

#### **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Pour l'obtention de diplôme d'un Master Physique et ingénierie physique

Parcours Nano physique et optique avancée

# **ETUDE D'UNE DETECTION EN COÏNCIDENCE ION ELECTRON POUR UN MICROSCOPE DE SURFACE**

#### Période : de 03 mars à la fin d'août

Présenté et soutenu par EL BOURAKADI Mourad Le 7 septembre à l'université de Mans

Encadrant de stage : Daniel COMPARAT Directeur de recherche, CNRS, Laboratoire Aimé Cotton (LAC)

Composition du Jury : Brice Arnaud Professeur, Université du Mans Nirina Randiantoando

Directeur académique chez Le Mans Université

Rapporteur

Examinateur

Promotion 2022

## Table des matières

1	Pro	Projet HREELM :					
	1.1	Sources des électrons dans HREELM :	.4				
	1.2	Analyse énergétique dans HREELM :	.4				
	1.3	L'analyse de l'energie Tof :	.5				
1.3.1 L'analyse d		1 L'analyse de l'energie Tof en mode pulsé :	.5				
	1.3.	2 La mesure de l'énergie (Tof) en mode continu :	.6				
2	HREELM 0 :						
	2.1 Chambre mu métal :		.8				
	2.2 Les électrodes d'ionisation :						
3	3 Excitation du césium vers des états de Rydberg :1						
	3.1	L'état de Rydberg (atome alcalin) :	10				
	3.2	Les atomes Rydberg en champ électrique (Effet Stark) :	11				
	3.3	Les niveaux hyperfins du césium :	11				
	3.4	L'ionisation :	12				
	3.5	Montage de la source laser :	13				
	3.5.	1 Tapered Amplifier :	14				
4	L'é	tude d'une détection électron-ion avec simulation :	15				
	4.1	Présentation de la simulation avec le logiciel Simion 8.1 :	15				
	4.1.	1 Les électrodes :	16				
	4.1.	2 L'ionisation en Simion :	16				
	4.2	L'influence des électrodes V7 et V9 :	17				
	4.2.	1 L'influence des électrodes V7 et V9 sur Tof d'un ion :	17				
	4.2.	2 L'optimisation du Tof des ions par les électrodes V7 et V9 :	18				
	4.3	L'influence de la vitesse des atomes de césium :	18				
	4.3.	1 L'addition d'une vitesse de faisceau de Cs neutre parallèlement avec le faisceau de Cs+ :	18				
	4.3.	2 L'addition verticalement d'une vitesse d'un faisceau de Cs neutre :	19				
С	onclusi	on :	21				
Annexe/2							
R	Remerciement :						
B	ibliogra	aphie :	25				

# **ETUDE D'UNE DETECTION EN COÏNCIDENCE ION ELECTRON POUR UN MICROSCOPE DE SURFACE**

Avant de mettre en lumière les points importants de nos études, je vais directement de présenter brièvement le projet HREELM (High Resolution Electrons Energy Microsocopy) développé au laboratoire Aimé Cotton par l'équipe MFC (Matière Froide Corrélée) en collaboration l'institut des sciences molécules d'Orsay (ISMO) et le commissariat à l'énergie atomique (CEA), dans le but de l'amélioration et de la réalisation d'une nouvelle source d'électrons et d'ions de césium.

C'est un nouvel instrument dans le monde de l'analyse de surface. Il sera capable de coupler à la fois des informations en imagerie et des informations spectrales. Il pourrait permettre de réaliser une imagerie électronique plein de champ à basse énergie de surface avec une résolution énergétique de l'ordre 10 meV ce qui permettre de résoudre les vibrations des constituants de la surface. La source d'électrons jeu un rôle important dans cet instrument au niveau de la résolution énergétique et au niveau de la résolution spatiale. En conséquence l'utilisation des atomes Rydberg de césium n'est pas fortuite, C'est grâce à eux que nous aurons une source d'électrons avec un courant de nA et une faible énergie de dispersion. (Hahn, 2022)<sup>[1]</sup>

Au cours de ce stage, nous mettons en œuvre l'excitation des atomes de césium vers les états de Rydberg à l'aide trois lasers différents, en particulier la troisième transition (du niveau  $7S_{1/2}$  vers les états de Rydberg) que se réalise par un nouveau montage de laser.

Ainsi que l'étude d'une détection électron-ion en coïncidence sera effectuée dans ce travail par des simulations. L'un de nos buts est de connaître principalement la corrélation entre les électrons et les ions de césium et notamment d'extraire des informations sur les électrons (la position initiale et le temps initial) à partir des informations fournies par les ions. L'impact des électrodes sur le faisceau d'ions sera présenté en termes de vitesse d'ions et de temps de vol d'ions avec l'ajustement de la tension de chaque électrode. L'amélioration de l'optimisation du temps d'arriver d'ions en même moment sur le détecteur sensible au temps jusqu' à quelques ns pour le but d'avoir une meilleure corrélation entre les électrons et les ions. La mesure la dispersion de l'énergie d'électrons se réalisera grâce à la méthode du temps du vol dans le projet HREELM.

# 1 Projet HREELM :

Le projet HREELM (High Resolution Electron Energy Loss Microscope) est un nouvel instrument innovant pour le monde des sciences des surfaces qui permet de réaliser à la fois la spectroscopie électronique à haute résolution et la microscopie électronique à basse énergie. Il est une combinaison entre deux techniques de sciences des surfaces HREELS (High resolution electron energy loss spectroscopy) et LEEM (Low-energy electron microscopy) dans le même instrument. Il est capable d'offre une résolution spatiale très élevée et une bonne résolution spectrale (5 meV). Les deux techniques utilisent des électrons de faible énergie qui frappent la surface de l'échantillon, les pertes d'énergie au contact de l'échantillon seront analysées par HREES, la sonde électronique à basse énergie utilisée pour imager la surface de l'échantillon dans LEEM.<sup>[2]</sup>

La microscopie par perte d'énergie d'électrons à haute résolution utilise plusieurs lentilles électromagnétiques et un séparateur du faisceau, qui sont positionnés entre une source d'électrons extraite du faisceau d'atomes de césium excité et un spectromètre à temps de vol (TOF). Dans ce projet HREELM, nous utilisons une source des électrons monoénergétique qui vient des atomes Rydberg, ces électrons ont des propriétés spécifiques comme une faible dispersion d'énergie et un courant suffisant pour permettre la cartographie spectroscopique d'un échantillon.

