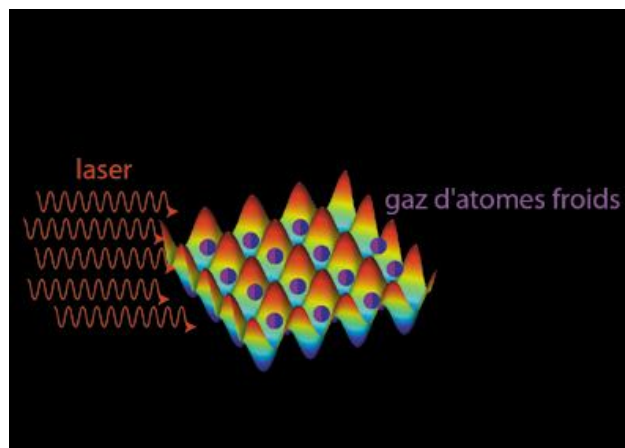


Université de Nice Sophia Antipolis
Licence de physique

Projet tutoré en laboratoire :
**Préparation d'atomes froids dans
un piège magnéto-optique**

Année 2009/2010



Miradji Faoulat

Barnaoui Serine

Ben Abdeljellil Wael

Encadrant : **Mr. Anders Kastberg**

Remerciement

Nous tenons tous d'abord à remercier la direction du Laboratoire de Physique de la Matière Condensée pour nous avoir permis d'effectuer notre stage au sein de l'équipe d'atomes froids.

Nous remercions aussi :

Monsieur Anders Kastberg, notre encadrant de stage, pour sa disponibilité son aide et ses conseils.

Messieurs Kaiser Florian, Martin Anthony et Olivier Alibert, qui grâce à leurs connaissances et compétences techniques sur les différents outils utilisés nous ont permis de bien avancer dans notre expérience.

Madame Valérie Doya pour ses conseils concernant la rédaction du rapport et la création du site web.

Sommaire

INTRODUCTION :	4
I. Cadre de l'expérience :	5
I.1. Généralités sur les atomes de rubidium (Rb) :	5
I.2. Principe et montage expérimental de la spectroscopie d'absorption saturée :	6
I.2.a. Principe :	6
I.2.b. Montage expérimental.....	7
I.3. Stabilisation du laser	8
I.3.a. Recherche du single mode :	8
I.3.b. Recherche de I et T de la résonance	9
I.4. Résultats	9
II. Refroidissement et piégeage magnéto-optiques des atomes	10
II.1. Le Refroidissement d'atomes par Laser.....	10
II.2. Le refroidissement <i>Doppler</i>	10
II.3. Piège magnéto-optique	11
Conclusion :	13
Bibliographies.....	14
Annexe 1	15

INTRODUCTION :

Le refroidissement des atomes par laser est un domaine qui connaît depuis les années 1980 un développement très important [1]. On sait aujourd'hui, grâce à des techniques de plus en plus perfectionnées, refroidir de nombreux atomes à des températures très basse pouvant atteindre jusqu'à l'ordre du nanokelvin (10^{-9}K).

L'étude de l'information quantique, le qubit, représente un des axes de recherche dans le domaine du refroidissement par laser. Il fait actuellement l'objet d'une activité intense aussi bien sur le plan expérimental que théorique.

En effet différentes équipes de recherche se sont orientés vers la conception et la réalisation de systèmes de communication quantique dont les applications sont multiples : la cryptographie, les ordinateurs quantiques ou encore l'échange d'informations sécurisées...

Le groupe d'atomes froids du laboratoire de Physique de la Matière Condensée, dirigée par Monsieur Anders Kastberg s'intéresse à l'étude de mémoires quantiques formées par des atomes de rubidium et de césium refroidis et piégés dans des réseaux optiques qui seront utilisés pour stocker des qubits. L'un de leurs objectifs est d'allonger le temps de stockage de la mémoire quantique.

C'est au sein de cette équipe que nous avons effectué notre stage.

Une grande partie de notre travail a été de mettre en place un montage de spectroscopie d'absorption saturée dont le but était de stabiliser le laser à la fréquence des transitions du rubidium correspondant à une longueur d'onde de 780,241nm.

