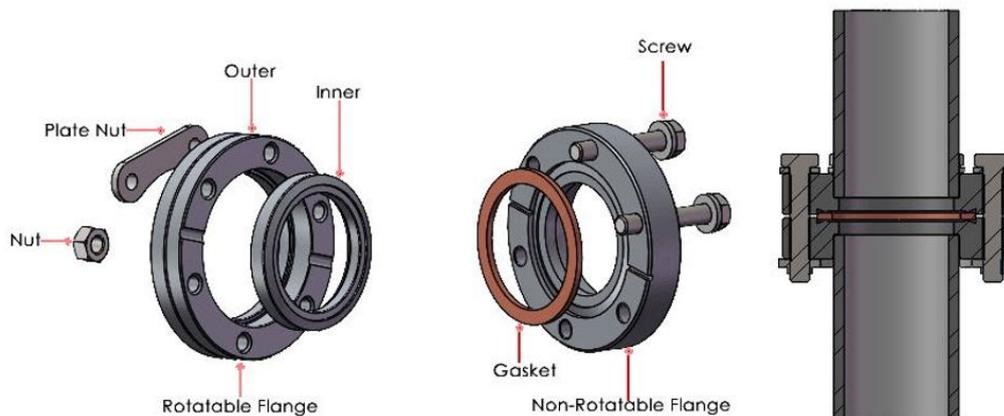


Figure 19: Terme de CF.

La norme ISO-F est illustrée à la figure 20, le principe de fonctionnement est le suivant : Une bague de centrage qui maintient un joint torique est placée entre les deux brides puis les brides sont alignées et rapprochées. Les brides sont ensuite assemblées par des colliers à griffes (pour et ISO-K), des boulons (pour et ISO-F) ou avec un demi-collier à griffes (lors de l'assemblage d'un ISO-K à un ISO-F). Dans chaque cas, au fur et à mesure que les boulons sont serrés, la bague de centrage est comprimée pour former un joint étanche. (Yan m'a dit que le labo possède principalement KF et CF).

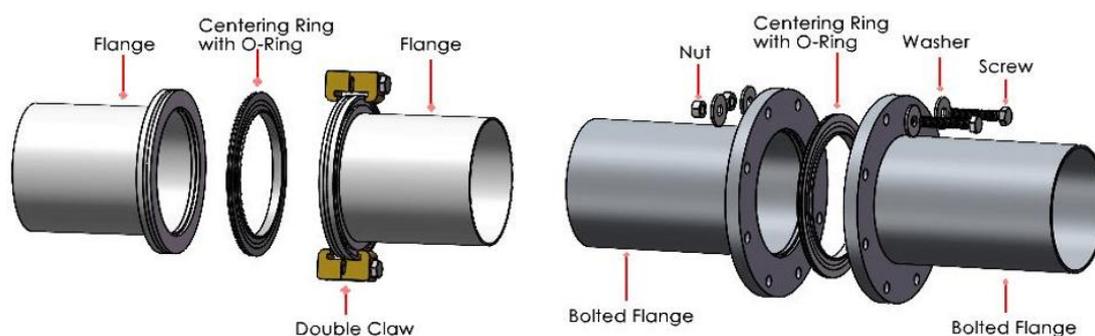


Figure 20: Terme de ISO-F.

Notre four à césium utilise principalement du KF. Mais comme il nous est difficile d'obtenir que toutes les pièces s'adaptent parfaitement à 100%, nous l'avons testé avec du gaz de pompe pendant une longue période (lorsqu'il y a une fuite de gaz, la pression d'air change, ce qui signifie que les pièces ne sont pas entièrement installées, il y avait une fuite), et finalement l'utilisation de méthanol et de divers outils a réduit la fuite aussi bas que possible (bien qu'encore un peu).

Après avoir assemblé le four à césium, Sébastien et moi avons trouvé l'appareil de chauffage, qui chauffe notre fil de nylon. Nous avons enroulé des cordes de nylon autour du poêle au césium et les avons fixées avec des couches de papier d'aluminium. Le four à césium que nous avons assemblé est illustré à la figure 21.

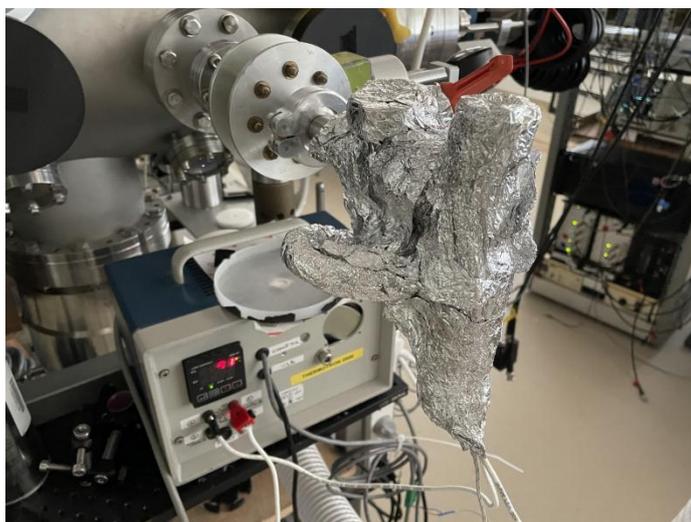


Figure 21: Réchaud au césium enveloppé dans du papier d'aluminium.