Les électrons de faible énergie peuvent être diffusés de manière inélastique à travers leur passage dans la surface de l'échantillon, c'est-à-dire, ils changent leurs énergies au cours de l'interaction, les électrons sont collectés par des lentilles électromagnétiques ou magnétiques et entrent puis dans un analyseur, l'élément qui disperse les électrons en fonction de leur énergie **E**. Un détecteur sensible en temps peut donc mesurer l'énergie restante des électrons **E**<sub>ext</sub> alors on peut construire le spectre de perte d'énergie de la surface avec la relation : **E**<sub>Loss</sub>=**E**<sub>in</sub>-**E**<sub>ext</sub> (10meV). Ainsi à partir de ce nouvel instrument, l'étude des modes vibrationnelles d'atomes ou de molécules isolés et également des plasmons de surface et d'interface seront réalisées.<sup>[2]</sup>



Figure 1 : schéma descriptive de projet HREELM, qui combine la résolution spectroscopique de HREELS et l'imagerie de LEEM en un seul instrument. L'instrument HREELM nécessite une source d'électrons monochromatique, avec un four à césium produisant un faisceau atomique ionisé par des lasers. [2]

### 1.1 Sources des électrons dans HREELM :

Le type le plus classique d'électrons est la source thermoïonique comme (une pointe tungstène ou un monocristal de LaB6 ou de CeB6), ces sont utilisables typiquement à MEB et à SET, mais ces sources d'électrons ne sont pas adaptées à notre HREELM à cause de leur forte d'énergie de dispersion (supérieure à ~0.3*eV*). Nous utilisons donc des atomes Rydberg qui sont des atomes excités et qui s'ionisent facilement sous un champ électrique. Cela devrait produit une source des électrons brillante et a une faible dispersion d'énergie (< 10 *meV*). Cette source est développée par l'ionisation d'un faisceau atomique effusif à haut flux.

### 1.2 Analyse énergétique dans HREELM :

L'analyse énergétique est réalisée par spectromètre Tof (MCP), les électrons extraits s'accélèrent par une tension connue 10V dans une région appelée région d'accélération, puis ils se dirigent dans un tube de longueur **d** (1 m) sans champ électrique. A l'extrémité de ce tube, il y a un détecteur sensible au temps qui enregistre le temps d'arrivé des électrons. L'énergie de la potentielle des électrons est égale l'énergie cinétique :  $-q V = \frac{1}{2} m_e v^2$ .

Le temps de vol des électrons peut être calculé par cette relation.

$$Tof(\acute{e}lectrons) = \sqrt{rac{m_e}{2.q.V}} \cdot d$$
,  $Tof(\acute{e}lectrons) = 6.15 \, \mu s$ 

La résolution énergétique des électrons que nous souhaitons obtenir est 10 meV, c'est nécessaire à l'analyse des spectres vibrationnelles locaux des échantillons et des plasmons d'interface.<sup>9</sup>

On peut donc déterminer la résolution temporelle à partir de cette relation.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{2}{d} \sqrt{\frac{2E_d^3}{m_e}}$$
 Où  $\partial t = 1.067 \ ns$ 

 $E_d$  L'énergie de dérive ou l'énergie cinétique, **d** la longueur de dérive avant le détecteur et  $\partial E$  la résolution énergétique (10meV), cette résolution temporelle obtenue théoriquement.

#### 1.3 L'analyse de l'energie Tof :

#### 1.3.1 L'analyse de l'energie Tof en mode pulsé :

L'importance ici est de l'utilisation des informations fournies par les ions pour connaitre la position de l'électron dans le contexte de HREELM. La figure 14 permet d'imager 3D les positions de départ des ions et la mesure de la direction z par le temps de vol des ions. L'ionisation des états de Rydberg est suffisamment contrôlée pour garantir une bonne corrélation entre les positions détectées des deux particules chargés (ion-électrons).

A  $t_0$  les atomes sont ionisés dans la zone d'ionisation  $(50\mu m 50 \mu m 50 \mu m)$  sous un champ qui sépare les charges. Les électrons frappent l'échantillon au temps  $t_1$ , perdent éventuellement leur énergie, dirigent ensuite au détecteur, qui enregistre la position des électrons et ainsi que leur temps d'arrivé  $t_2$ .

Les coordonnées x et y des électrons représente l'image de l'échantillon et les coordonnées x et y des ions peuvent être utilisée pour leur corrélation avec les électrons détectés. A partir cette corrélation nous pouvons connaitre la position de départ de l'électron à travers le temps de vol de l'ion, mais cela est nécessite d'avoir une faible dispersion de l'énergie des électrons. Cette dernière peut être valable avec une petite zone d'ionisation.



Figure 2 : Schéma du principe d'utilisation des ions détectés en corrélation avec les électrons pour améliorer la résolution spectroscopique. [1]



Figure 3 : les positions aléatoires des ions créés avec  $\Delta z = 25 \ \mu m$  et volant à 230 eV pouvant être déterminées avec une résolution 3.3  $\mu m$  et avec une précision 150ps le point limitant de la résolution temporelle mais la mauvaise corrélation entre le temps d'arrivée et la position initiale d'électrons.[1]

#### 1.3.2 La mesure de l'énergie (Tof) en mode continu :

Dans ce mode, le temps de création d'un électron initial est inconnu. En revanche nous pourrons être capables de le connaitre à l'aide du temps d'arrivé des ions. Nous aurons alors la possibilité de mesurer l'énergie des électrons avec la méthode du temps de vol des électrons. Une petite zone d'ionisation dans la direction Z avec une production des électrons de manière continue comme le montre la Figure 4. Le principe est que même si l'ionisation est continue, le temps d'électrons initiale peut être mesuré par le temps de vol des ions. Lorsqu'un ion est détecté nous vérifions le temps d'arrivé mesuré d'un électron compatible avec cet ion de l'autre côté. Nous pouvons déduire la perte d'énergie au niveau de l'échantillon à partir de la différence entre  $t_2$  et  $t_1$ . Cette technique est assez complexe en termes de détection et d'analyse des données <sup>[9]</sup>.

