

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ  
PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité :

Ecole doctorale de rattachement

**RAPPORT**

**(Ce document doit être transmis au responsable de la commission de thèses)**

De M. : Antoine Browaeys

Qualité : CR1 CNRS

Lieu d'exercice : Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Palaiseau

**Sur la thèse présentée par**

M. : Gaël Reinaudi

Ayant pour sujet : « Manipulation et refroidissement par évaporation forcée d'ensembles atomiques ultra-froids pour la production d'un jet intense dans le régime de dégénérescence quantique : vers l'obtention d'un laser à atomes continu »

Rapport : La thèse de Gaël Reinaudi porte sur des expériences de manipulations et de caractérisations d'un jet dense d'atomes de rubidium. Le but de ce projet est l'obtention d'un jet dans le régime de dégénérescence quantique, qui présente certaines analogies avec un laser en optique. L'obtention d'un « laser à

atomes » est un but poursuivi par de nombreux groupes dans le monde. La technique adoptée est la même que celle utilisée pour condenser des nuages d'atomes piégés à trois dimensions. Il s'agit de l'évaporation forcée des atomes les plus énergétiques suivie de la thermalisation du gaz sous l'action des collisions élastiques entre les atomes restants. Comme pour toutes les expériences sur les gaz dégénérés, les conditions initiales (densité et température) sont critiques. Le paramètre crucial est le taux de collisions élastiques initiales. Tous les efforts de Gaël Reinaudi ont visé à rendre ce taux le plus élevé possible afin que les atomes puissent subir suffisamment de collision pendant leur traversée du dispositif expérimental pour atteindre la condensation. A ce jour, il manque toujours un ordre de grandeur sur ce taux pour espérer atteindre la condensation. Toutefois, Gaël Reinaudi a obtenu au cours de sa thèse un condensat dans un piège dipolaire croisé, en partant du piège magnéto-optique servant à injecter les atomes froids dans le guide atomique. Bien que ce résultat ne soit qu'évoqué dans le manuscrit de thèse, il doit être mis au crédit du candidat et constitue un résultat important.

Le manuscrit est divisé en trois parties, chacun contenant deux chapitres.

Après une brève introduction permettant de situer son travail dans le contexte des « lasers à atomes », Gaël Reinaudi décrit dans le premier chapitre le dispositif expérimental, en particulier le guide magnétique. Il caractérise ensuite le jet en mesurant son absorption, ce qui conduit à la vitesse du jet, la dispersion en vitesse et la densité linéique. Il décrit en particulier une technique de spectroscopie radio-fréquence permettant de remonter à la température transverse du jet. Bien que largement éprouvée par de nombreux groupes, sous différentes formes, et dans le cas de nuage piégés, il me semble que cette technique est utilisée ici pour la première fois sur un jet. En utilisant la radio-fréquence, Gaël Reinaudi parvient à évaporer de façon forcée le jet et à gagner un ordre de grandeur sur l'espace des phases à une particule. La conclusion du chapitre montre que le taux de collisions élastiques est insuffisant pour aller au-delà. Les quatre chapitres suivants décrivent différents outils visant à augmenter le nombre de collisions élastiques subies par un atome.

Le deuxième chapitre propose et démontre l'évaporation du jet par contact sur une paroi matérielle, comme cela a été effectué par le groupe de E. Cornell aux USA il y a quelques années dans le cas d'un nuage piégé à trois dimensions. Le principe consiste à approcher les atomes d'une surface afin que les atomes les plus éloignés de l'axe, et donc les plus énergétiques, se collent sur la surface. Gaël Reinaudi décrit la déviation du jet proche de la surface et mesure un gain dans l'espace des phases d'environ 1,5 après évaporation sur une seule surface. Il compare ces résultats à des simulations numériques, en bon accord. C'est la première fois que cette technique est utilisée sur un jet.

Le troisième chapitre démontre le ralentissement du jet atomique sur un miroir magnétique mobile obtenu par déplacement d'un aimant permanent. Cette technique, s'apparentant au refroidissement stochastique, permet de retirer environ 96% de l'énergie cinétique des atomes. De ce fait les atomes mettent plus longtemps pour atteindre l'extrémité du guide et donc subissent plus de collisions élastiques. Par ailleurs, le miroir permet d'augmenter la densité dans l'espace des phases du jet lorsque plusieurs paquets atomiques sont envoyés dans le guide et se recouvrent. Le chapitre se conclut par une discussion subtile sur l'action de ce miroir mobile comme démon de Maxwell. Ce chapitre comprend de nombreuses considérations théoriques sur l'optimisation des paramètres des miroirs. Tous les tests expérimentaux ne sont toutefois pas présentés, en particulier ceux sur la densité dans l'espace des phases.