### III.3 Séquence 3

Comme Daniel et Yan étaient en vacances du 14 au 25 juillet, ils ont donné aux stagiaires différentes tâches qui pouvaient être simulées par le logiciel simion sur l'ordinateur. Ce que j'essaie de faire, c'est de créer une grille et une structure MCP souhaitées en écrivant le code. Le but est de reconstruire un objet sur le parcours des électrons à partir de leur déviation par rapport à la position initiale. C'est ce que Yan a fait auparavant et je dois reconstruire la structure moi-même.

Daniel et moi avons conçu un prototype approximatif de la structure sur le tableau blanc avant le départ, puis j'ai commencé à lire le manuel de Simion et je l'ai téléchargé. J'ai réussi à construire la structure en écrivant du code et en mettant le test selon les exigences de Yan. Le résultat a été envoyé à lui.

Ensuite, nous devons simuler encore et encore et changer la structure des grilles, donc notre division du travail est : je modifie le code pour changer la structure des grilles, puis change la tension des grilles, et envoie le code et les résultats des données à Yan, Yan est sur son ordinateur Utilisez python pour restaurer la structure des grilles, puis indiquez-moi les suggestions de modification.

Nous avons subi de nombreuses modifications, telles que la distance des grilles était trop grande pour bien focaliser le faisceau, ce qui m'a obligé à modifier la distance entre chaque grille; la distance entre les grilles et le MCP a également affecté l'imagerie, ce qui nous a également obligés pour changer la distance encore et encore, réglez et trouvez la meilleure distance.

Nous avons finalement réussi à trouver la meilleure distance pour l'imagerie, et la structure finale est illustrée à la figure 22 ci-dessous :

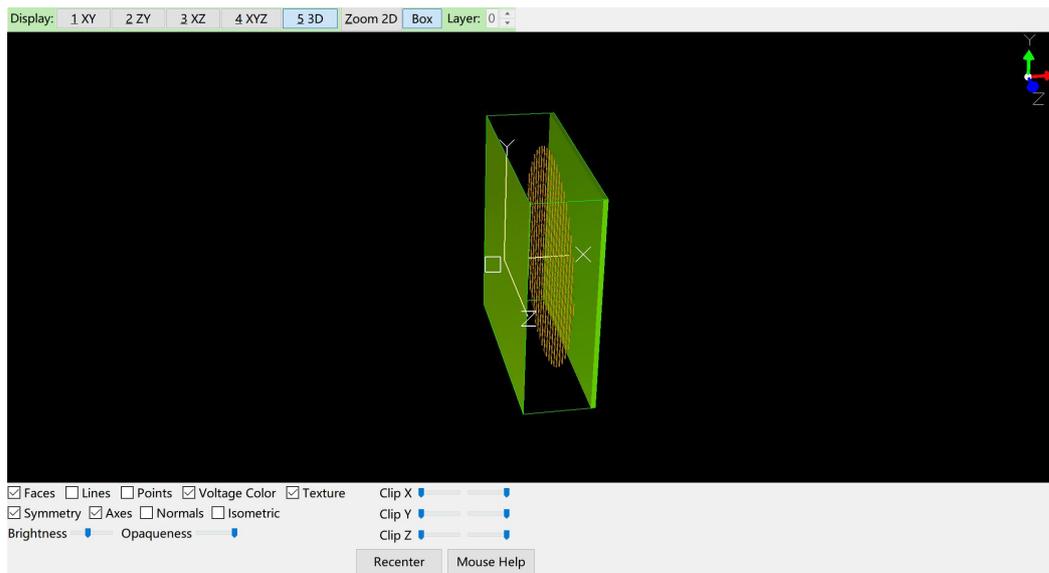


Figure 22: La structure finale.

La distance entre grille et MCP est 4cm, et la distance entre chaque grille est le 1cm, la diamètre de grille est le 1mm.

Quand il y a pas de champ ( $V_{\text{grille}} = 0V$ ), on peut obtenir :

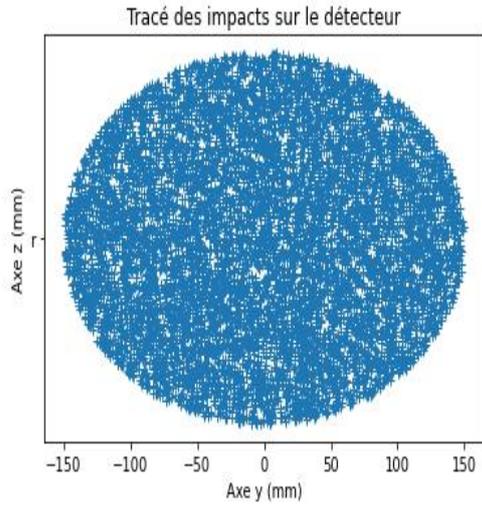


Figure 23: Détecteur des ions.