Pour analyser l'énergie des électrons d'après le temps de vol, nous devons tout d'abord vérifie la résolution temporelle des ions. Nous définissons alors en Simion une petite zone d'ionisation de  $Z \sim 10 \mu m$ , avec une distribution continue de gaussien de 100 particules, sans connaitre les positions initiales de ces particules. Le but est que le temps de vol des ions ne dépende pas de la position axiale initiale Z de la particule chargée. Nous utilisons alors un dispositif sous connu comme un spectromètre à temps de vol de Wiley-McLaren.<sup>[7]</sup>

Avec cela nous avons obtenu des résultats (Figure 5) qui montre la résolution temporelle des ions peut atteindre jusqu'à  $\sim 1.12ns$  ce qui est correspond à une résolution énergétique quelques dizaines meV.



Figure 4 : Schéma du principe d'utilisation des ions détectés en corrélation avec les électrons pour mettre en lumière des mesures de Tof en mode continu, on suppose ici la position de départ Z connue Pour connaitre le temps de départ de l'électron on utilise le temps de vol  $t_1$ .



Figure 5 : Les résultats de simulation, la position de départ des électrons en fonction le temps d'arrivé des ions avec une résolution temporelle  $\sim$ 1.12 ns

# 2 **HREELM** 0 :

La configuration HREELM.0 est la version simplifiée de HREELM, un échantillon sera positionné en A2 et les électrons situées dans la bride A7) et frappent l'échantillon à un angle de 45° ensuite se dirigent vers un analyseur du temps de vol fixé sur la bride A3 où nous pouvons imager l'échantillon.

### 2.1 Chambre mu métal :

C'est une chambre à vide dans laquelle nous pouvons trouver à l'intérieur (des électrodes d'ionisation et le spectroscope des ions). Cette chambre a été réalisée par un matériau  $\mu$ -métal<sup>1</sup> d'une épaisseur 5 mm. Elle a été construite par la société Kurt Lesker au début de l'année 2020. Elle contient de nombreuses brides. Ce montage peut servir à plusieurs configurations. Ce qui en concerne des études de la source des électrons pour cela, il faudra que l'installation fonction dans la configuration « source des électrons Tof ».

N°	Taille	Configuration source d'électrones Tof	Configuration HREELM 0
Al	CF200	accès à la chambre pendant le montage	vide
A2	CF150	source des électrons	manipulateur d'échantillon
A3	CF63	fenêtre d'observation	optique d'imagerie , tube de drive et PTSD
A4	CF63	fenêtre d'observation	fenêtre d'observation
A5	CF40	tube de dérive et TSD	fenêtre d'observation ou spectroscope de masse
A6	CF40	fenêtre d'observation	fenêtre d'observation
A7	CF63	fenêtre d'observation	source des électrons
A8	CF100	pompage	pompage
<b>B</b> 1	CF40	fenêtre d'observation	fenêtre d'observation
<b>B</b> 2	CF40	fenêtre d'observation	manipulation des échantillons
<b>B</b> 3	CF40	fenêtre d'observation	manipulation des échantillons

Tableau 1 : Résumé des brides disponibles dans la chambre nu métal et leur utilisation dans la configuration source des électrons Tof et la configuration HREELM 0. TSD : time sensitive detector, PTSD : position and time sensitive detector.

Le but de ce stage était de vérifie que la source des électrons a des propriétés appropriées au terme de dispersion d'énergie, de dispersion temporelle et de dispersion du courant, pour ensuite pouvoir être utilisée dans la configuration HREELM 0.

Chaque configuration utilise les brides de manière différente, cela est expliqué dans Tableau 1. La configuration « source d'électrons Tof » nous utilisons la bride CF150 (A2) pour brancher la source des électrons dans la chambre, cette bride sera utilisée pour maintenir le manipulateur d'échantillons dans la configuration « HREELM 0 ». Avec un excellent blindage dans cette chambre, nous pouvons d'effectuer des mesures d'énergie des électrons à très faible à partir du Tof des électrons. La résolution en énergie peut être augmenter en plaçant un tube de dérive qu'est blindé sur la bride A5.

 $<sup>^{1}\</sup>mu$ -métal est l'alliage le plus largement utilisé pour le blindage magnétique. Sa composition de 80% de nickel, 4,5% de molybdène et le reste de fer lui confère des propriétés de haute perméabilité.

Les brides B1, B2 et B3 ne sont pas centrées au centre de cylindre principal de la chambre, mais sur un point de même plan et plus proche de la bride A2. Ces brides sont utilisées comme hublots dans la configuration HREELM 0.



Figure 6 : Montage de HREELM.0



Figure 7 : Schéma 3D de la chambre mu métal à deux fois avec une rotation 90° qui représente toutes les brides.

### 2.2 Les électrodes d'ionisation :

Dans notre montage HREELM.0 (Figure 6), nous utilisons des électrodes circulaires trouées fixées sur une seule pièce de maintien, cette pièce doit évidemment être réalisée dans un matériau isolant, usinable et mécaniquement robuste (plastiques haute qualité PEEK<sup>2</sup>), qui a une forme d'amphithéâtre avec une série d'ouvertures concentriques de plus en plus grandes au total 13 marches (de plus petits diamètres de 26 mm au plus grand diamètre de 68 mm) pour 8 électrodes. Figure 8

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Un polymere organique adapté à l'ultravide et un bon isolant électrique

Les huit électrodes constituées de disques plats en acier inoxydable de diamètre croissant (de 26 mm à 68 mm par pas de 6 mm), ont été collées sur la pièce de maintien avec ThorSeal<sup>3</sup>, et connectée électriquement par une feuille de métal soudée au disque. La feuille soudée est pliée vers le bas par rapport à l'axe de concentrique et fixée sur annaux de PEEK où elle est connectée à un câble isolé qui est ensuite connecte à un passage électrique vers l'extérieure de la chambre.



Figure 8 : Dessin 3D de la pièce qui maintient les électrodes. Les axes des lasers qui sont représentés par des flèches cylindriques colorées. L'axe blanc des électrons et des ions de césium. Les 8 électrodes reposent sur des marches de la pièce blanche qui est en matériau isolant.