Le quatrième chapitre porte sur le piégeage des paquets atomiques dans des pièges magnétiques mobiles, permettant de conserver le confinement élevé nécessaire pour obtenir un taux de collisions élastiques important. Cette méthode lutte donc contre la dilution du jet par recouvrement des paquets. Gaël Reinaudi analyse en détail, expérimentalement mais surtout par des simulations, le chargement du train de pièges magnétiques. En particulier, il faut assurer une bonne synchronisation entre l'injection des paquets et la vitesse des pièges pour éviter le chauffage des paquets autant que possible. Le chapitre se termine par la description de l'évaporation forcée des atomes dans le train de piège, qui permet de gagner un facteur deux dans l'espace des phases.

Dans le cinquième chapitre, Gaël Reinaudi présente le chargement du piège magnéto-optique servant de source d'atomes froids pour le guide dans un piège dipolaire. Le piège est ensuite déplacé et permet de charger efficacement le guide magnétique. Le piège dipolaire est produit par un laser de 300 W. Le chapitre contient un descriptif des précautions à prendre pour manipuler une telle puissance et caractérise expérimentalement et théoriquement le piège. La suite du chapitre décrit l'optimisation du déplacement du piège afin d'éviter le chauffage du nuage atomique. L'analyse théorique est faite en analogie avec la diffraction en optique. Quelques chiffres expérimentaux sont donnés pour corroborer la théorie. Une suggestion serait d'introduire dans ce chapitre quelques données expérimentales supplémentaires, en particulier en donnant les taux de chauffage dû au déplacement et quelques exemples de courbes d'oscillation du nuage dans la pince.

Le dernier chapitre présente l'imagerie d'un nuage d'atomes. Ce chapitre est très complet et décrit les différentes techniques d'imagerie traditionnellement utilisées dans le domaine des atomes froids : fluorescence et absorption dans différents régimes. Bien que ces techniques soient répandues, ce chapitre est un

remarquable travail de synthèse sur le sujet, décrivant en particulier les limitations diverses. Le chapitre présente enfin une technique moins répandue d'absorption sur une transition ouverte. La méthode est soigneusement décrite ainsi que sa calibration.

Le manuscrit se termine par cinq annexes techniques contenant les résumés des publications, le théorème de Liouville, la force dipolaire, le ralentissement par la gravité et la modélisation des aimants utilisés pour le miroir magnétique et le train de pièges.

La bibliographie me paraît pour l'essentielle complète, à par quelques oublis de publications anciennes qui abordaient déjà certains aspects du manuscrit. Au regard de l'explosion du nombre de publications dans ce domaine, cela est tout à fait compréhensible.

Le manuscrit est bien écrit et agréable à lire. La présentation graphique est remarquable. Gaël Reinaudi articule agréablement dans son manuscrit expérience et théorie. Il ne semble pas y avoir de zone d'ombre sur les données au vue de l'accord souvent remarquable avec les simulations.

Ce travail de thèse a donné lieu a six publications dans Phys. Rev. A, Optics Letters, EPJD et Europhysics Letters. Deux papiers sont par ailleurs soumis. Ce nombre élevé de publications est assez inhabituel pour une thèse sur les atomes froids.

En conclusion de ce rapport, il faut souligner la difficulté extrême de cette expérience, qui s'étend sur des échelles de temps beaucoup plus longue que la durée d'une thèse. Le travail de thèse de Gaël Reinaudi a mis en place différentes techniques expérimentales qui permettront de construire un dispositif de deuxième génération. Cette expérience est par ailleurs originale, unique et ambitieuse. Elle suscite l'intérêt de la communauté, et à la vue des résultats de cette thèse le dispositif de deuxième génération a de bonne chance d'obtenir le jet condensé.

La qualité du travail de thèse, aussi bien expérimental que théorique, ainsi que le très bon manuscrit auquel il a conduit m'incitent donc à recommander sans aucune restriction la soutenance de cette thèse.