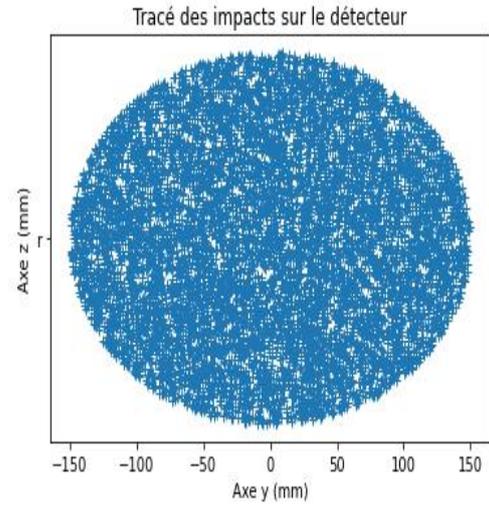


Figure 24: Détecteur des électrons.

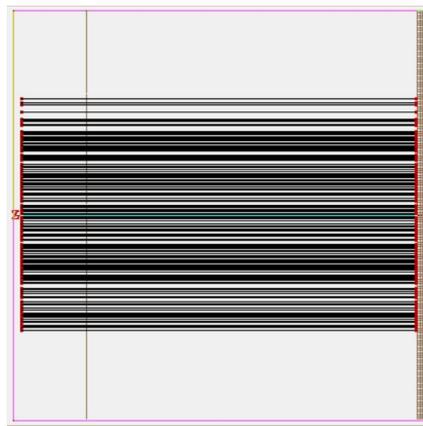


Figure 25: Trajet des électrons.

Après on ajoute des champs et dans le condition de focalisé ( $V_{\text{grille}} = -550V$ ), on peut obtenir :

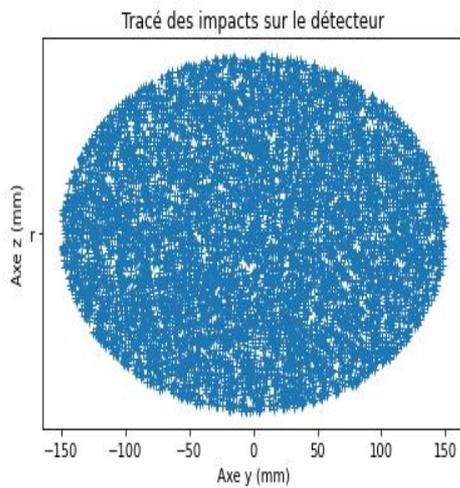


Figure 26: Détecteur des ions.

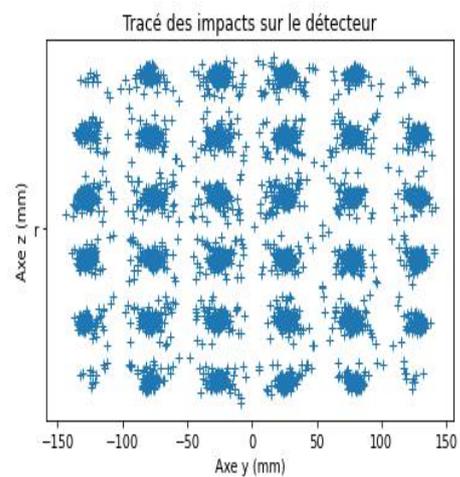


Figure 27: Détecteur des électrons.

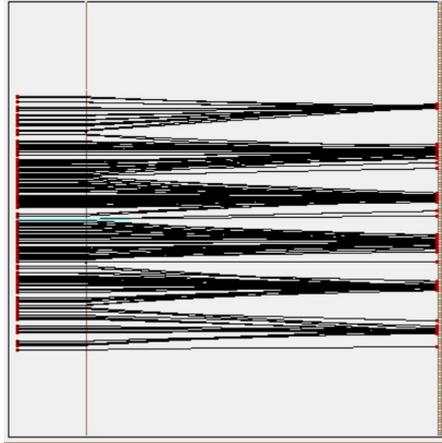


Figure 28: Trajet des électrons.

Dans la condition de défocalisé( $V_{\text{grille}} = -550\text{V}$ ), on peut obtenir :

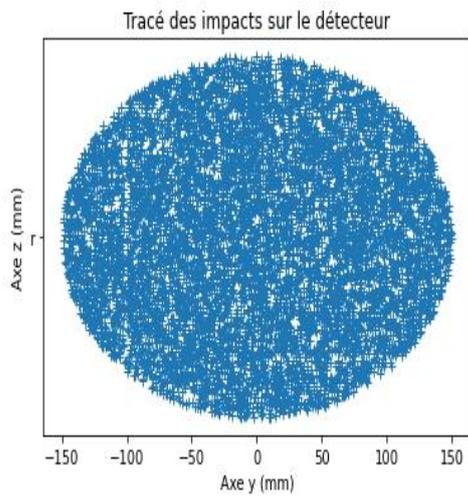


Figure 29: Détecteur des ions.