# 3 Excitation du césium vers des états de Rydberg :

## 3.1 L'état de Rydberg (atome alcalin) :

L'état de Rydberg est un état excité d'un atome dont le nombre quantique principal de l'électron de valence n (numéro de la couche) est très élevé (10-100 typiquement). Cet état est appelé « atome Rydberg » par abus de langage. La particularité de cet atome est sa grande taille (proportionnelle à  $n^2$ ), ce qui implique la possibilité d'avoir des grands moments dipolaires et

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> *Thorseal* <sup>®</sup> est fabriqué à partir d'un élastomère exclusif Thordon sans durée de conservation ni dégradation des propriétés au fil du temps.

donc des interactions interatomiques très fortes. L'énergie de liaison est très faible, ce qui permet de l'ioniser facilement.<sup>14</sup>

Un atome alcalin possède un seul électron de valence ns<sup>1</sup>. Par exemple la configuration électronique complète de césium est :  $1S^22S^22P^63S^23P^64S^23d^{10}4P^65S^24d^{10}5p^66S^1 \equiv [X_e]6s^1$ .

En mécanique quantique, l'expression de l'énergie potentielle pour un état de Rydberg, en plus de l'énergie potentiel de Coulomb hydrogénique E, nécessite l'introduction d'un défaut quantique  $\delta_l$  et  $R_y$  la constante de Rydberg dans l'expression de l'énergie de liaison :

$$E(n) = \frac{-R_y}{(n-\delta_l)^2}$$

### 3.2 Les atomes Rydberg en champ électrique (Effet Stark) :

Les états Rydberg sont proches du seuil d'ionisation de l'atome, il est possible de les ioniser de manière contrôlée avec un champ électrostatique faible réalisé au laboratoire. Le décalage et la division des lignes spectrales des atomes par un champ électrique statique sont connus sous le nom d'effet Stark. En raison de leurs grands moments dipolaires électriques, les atomes de Rydberg sont généralement très sensibles aux champs électriques et présentent de grands décalages de Stark comparément aux atomes dans les états (n-bas) et fondamentaux.

### 3.3 Les niveaux hyperfins du césium :

Le césium est un alcalin qui présente des transitions dans le visible et l'infrarouge. Le niveau fondamental du césium est  $6S_{1/2}$ .La structure hyperfine divise ces groupes encore plus, l'interaction est décrite comme la formation du moment angulaire total F= J+I avec J=S+L, S le moment angulaire de spin et I le moment nucléaire. Dans le césium, le moment nucléaire I a une amplitude de 7/2, cela signifie que l'état fondamental  $6S_{1/2}$  se couple aux états F=3 et F=4.

Le premier état excité du césium est 6p, qui présente un moment orbital de L=1. La structure fine divise les états dégénérés en deux groupes  $np_{1/2}$  et  $np_{3/2}$ . A note qu'il existe une règle de sélection. Les transitions hyperfines sont autorisées entre aux niveaux si elle vérifie  $\Delta F = \pm 1 \text{ ou } 0$ .

Dans le laboratoire, on travaillera sur la raie  $D_2$  qui nécessite un laser à 852 nm. Ce type de laser est facile à trouver.



Figure 9 : Niveaux fondamental et excités du Césium [1].

#### 3.4 L'ionisation :

Les trois lasers s'inscrivent dans le montage HREELM.0 (Figure 6) pour effectuer l'ionisation des atomes de césium de manière à créer une paire électron-ion, avec un processus de transition à trois photons. Le faisceau atomique de césium sort d'un four installé, passe dans un tube d'aluminium chauffé et se propage jusqu'à la région d'ionisation entre les électrodes qui produisent des champs électriques statiques.

Les atomes de métaux alcalins s'ionisent typiquement sous un champ d'ionisation classique  $F = 1/16n^*(5 - 10V/cm)$ , où  $n^*$  le nombre quantique effectif qui est lié à l'énergie de liaison des états en champ nul  $E = 1/2n^*$ , le champ d'ionisation F permet à électron s'affranchir du potentiel de coulomb du noyau et ouvre des trajectoires vers la région à faible champ.<sup>[5]</sup>

Le premier laser est un laser Toptica DLPro contrôlé par un Toptica DLCPro, c'est un faisceau laser de la longueur d'onde 852 nm perpendiculaire avec le faisceau des atomes de césium neutre, qui excite ces atomes du niveau 6  $S_{1/2}^{F=4}$ au niveau 6 $P_{3/2}^{F=5}$ . La seconde transition est réalisée par

un faisceau de laser de la longueur d'onde 1470 nm émis par un diode DFB de Toptica, contrôlé par un LIR 110/SC110, ce faisceau de laser est dans le sens inverse du premier faisceau, couplant de l'état excité  $6p_{2/3}$  vers l'état  $7S_{1/2}$ .



### 3.5 Montage de la source laser :

Figure 10 : Montage optique du laser MOGLabs avec un faisceau bien aligné jusqu'au Fabry-perot et à la fibre optique.

Un nouveau montage réalisé pendant la péride de mon stage pour servir à l'excitation des atomes du césium vers les états de Rydberg, en particulier la dernière transition du niveau  $7S_{1/2}$  aux états de Rydberg. Cela est assurée par le laser MOGLabs (770-795nm).

En fait, il existe plusieurs de dispositifs optiques dans ce montage que j'ai entièrement mis en place, que s'inscrivent spécialement pour améliorer notre faisceau du laser notamment la puissance par l'utilisation d'un Tapered Amplifier (TA) et le contrôle de la longueur d'onde à travers le Fabry-Perot.

A l'entrée du Tapered Amplifier, l'injection du faisceau laser de la puissance 15 mW permet de l'amplifier jusqu'à 574 mW. Cette puissance est accordable afin d'avoir l'excitation vers les états Rydberg. Les isolateurs optiques jouent un rôle important qui est d'éliminer les réflexions parasites, le premier isolateur pour protéger la source laser et la deuxième pour éviter l'amplification de la lumière réfléchie. En plus, nous utilisons le Fabry-Perot qui est constitué de deux miroirs partiellement réfléchissants se faisant face, il servira contrôler la longueur d'onde des faisceaux en modifiant de la distance que sépare les deux miroirs sur une colle piézo-électrique.

#### 3.5.1 Tapered Amplifier :



Figure 11 : Mode laser injecté dans un TA et collimaté, représenté dans le plan horizontal et vertical.[6]



Figure 12 : Monture pour diode TA conçue. Elle est composée de trois blocs en cuivre découpés dans la masse : une base en cuivre et deux blocs face avant et face arrière.[6]

L'intérêt du TA est principalement pour augmenter la puissance d'un faisceau injecté dans notre expérience. Un Tapered amplifier ou amplifier optique évasé est comme une diode amplificatrice du laser injecté.

Le mode en sortie a les caractéristiques spectrales du mode injecté, l'alimentation de ce TA par quelques volts (<5 V) fournit une énergie nécessaire à l'amplification du mode injecté, alors cette énergie augmenter la température dans la diode ce qui nous oblige à utiliser un contrôleur de température pour asservir cette grandeur. Lorsque le TA est alimenté sans être injecté cela créer du rayonnement spontané (dizaines de mW), il n'est doit pas alors rester alimenter longtemps sans être injecté.

La partie active du TA a une distance de 4 mm suivant l'axe de propagation du mode injecté. La section dans laquelle le faisceau se propage fait quelques micromètres carrés en face arrière où laser est injecté. La particularité d'un TA est que cette section s'élargit dans le plan horizontal après typiquement 1 mm dans l'axe du faisceau alors qu'elle reste constante dans le plan vertical (Figure 11). Le mode sorti possède un fort astigmatisme, il diffracte plus fortement dans le plan vertical que dans le plan horizontal.

Les deux lentilles qui sont présentées dans la (Figure 11) une de sortie et autre d'entrée :

- La lentille d'entrée sert à injecter un mode collimaté dans le TA, la lentille placée à distance focale de la diode (3 mm). L'alignement est crucial pour avoir une bonne amplification.
- La lentille de sortie joue un rôle de collecteur et de collimateur du faisceau sortir dans le plan vertical. (Axe le plus divergent)

La monture de TA qui est représentée dans la Figure 12, est constitué d'une base en cuivre qui sert de support et de réservoir de chaleur. Un Peltier est placé sur cette base et au-dessus est montée la monture contenant la diode. La monture est divisée en 2 blocs, face avant et face arrière, accueillant la diode, les deux lentilles d'entrée et de sortie et un thermistor. Nous avons ajouté une lentille cylindrique pour corriger l'astigmatisme en collimatant le faisceau dans le plan horizontal.

# 4 L'étude d'une détection électron-ion avec simulation :

### 4.1 Présentation de la simulation avec le logiciel Simion 8.1 :

Le but de la simulation est d'étudier la corrélation entre les électrons et les ions de césium avec le logiciel Simion 8.1. En bref, la Figure 13 représente un exemple de simulation des électrons et des ions avec leurs trajectoires. Elle contient principalement d'électrodes pour effectuer le processus de photo-ionisation par l'application d'une tension statique sur la zone d'ionisation. Après l'ionisation des atomes de césium (voir la section 3.4), les électrons se propagent dans un tube de dérive et les ions vont en sens inverse dans la région de dérive. Les 8 électrodes sont alimentées par des tensions négatives. La valeur de tension de chaque électrode est facile à ajuster manuellement ou en programmation dans le logiciel Simion 8.1, cela donne la capacité de contrôler la trajectoire du faisceau d'ions du césium et du faisceau d'électrons. Les particules (ion-électron) pourront être ralenties ou accélérées par l'ajustement des valeurs de tension des électrodes. La création de pair ion-électron nous oblige à utiliser deux détecteurs MCPs<sup>4</sup> (Microchannel Plate) à deux extrémités de l'axe optique (l'un pour les ions et l'autre pour les électrons), ces deux détecteurs peuvent extraire des informations temporelles des électrons et des ions.



Figure 13: Coupe planaire de la simulation dans le plan OXY

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Une galette de microcanaux (MCP *microchannel plate*) est un dispositif amplificateur de charge électrique au fonctionnement similaire à celui du photomultiplicateur.

### 4.1.1 Les électrodes :

Les électrodes permettent de contrôler des lignes de champ électrique dans l'objectif d'améliorer le passage des électrons et des ions à l'intérieur à travers l'application une tension négative à chaque électrode. La structure mécanique de ces électrodes a été traité dans (la section 2.2 cidessus. Les électrodes sont des électrodes cylindriques (1 et 2 d'épaisseur 0.5 mm, 3,4,5,6,7 et 8 sont d'épaisseur 1 mm), les deux extrémités de l'axe optique sont ouvertes afin de permettre l'extractions des particules chargées.



Figure 14 : Zoom sur les électrodes dans la figure 1

### 4.1.2 L'ionisation en Simion :

Les atomes de césium sont déjà excités par trois lasers dans la zone d'ionisation (voir la section 3.4), donc ce que nous manque est la photo ionisation. Les ions de césium et les électrons sont extraits par l'application d'un potentiel électrostatique sur la source. Dans notre simulation, nous choisissons le champ électrique à la source  $\sim 25V/cm$ .



Figure 15 : coupe planaire des 4 électrodes qui sont les responsables sur l'ionisation avec les lignes du champ et du potentiel.

Nous choisissons aussi toute valeur comprise entre 10 et 50 V/m qui est appropriée pour obtenir un champ de 25 V /cm, il faut appliquer V1-V2 avec 25 V /cm\*0.4 cm = 10V avec V1= -3005V,

V2= -2995V. Ainsi que les valeurs de V4 et V3 (V4 = -2982V et V3 = - 3018.9 V) pour acquérir une norme très plate des lignes de champ voir (Figure 15)<sup>5</sup>.

Enfin, V6 et V8 sont présents pour ajuster la focalisation du faisceau d'électrons (V6 = -2770 V et V8 = 2950V). Ces valeurs sont suffisantes pour obtenir tout ce qui est nécessaire pour entrer les électrons dans la colonne HREELM. De façon similaire V5, V7 et V9 ces électrodes seront capables de contrôler la trajectoire du faisceau des ions jusqu'au détecteur (MCP).