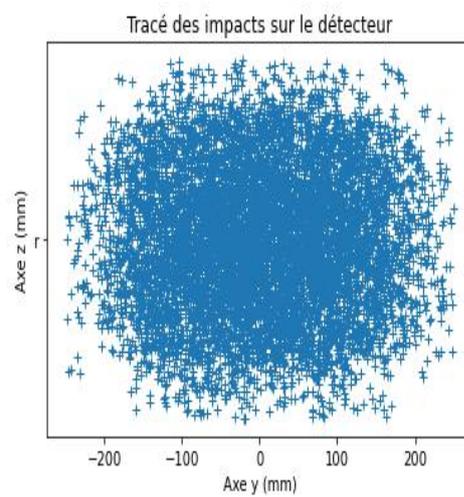


Figure 30: Détecteur des électrons.

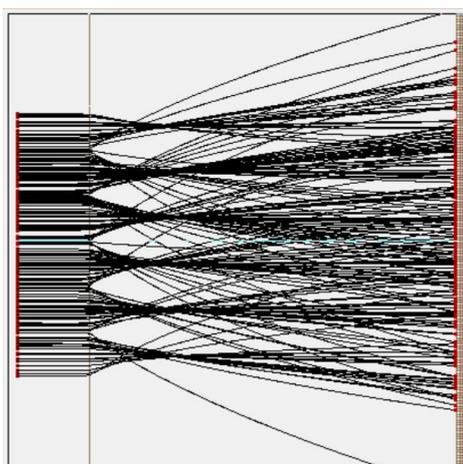


Figure 31: Trajet des électrons.

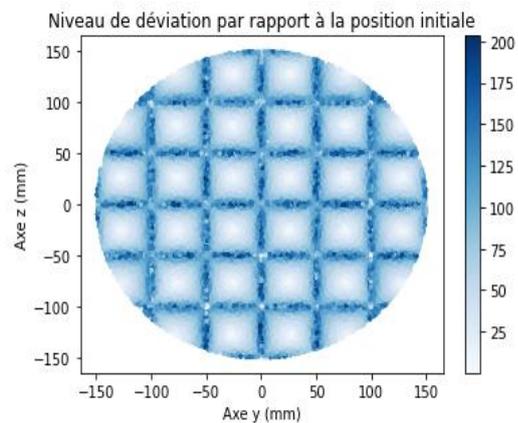


Figure 32: Niveau de déviation .

A partir des résultats, nous pouvons tirer les conclusions suivantes : la mesure de la déviation par rapport à la position attendue permet de “mesurer” la perturbation subit et de voir ainsi

apparaître la grille alors que la position d'impact des électrons déviés ne la mettait pas seuls en évidence.

La semaine dernière, Yan et moi avons terminé l'assemblage des composants électroniques (c'est ce que nous avons fait pendant les trois mois, principalement Yan m'a appris étape par étape à identifier les différents composants, nous avons assemblé les composants en désordre en raison de la déplacement du laboratoire vers le haut pour que Yan puisse les déboguer). La figure 33 est notre instrument expérimental connecté:

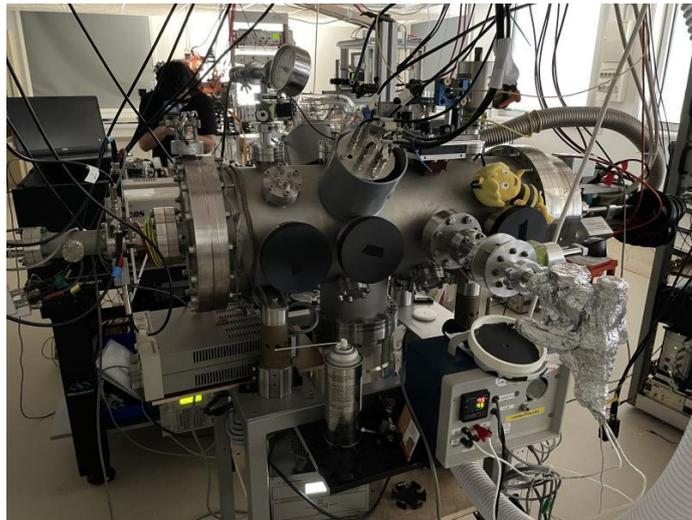


Figure 33: Notre instrument expérimental.

Après avoir réglé la tension comme décrit ci-dessus, nous pouvons observer avec succès la trajectoire des électrons et des ions sur l'ordinateur, mais en raison de certains problèmes avec le four à césium (peut-être que le réglage de la température est erroné), nous ne pouvons pas aller plus loin. Yan continuera le travail en septembre.