### 4.2 L'influence des électrodes V7 et V9 :

Quand les ions se dirigent vers le détecteur dans la région de dérive, ces ions n'arrivent pas en même temps au détecteur. Notre but dans cette partie est donc de souhaiter arriver tous les ions au même instant sur le détecteur par l'ajustement des tensions sur les électrodes V7 et V9.

L'idée sera de trouver les valeurs exactes des tensions appliquées sur les électrodes V7 et V9 pour avoir une bonne corrélation entre les électrons et les ions. On met en œuvre l'ajustement des valeurs des tensions dans les électrodes (7 et 9) à travers un programme en Simion. Cela peut assurer la sortie des ions vers le détecteur. En addition, l'amélioration de la résolution temporelle du temps de vol des ions, elle s'est réalisée par un programme développé en Lua pour servir le logiciel Simion 8.1. Ce programme est son rôle principal est d'optimiser notre résolution temporelle par l'ajustement des tensions (voir l'annexe).

### 4.2.1 L'influence des électrodes V7 et V9 sur Tof d'un ion :

Le temps de vol d'ions sur le détecteur est modifié en fonction des valeurs des tensions appliqués sur les électrodes V7 et V9. Le temps de vol des ions est compris entre  $7.732\mu s$  et  $7.532\mu s$  après l'ajustement de tensions d'électrode V9 entre -3206V et -3188V et l'ajustement de tensions d'électrode V7 entre -3002V et -2994V. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 16. En remarquent que l'électrode V7 influence plus que V9 sur le faisceau d'ions.



Figure 16: Résultats de simulation qui montre l'impact des électrodes V7 et V9 sur le temps de vol (Tof) d'ions avec une position initiale stable d'ion.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Toutes les valeurs représentées ici elles sont fournies par la compagnie Kimball physique

#### 4.2.2 L'optimisation du Tof des ions par les électrodes V7 et V9 :

En effet, dans cette simulation nous avons choisi un faisceau continu d'ions avec 100 particules (ions), ces dernières sont créées dans la zone d'ionisation de diamètre  $10\mu m$  avec une distribution gaussienne 3D.

Avec l'ajustement de tension d'un pas (20V) des tensions sur les électrodes V7 et V9 dans le programme en Simion. Nous remarquons que ces valeurs sont liées forcément à la taille de la zone d'ionisation, pour avoir une bonne résolution, il faut que nous ayons une petite zone d'ionisation. L'électrode V7 pourrait donc modifier de manière générale l'optimisation du temps de vol d'ions que l'électrode V9. En conséquence, cette optimisation va nous aider pour les prochaines études.

Cette étude est effectuée principalement dans le but de caractériser quelle électrode peut améliorer mieux la résolution temporelle des ions, dans laquelle l'optimisation du Tof des ions en même instant, elle peut être atteindre jusqu'à ~  $0.4 \ 10^{-4} \mu s$  cependant dans la section 1.3.2 nous avons l'améliorer jusqu'à ~1.12 ns.



Figure 17: Résultats de la simulation qui représente l'optimisation de la résolution temporelle des ions en fonction les tensions de V7 et V9.

#### 4.3 L'influence de la vitesse des atomes de césium :

Dans le four de césium sous vide, les atomes de césium se dirigent vers la zone d'ionisation avec une vitesse. En conséquence cette vitesse peut affecter les faisceaux crées en coïncidence (d'ions et d'électons). Notre but, consiste à la corrélation ion-électron en fonction du changement de la vitesse du faisceau atomique de césium.

#### 4.3.1 L'addition d'une vitesse de faisceau de Cs neutre parallèlement avec le faisceau de Cs+ :

Dans ce cas, on induit en simulation 100 particules séparées axialement par  $0.5\mu m$  dans la région d'ionisation et les tensions appliquées aux électrodes 7 et 9, V7 = -3143.85843 et V9 = -3422.31937 ces valeurs sont bien choisis à partir de l'optimisation précédente, dans le contexte d'étudier l'influence de la vitesse de faisceau de césium neutre sur les ions.

Lorsqu'on ajoute une vitesse des atomes de césium neutre sur le faisceau des ions en même direction, le temps d'arrivé des ions pourrait diminuer en fonction l'augmentation de la vitesse ajoutée ce qui est marqué dans la figure 18. Cette étude basée sur la réduction la relation entre la vitesse de césium neutre et le temps d'arrivé des ions.

La figure 18 montre six courbes de la différence (t<sub>ions</sub>-t<sub>électrons</sub>) en fonction de la position initiale des électrons, cette différence a été mesurée en coïncidence par les deux détecteurs à la sortie du tube à partir de leurs temps d'arrivés.

Les résultats de la simulation montrent la corrélation entre les électrons et les ions au niveau de leurs temps d'arrivé. On voit un décalage entre les courbes jusqu'à 5ns sous l'influence de la vitesse des atomes de césium neutre pour un décalage de la vitesse de 10 m/s. Cette résolution temporelle peut atteindre jusqu'à 1 ns pour deux solutions, le premier est d'ajouter des électrodes supplémentaires dans le montage et le deuxième est de limiter d'un doppler par laser.





#### 4.3.2 L'addition verticalement d'une vitesse d'un faisceau de Cs neutre :

Dans cette étude, on induit axialement 10 particules (ion-électron) séparées par la distance  $20\mu m$  dans la zone d'ionisation. Les tensions appliquées sur les électrodes 7 et 9 sont V7 =-3189.44857V et V9 = -3172.91714V.

Cette configuration est la même que dans la figure 2, c'est-à-dire la vitesse du faisceau de césium neutre est verticale ce qui influence de manière extrême la trajectoire des électrons et des ions. Cette vitesse permet changer l'angle de départ de ces faisceaux voir (Figure 19(a)). Si la vitesse est trop grande par exemple pour v=400m/s, les électrons vont se bloquer sur l'électrode 4 comme

cela est visible dans les résultats de la simulation. Nous devons donc bien choisir la vitesse des atomes de césium pour avoir un bon passage des électrons et des ions vers les détecteurs et une bonne résolution temporelle des ions.



Figure 7: (a) le dessin de configuration réalisable dans Simion avec un petit zoom sur la zone d'ionisation, les résultats de simulation obtenus 6 courbes T<sub>IONS</sub> – T<sub>derress</sub> en fonction de la position initiale d'électrons sous des vitesses verticales (200,210,220,230,240 et 400 m/s)

# **Conclusion :**

En résumé, nous avons mis en lumière le projet HREELM, leur source des électrons et les aspects principaux (la chambre mu métal, les détecteurs, les électrodes d'ionisation et les trois lasers) dans le contexte d'étudier expérimentalement et en simulation la détection ion-électron.

Dans mes travaux pendant ce stage, nous avons produit une source des électrons appropriée avec ce que nous souhaitons pour que HREELM puisse réuni l'analyse des vibrations des atomes de l'échantillon et les plasmons de l'interface. Ainsi que nous avons monté trois lasers dans le montage HREELM.0 avec une grande précision. Chaque laser focalisé dans la zone d'ionisation. Nous avons réussi à voir l'ionisation des atomes de césium. Cette source créée à partir des atomes alcalins (Césium) devrait présenter une bonne caractéristique (une faible dispersion de l'énergie inférieure à meV).

En outre, Nous avons présenté les simulations de détection ion électron en coïncidence avec logiciel Simion 8.1, dans lesquelles nous avons eu la capacité de contrôler la trajectoire du faisceau des ions dans la région de dérive et des électrons dans le tube de dérive à l'aide de l'ajustement des tensions aux électrodes. Nous avons montré que l'électrode V7 est celle la plus grande influence sur la trajectoire des ions. La corrélation entre les ions et les électons est bien révélée dans ce travail. En conséquence, nous avons pu extraire les informations des électrons temporelles et spatiales à partir des informations des ions.

En addition, la vitesse des atomes de césium neutre orientée en verticale ou en parallèle avec la trajectoire des ions peut diminuer ou augmenter le temps de vol des ions et aussi peut changer la direction de faisceaux.

Enfin, l'énergie des électrons est mesurée à travers le temps du vol dans HREELM. Nous avons optimisé la résolution temporelle jusqu'à 1ns qui est correspond à une résolution énergétique de quelques dizaines meV.

# Annexe/

Un programme écrit en Lua qui sert le logiciel Simion 8.1. il peut optimiser la résultion du temps de vol des ions au même instant sur le détecteur, à travers de l'ajustement des tensions sur les électrodes V7 et V9.

```
simion.workbench_program()
 --==== globale variables (they can be modified also in the Simion Variables)
 adjustable max_tries = 1000 -- rerun limit for the number of runs
 adjustable V7 =
                   -3189.44857
 adjustable step_V7 = 5
adjustable V9 = -3172.91714
 adjustable step_V9 = 5
  -===== local variables -- These constants must agree with patricle definitions in "syst.fly2":
 local SimplexOptimizer = require "simionx.SimplexOptimizer"
local opt
local run_number = 0
local request_rerun = 1
                                   -- rerun counter
-- flag: request a rerun if false (0) then stop if true (1) then continue
local update_pe = true -- mark PE display
local t = {} -- (times at the detector)
local y = {} -- (positions at the detector)
local lastN = 10 -- last ion number (number of ions)
                                           -- mark PE display update at start of each run.
 local n = 0 -- in Terminates segment will be number of ion that hit the sample (we do not count particle that hit the diaph for example)
local meant = 0 -- average of time
local sum = 0 -- sigma (variance) of time distribution
 local sample pos = -646.5
      ==== subroutines
 -- SIMION initialize segment. Called on particle creation.
 -- Set initial voltages and control reflying.
Function segment.initialize()
                                     -- Update the potential array before each run
     update pe = true
      sim_rerun_flym = request_rerun -- test de Rerun. If after the function Terminate request_rerun is false (0) then stop but if true (1) continue
      if not opt
         then
               opt = SimplexOptimizer {start = {V7,V9}, step = {step_V7,step_V9}}
      end
      V7,V9 = opt:values() -- gives new values for the parameters to be optimized
      n = 0 -- initialise number of ions to zero (to avoid accumulation if ReRun) sum = 0
      meant = 0
  -- SIMION fast_adjust segment.
 -- Update electrode voltage. Could be dynamic, that is during the fly, but not here.
[] function segment.fast_adjust()
                      adj_elect07 = V7
                     adj_elect09 = V9
```

```
-- Terminate segment
Function segment.terminate()
þ
     if ion_px_mm>sample_pos+0.02
          then
n = n+1
                 t[n] = ion_time_of_flight
         end
Ļ
     if ion number < lastN
         then
         then

return -- return to the begining of the function (so continue the loop on n)

end -- end of loop over ions
     for p = 1, n do
  meant= meant+t[p]
卓
                            -- loop on positions (n is the number of particles reaching the sample)
      end
       meant = meant/lastN
       for p = 1, n do -- loop
sum = sum+math.pow(t[p]-meant,2)
sigmat = math.sqrt(sum/lastN)
                                -- loop on positions (n is the number of particles reaching the sample)
      end
 minimized = sigmat
opt:result(minimized) -- minimized is the result that will be minimized
    request_rerun = 0
end
                                   -- flag termination
     fout:close()
Lend
```

# Remerciement :

J'aimerai tout d'abord remercier mon responsable de stage **Daniel COMPART**, **Directeur de recherche, CNRS, Laboratoire Aimé Cotton (LAC),** pour m'avoir accepté dans son groupe de recherche et m'avoir fait confiance pour mener à terme ce projet. Merci pour le temps passé ensemble et le partage de ton expertise au quotidien. Grâce aussi à ta confiance j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions.

Je tiens à remercier spécialement **Hans LIGNIER** et **Christoph** pour m'avoir aidé de finir le montage laser Moglabs et Tapered Amplifier pendant la période de stage. Merci pour vos réponses, vos connaissances, vos expertises, vos soutiens, vos pintes et les discussions. J'espère qu'on aura la chance de rencontre à travailler ensemble à nouveau.

Je désire remercier tous les professeurs de l'**université du Mans** qui m'ont fourni les outils nécessaires au bon déroulement de mon stage. Je tiens particulièrement à remercier **M. Brice Arnaud**, professeur et responsable de Master (PAIP), qui fut le premier à me soutenir dans ma démarche de recherche de stage.