## IV. Apports personnel

Ce programme de stage m'a donné une nouvelle compréhension du monde quantique. C'est un monde avec lequel je ne suis pas étranger, mais pas trop, et j'ai toujours été curieux à ce sujet. Ce programme de stage a réussi à me donner une meilleure compréhension de cela. En raison de la variété des tâches et des concepts impliqués dans ce stage, il m'a permis de mettre en pratique plusieurs des concepts que j'ai appris à l'école, mais m'a aussi permis de découvrir de nouveaux concepts. J'ai appris beaucoup de choses que les livres ne peuvent pas me donner, ils doivent être faits par la pratique :

- Ce stage m'a permis de bien appréhender le travail des chercheurs scientifiques. Le laboratoire organise des réunions hebdomadaires pour répertorier les tâches en cours et l'avancement de nos travaux en cours. Cela m'a appris à planifier mon travail.
- Ce stage me donne l'occasion de communiquer avec mon superviseur pour soulever des questions et des conclusions. J'interagis également avec d'autres stagiaires qui sont toujours prêts à m'aider.
- Ce stage a été pour moi l'occasion d'effectuer des recherches bibliographiques afin de documenter les techniques et méthodes qui ont été utiles à nos recherches. J'étais capable de gérer de nouveaux logiciels dont je n'avais absolument aucune idée. Traiter et faire face à des problèmes logiciels a augmenté mon autonomie et ma capacité à trouver des solutions par moi-même.
- Ce stage m'a également fait prendre conscience de plusieurs de mes lacunes. Mes capacités d'apprentissage ne sont pas assez fortes, mon français est médiocre (merci aux autres d'avoir été accommodants), et mon manque de connaissances dans le domaine quantique sont autant de domaines que j'ai encore besoin d'améliorer.

En raison du temps de formation court et des nombreuses difficultés que nous avons rencontrées, il n'a pas été possible de réaliser toutes les tâches. Mais j'espère et je pense que ce travail jette les bases du résultat final.

---

## Bibliographie

- [1] Colin Lopez. Développement de sources haute-résolution de particules chargées grâce au contrôle de leur trajectoire par corrélation temps-position. Physique [physics]. Université Paris-Saclay, 2021. Français. ffNNT : 2021UPASP013ff. fftel-03184808f
- [2] M. Viteau, M. Reveillard, L. Kime, B. Rasser, P. Sudraud, Y. Bruneau, G. Khalili, P. Pillet, D. Comparat, I. Guerri, A. Fioretti, D. Ciampini, M. Allegrini et F. Fuso, «Ion microscopy based on laser-cooled cesium atoms,» chez Ultramicroscopy, Elsevier, 2016. DOI: 10.1016/j.ultramic.2015.12.007 , pp. 70-77.
- [3] A. V. Steele, A. Schwarzkopf, J. J. McClelland et B. Knuffman, «High-brightness Cs focused ion beam from a cold-atomic-beam ion source,» Nano Futures, vol. 1, 2017. DOI: 10.1088/2399-1984/aa6a48.
- [4] J. J. McClelland, A. V. Steele, B. Knuffman, K. A. Twedt, A. Schwarzkopf et T. M. Wilson, «Bright focused ion beam sources based on laser-cooled atoms,» Applied Physics Reviews, vol. 3, 2016. DOI: 10.1063/1.4944491.
- [5] C. Sahin, P. Geppert, A. Müllers et H. Ott, «A high repetition deterministic single ion source,» New Journal of Physics, vol. 19, 2017. DOI: 10.1088/1367-2630/aa9461.
- [6] A. J. McCulloch, R. W. Speirs, S. H. Wissenberg, R. P. M. Tielen, B. M. Sparkes et R. E. Scholten, «Heralded ions via ionization coincidence,» Physical Review A, vol. 97, 2018. DOI: 10.1103/PhysRevA.97.043423 .
- [7] Comparing KF, ISO, CF and ASA flanges by GNB Corporation, may 11, 2020, Blog
- [8] The Industry Standard in 3D Ion and Electron Optics Simulations, Scientific Instrument Services, Inc. 1027 Old York Rd, Ringoes, NJ 08551
- [9] G. Toh, A. Damitz, N. Glotzbach, J. Quirk, I. C. Stevenson, J. Choi, M. S. Safronova et D. S. Elliott, «Electric dipole matrix elements for the  $6P\ 2P_{1/2} \rightarrow 7S\ 2S_{1/2}$  transition in atomic cesium,» Phys. Rev. A, vol. 99, 2019. DOI: 10.1103/PhysRevA.99.032504.
- [10] L. Landau et E. Lifchitz., «Mécanique quantique,» MIR (réédité par Ellipses), vol. Tome 3, 1988. ISBN-13: 978-5030001999.

## ANNEXES

### A.1 Spectroscopie Laser

La spectroscopie laser est une méthode de mesure du débit à la sortie d'un four dans une chambre à vide. En bref, cela implique de faire passer un laser à travers un jet de césium, de balayer le laser autour de la fréquence d'excitation du césium et de mesurer la quantité de photons absorbés avec une photodiode. Les éléments clés de la spectroscopie laser dans le cas particulier du césium sont ensuite présentés.

Mesurer le flux avec la spectroscopie laser nécessite de connaître les différentes transitions atomiques du césium et leurs longueurs d'onde. Le césium est une base qui convertit dans le visible et l'infrarouge. Le césium a un niveau d'énergie de base de  $6S_{1/2}$  et a trois niveaux d'excitation principaux,  $6P_{1/2}$ ,  $6P_{3/2}$  et  $7P_{1/2}$ . Chacun de ces niveaux d'énergie a 2 à 4 niveaux d'énergie hyperfins (marqués F). La figure 34 montre ses différents niveaux d'énergie, ainsi que les détails de leurs niveaux hyperfins et les probabilités de transition entre les niveaux de base hyperfin et d'excitation.

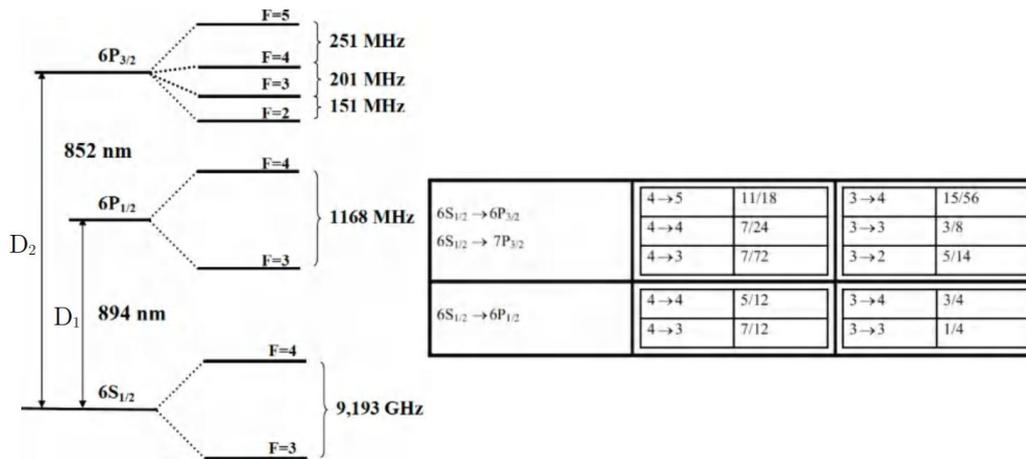


Figure 34: A gauche est représenté le niveau fondamental et 3 niveaux excités du césium avec le détail de leurs niveaux hyperfins. A droite on retrouve les probabilités de transitions entre les niveaux hyperfins du fondamental et ceux des niveaux excités.

La transition  $6S_{1/2}$  vers  $6P_{1/2}$  est appelée raie D1 du césium, et la transition  $6S_{1/2}$  vers  $6P_{3/2}$  est appelée raie D2 du césium. Ils se produisent si et seulement si les transitions hyperfines entre les niveaux de base et d'excitation satisfont  $\Delta F=0, \pm 1$  (règle de sélection). Nous allons travailler sur un four à césium sur la raie D2, qui nécessite un laser 852.347nm.

Concernant l'effet Doppler, La relation entre la pulsation  $\omega$  d'un laser dans le référentiel du laboratoire et sa pulsation  $\omega'$  dans un référentiel en mouvement à la vitesse  $\vec{v}$  est :

$$\omega' = \omega - \vec{k} \cdot \vec{v}$$

$\vec{k}$  est le vecteur d'onde du laser de module  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$ .

Supposons maintenant que les atomes fassent partie d'un gaz homogène pouvant être excité par un laser à l'une de leurs fréquences de transition  $\omega_0$ . Par conséquent, lorsque  $\omega' = \omega_0 = \omega \pm$

$k \cdot v$ , les atomes se déplaçant à vitesse  $v$  peuvent absorber le rayonnement. En première approximation, on peut considérer le module du vecteur d'onde  $\vec{k}$  proche de  $k_0 = \frac{\omega_0}{c}$ , soit :

$$\Delta = \omega - \omega_0 = \pm k_0 \cdot v = \pm \frac{\omega_0}{c} \cdot v$$

$$v = \pm c \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)$$

L'absorption sera maximale en  $\omega_0$  et sera réduite de moitié pour :

$$\Delta_{1/2} = \omega - \omega_0 = \sqrt{\ln 2} \frac{v_p \cdot \omega_0}{c}$$

Avec  $v_p = \sqrt{\frac{2K_b T}{m}}$ , la vitesse la plus probable dans les trois dimensions.

Dans le cas du césium la largeur de la transition  $6S_{1/2}$  vers  $6P_{3/2}$  ( $\omega_0 \approx 2\pi 351.725$  THZ) à  $25^\circ\text{C}$  la largeur à mi-hauteur (FWHM) de l'absorption est donc :

$$\text{FWHM} = 2 \cdot \Delta_{1/2} \approx 2\pi 380 \text{ MHz}$$

Nous devons utiliser une technique expérimentale appelée absorption saturable (assemblage optique), qui permet de déterminer précisément les fréquences de transition des atomes de l'état fondamental à l'état excité. Cette méthode est utile pour verrouiller la fréquence du laser sur l'une des fréquences de transition ultrafines des atomes. Dans notre cas, en balayant le laser autour de la raie D2 du césium (852.347nm), ce type d'optique permet des observations nettes depuis le niveau hyperfin  $F=4$  à l'état fondamental  $6S_{1/2}$  jusqu'à des niveaux hyperfins  $F'=3, 4$  et à l'état  $6P_{3/2}$ .