Je saisis également cette occasion pour adresser mes profonds remerciements aux professeurs de **l'université de moulay Ismail Meknès**. Ils ont toujours été à mon écoute et ont su m'apporter un soutien sans faille, notamment en ce qui concerne les démarches administratives relatives à arriver en France. Je remercie particulièrement le professeur **Rahmani Abdelhai,** qui m'accompagner par ses conseils toute la période de ce master.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé et relu lors de la rédaction de ce rapport de stage : ma famille, mes amis et spécialement mon frère Redouan.

# Bibliographie :

- Raphaël Hahn. Ionisation of caesium Rydberg atoms for a mono-chromatic electron source for applications in electron microscopy and spectroscopy. General Physics [physics.gen-ph]. Université Paris-Saclay, 2021. English. NNT: 2021UPASP007. tel-03176839.
- [2] M. Mankos K. Shadman, R. Hahn, Y. J. Picard, D. Comparat, O. Fedchenko, G. Schönhense, L., A. Lafosse, and N. Barrett, Design for a high resolution electron energy loss microscope, Ultramicroscopy 207, 112848 (2019) doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.112848.
- [3] E. Moufarej, M. Vielle-Grosjean, G. Khalili, A. J. McCulloch, F. Robicheaux, Y. J. Picard, et D. Comparat.; Forced field ionization of Rydberg states for the production of monochromatic beams; Phys.Rev.A 95, (2017). https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.043409
- [4] THOMAS F, GALLAGHER, RYDBERG ATOMS, Department of Physics, University of Virginia, 1994, (www.cambridge.org/9780521385312).
- [5] Guyve Khalili. Réalisation d'une source d'électrons par ionisation d'un jet d'atomes de césium refroidis par laser. Physique [physics]. Université Paris Sud - Paris XI, 2015. Français. NNT: 2015PA112103. tel-01233284.
- [6] X Wang, High-power, spectrally stabilized, near-diffraction-limited 970 nm laser light source based on truncated-tapered semiconductor optical amplifiers with low confinement factors. Ferdinand-Braun-Institut fur" Hochstfrequenztechnik" im Forschungsverbund Berlin, Gustav-Kirchhoff-Str. 4, D-12489 Berlin, Germany 2011. (http://iopscience.iop.org/0268-1242/27/1/015010).
- [7] F. Chandezon, EL Huber, and C. Ristori. A newregime Wiley-McLaren timeofflight mass spectrometer. CEA /Departement de Recherche Fondamentale sur la Matière Condensée, LLZA, France, F- 38054.
- [8] A. Pailloux, T. Alpettaz, and E. Lizon, Candlestick oven with a silica wick provide sanintense collimated cesium atomic beam CEA-Saclay, DEN/DPC, Service de Chimie Physique, Laboratoire d'Interaction Laser Matière, France, 2007, DOI: 10.1063/1.2437140.
- [9] Y. Fujikawa, T. Sakurai, and R. M. Tromp. "Surface plasmon microscopy using an energy-filtered low energy electron microscope". In: Physical review letters 100.12 (2008), ISSN: 0031-9007. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.126803.

# Table des illustrations :

Figure 1 : schéma descriptive de projet HREELM, qui combine la résolution spectroscopique de HREELS, et l'impereire de LEEM en un coul instrument. L'instrument HREELN
nécessite une source d'électrons monochromatique, avec un four à césium produisant un faisceau atomique ionisé par des lasers. [2]
Figure 2 : Schéma du principe d'utilisation des ions détectés en corrélation avec les électrons pour améliorer la résolution spectroscopique. [9]
Figure 3 : les positions aléatoires des ions créés avec $\Delta z = 25 \ \mu m$ et volant à 230 eV pouvant être déterminées avec une résolution 3.3 $\mu m$ et avec une précision 150ps le point limitant de la résolution temporelle mais la mauvaise corrélation entre le temps d'arrivée et la position initiale d'électrons.[6]
Figure 4 : Schéma du principe d'utilisation des ions détectés en corrélation avec les électrons pour mettre en lumière des mesures de Tof en mode continu, on suppose ici la position de départ Z connue Pour connaitre le temps de départ de l'électron on utilise le temps de vol t1
Figure 5 : Les résultats de simulation, la position de départ des électrons en fonction le temps d'arrivé des ions avec une résolution temporelle $\sim 1.12 ns$
Figure 6 : Montage de HREELM.0
Figure 7 : Schéma 3D de la chambre mu métal à deux fois avec une rotation 90° qui représente toutes les brides
Figure 8 : Dessin 3D de la pièce qui maintient les électrodes. Les axes des lasers qui sont représenté par des flèches cylindriques colorées. L'axe blanc des électrons et des ions de césium. Les 8 électrodes reposent sur des marches de la pièce blanche qui est en matériau isolant. 10
Figure 9 : Niveaux fondamental et excités du Césium [1]
Figure 10 : Montage optique du laser MOGLabs avec un faisceau bien aligné jusqu'au Fabry-pero et à la fibre optique
Figure 11 : Mode laser injecté dans un TA et collimaté, représenté dans le plan horizontal e vertical.[6] <sup>1</sup>
Figure 12 : Monture pour diode TA conçue. Elle est composée de trois blocs en cuivre découpé

dans la masse : une base en cuivre et deux blocs face avant et face arrière.[6]......14

Figure 13: Coupe planaire de la simulation dans le plan OXY15
Figure 14 : Zoom sur les électrodes dans la figure 116
Figure 15 : coupe planaire des 4 électrodes qui sont les responsables sur l'ionisation avec les lignes du champ et du potentiel16
Figure 16: Résultats de simulation qui montre l'impact des électrodes V7 et V9 sur le temps de vol (Tof) d'ions avec une position initiale stable d'ion
Figure 17: Résultats de la simulation qui représente l'optimisation de la résolution temporelle des ions en fonction les tensions de V7 et V9
Figure 18 : Les résultats de la simulation qui représente 6 courbes correspondant aux vitesses du faisceau de césium neutre (200,210,220,230,240 et 250 m/s), (a) le dessin de la simulation avec une vitesse de césium neutre qui est parallèle avec les ions de césium créés, 19