La précision idéale est la limite quantique déterminée par la largeur naturelle de la transition, qui dépend de l'inverse de la durée de vie de l'état excité. Cependant, les expériences sont généralement effectuées sur des vapeurs atomiques à température ambiante, de sorte que l'absorption de fréquence est fortement amplifiée en raison de l'effet Doppler. Dans le cas du césium, la durée de vie de la transition  $6S_{1/2}$  vers  $6P_{3/2}$  entre les niveaux hyperfins est d'environ 30ns ou  $\Gamma \approx 2\pi \cdot 5.23 \mu\text{s}^{-1}$ , c'est-à-dire que la largeur à mi-hauteur est d'environ 5MHz. Les niveaux de césium ultrafins complètement immergés dans l'absorption moyenne due à l'effet Doppler (FWHM  $\approx 2\pi 380$  MHz) ne peuvent être distingués sans manipulation particulière.

L'absorption saturable permettrait de connaître précisément les fréquences des atomes sans qu'il soit nécessaire de refroidir l'échantillon à une température où l'effet Doppler est négligeable. Pour ce faire, on envoie un premier faisceau laser "pompe" intense à travers le nuage atomique, qui se propage dans le sens +, saturant toutes les transitions. Un autre faisceau "sonde" à contre-propagation de la même fréquence (-direction) est envoyé, où la classe atomique à vitesse nulle ne pourra pas être ré-excité et un "trou" de la largeur naturelle de la transition apparaîtra. Pour le césium, la puissance du faisceau "sonde" doit être maintenue faible et la largeur naturelle de la transition doit être agrandie.

## A.2 Caractérisation du four de césium

Les fours à césium sont conçus à partir d'un ensemble d'éléments standards équipés de brides de joint en cuivre (croix, hublots et tuyauteries "CF16"). Le césium se dépose initialement sur la partie inférieure de la croix sous atmosphère sèche (Ar ou N<sub>2</sub>). L'ensemble du four est alors placé sous vide et entouré de ruban chauffant pour faire varier et réguler sa température. L'augmentation de la température provoque une différence de pression avec l'enveloppe extérieure, forçant le césium à traverser pour créer un jet. Le four comporte un dispositif de recirculation pour récupérer le césium capté par condensation dans le tube entre les deux trous de sortie. Le four dispose d'une entrée supplémentaire dans la partie supérieure du dernier tube pour améliorer le pompage si nécessaire.

Une vue en coupe du four est illustrée à la figure 35. La partie supérieure du four comporte deux diaphragmes dont la longueur est de 2 mm et la longueur du diaphragme est de 82 mm, et le laser sonde est placé à une distance  $Z$  du premier trou afin de déterminer les caractéristiques du jet par spectroscopie laser.

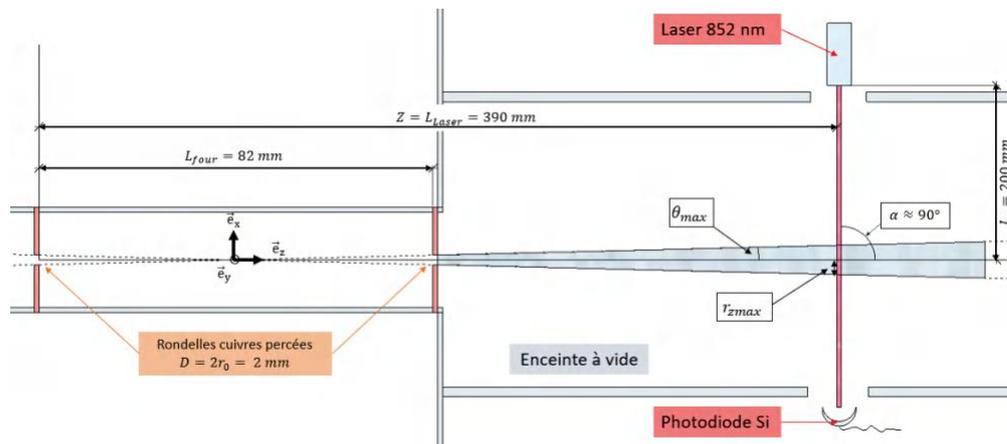


Figure 35: Plan de coupe de la sortie du four.

## Chang ZHOU

Université Paris-Saclay



-  **Adresse :** 5033 ECLA campus, 16 avenue Emile Baudot, 91120 Palaiseau
-  **Tél:** (+33) 0764010591
-  **E-mail:** chang.zhou@u-psud.fr

### Formation

- Sept. 2020 - Aujourd' hui** Polytech Spécialité : Photonique et Système Optroniques
- Sept. 2021 - Sept. 2017** HUST, Chine Spécialité : Sciences et Ingénierie de l'information photoélectrique

### Expériences

#### 24 mois

- **Membre dans le département des médias du syndicat étudiant HUST**

Gérer l' exploitation du compte officiel qui est l' un des dix meilleurs médias des campus du pays.

#### 4 mois

- **Recherches sous la direction du prof.Wang**

Etudier l' algorithme intégral de diffraction de Fresnel, en utilisant la transformée de Fourier discrète bidimensionnelle, le théorème d' échantillonnage et le codage de Boch. Concevoir et produire l' hologramme informatique de diffraction de Fresnel et publier une article.

- **Projet spécialité**

Fabriquer un télémètre de télédétection laser.

#### 3 mois

- **Stage chez un photographe**

Prendre des photos d' identité pour les citoyens.

#### 2 mois

- **Recherche dans group de prof.Wang**

Travailler sur l' optique physique afin d' explorer la diffraction de Fresnel et ses champs lumineux à proximité.

- **Stage dans un laboratoire HUST**

Recherche des technologies liées au laser dans le laboratoire de M.Tang, principalement des instrument laser et la gravure par laser.

#### 1 mois

- **Projet électronique**

Fabriquer un produit qui mesure fréquence cardiaque.

- **Volontaire des Jeux Mondiaux Militaires**

Guide de l' équipe de HUST lors du test-match des jeux mondiaux militaires.

### Compétences

- **Langues**

**Chinois:** Langue maternelle

**Anglais:** Lu, parlé, écrit B2

**Français:** Lu, parlé, écrit B1

- **Informatique**

**Langages:** C, C + + , C#, l' Assemblage, Verilog HDL

**Logiciels:** MATLAB, Zemax, Lumerical FDTD Solutions, Quartus II et Xilinx (FPGA design), Visual C++ , code V

### Centres d' intérêt

-  **Arts :** guzheng (instrument de musique Chinoise traditionnelle ) ,lavis, dessin, photographie
-  **Sports:** natation, ski , voilier (obtenir la deuxième place )
-  **Loisirs :** voyage (visiter plus d' une douzaine de pays et échange étudiante à Edimbourg)

Chang ZHOU

16 Avenue Emile Baudot

91120 PALAISEAU

Email :chang.zhou@universite-paris-saclay.fr

Téléphone : +33 07 64 01 05 91

## **OBJET: Candidature à un stage en laboratoire**

Madame, Monsieur,

Je m'appelle Chang ZHOU. J'apprécie que vous puissiez prendre le temps de lire ma lettre de motivation.

Tout d'abord, permettez-moi de me présenter. Actuellement je suis élève d'ingénieur en 4ème année dans la spécialité Photonique et Système Optroniques(PSO) à Polytech Paris-Saclay. Je viens de Chine où je me suis spécialisé en sciences et ingénierie de l'information photoélectrique à l'Université des sciences et technologies de Huazhong (HUST). Je suis à la recherche d'un stage de 3 mois dans le cadre de mon formation d'ingénieur qui peut débuter en mai 2022. Votre laboratoire m'intéresse particulièrement et je pense je pourrai bien m'adapter aux mission de stage.

Lors de ma formation en licence d'ingénieur en photonique et système optronique et licence de sciences et ingénierie de l'information photoélectrique, les cours de langage C、C++ et VHDL, matlab, code V, optique géométrique, optique ondulatoire, laser et système laser, fibres optiques, calcul optique, semi-conducteur, physique des solides, électrique analogique et numérique, informatique et algorithmes, automatique, asservissement électrique m'ont permis d'acquérir de solides connaissances en optique, optronique et électronique. J'ai rejoint l'équipe de prof.Wang en HUST en Chine et travaillé avec elle sur l'optique physique afin d'explorer la diffraction de Fresnel et ses champs lumineux à proximité. Et j'ai fait un stage en HUST pour rechercher des technologies liées au laser dans le laboratoire de M.Tang, principalement des instrument laser et la gravure par laser. En juin de cette année, J'ai fait des recherches sur l'algorithme intégral de diffraction de Fresnel sous la direction du prof.Wang, en utilisant la transformée de Fourier discrète bidimensionnelle, le théorème d'échantillonnage et le codage de Boch. J'ai conçu et produit l'hologramme informatique de diffraction de Fresnel et publié une article à la fin.

Je souhaite m'orienter dans la recherche en laser ou optronique parce que ils m'intéressent particulièrement. Que ce soit en Chine ou en France, le laser est le cours qui me plaît le plus et le meilleur que j'ai jamais étudié. Je suis curieuse de connaître le monde des lasers donc j'ai une grande motivation pour l'étudier et travailler avec vous. Effectuer un stage dans votre laboratoire serait une véritable opportunité pour moi et représentera un excellent départ pour mener mon projet à bien. J'ai un grand désir d'apprendre des nouvelles connaissances. Je suis prête à m'investir entièrement dans les missions qui me seront confiées.

En restant à votre disposition pour tout entretien que vous jugerez nécessaire, veuillez agréer, Madame, Monsieur, mes salutations respectueuses.

**Chang ZHOU**

---