Le reste de notre travail était plutôt théorique le but était de comprendre le mécanisme de refroidissement Doppler et le principe du piège magnéto optique.

I. Cadre de l'expérience :

Dans ce chapitre nous commencerons par rappeler quelques propriétés des atomes de rubidium. Ensuite nous expliquerons le principe de la spectroscopie d'absorption saturée ainsi que son montage expérimental. Finalement nous présenterons les étapes qui nous ont permis de stabiliser le laser.

I.1. Généralités sur les atomes de rubidium (Rb) :

Les atomes de Rb sont des atomes alcalins possédant un électron célibataire sur la couche électronique externe. Leur schéma d'énergie peut se rapprocher de celui de l'hydrogène. La cellule que nous avons utilisée dans l'expérience contient de la vapeur de Rb et quelques grains de cet atome. Il y a plus précisément 72% de ^{85}Rb et 28% de ^{87}Rb .

La structure des niveaux concernés par la transition pour ces deux isotopes est rappelée sur la figure 1.

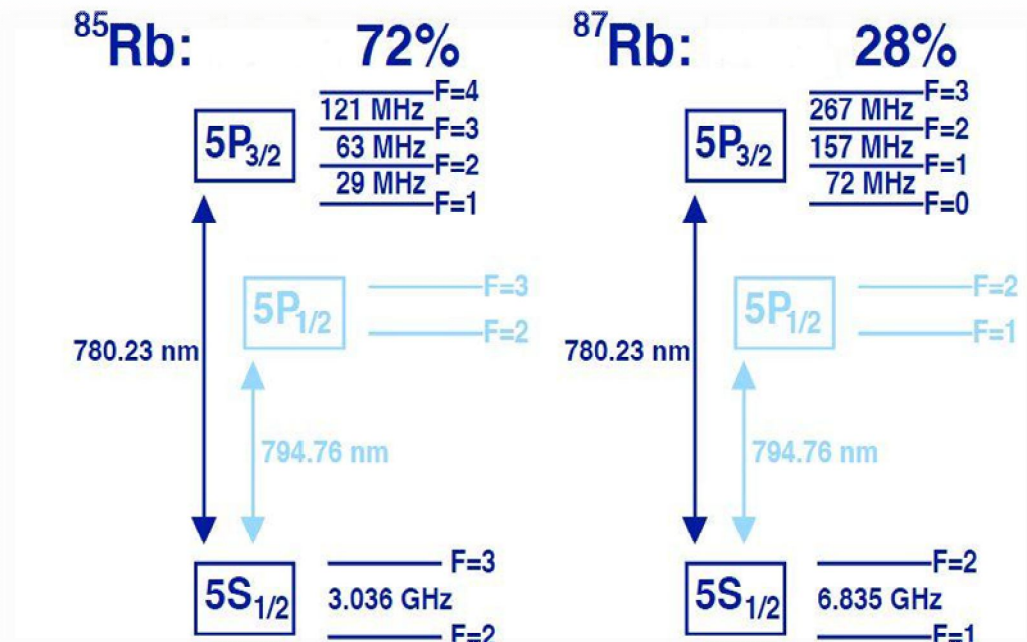


Figure 1 : Diagramme des niveaux d'énergies hyperfins pour le ^{85}Rb et le ^{87}Rb [2]

I.2. Principe et montage expérimental de la spectroscopie d'absorption saturée :

I.2.a. Principe :

Les transitions hyperfines du Rb qui nous intéressent sont très proches en énergie et ne peuvent être résolues en raison de la grande largeur Doppler qui est donnée par la formule suivante : $\Delta\nu \approx 2.35 \cdot \sqrt{kT\nu_0^2/mc^2}$, k étant la constante de Boltzmann et c la célérité de la lumière dans le vide. [3]

Si on considère un atome de rubidium de masse $m=1.42 \times 10^{-25}$ kg, à une température de 300K, on a $\Delta\nu \approx 0,5$ GHz, ce qui est très supérieur devant la largeur naturelle de la raie D2 ($5s^2S_{1/2} \rightarrow 5p^3P_{1/2}$) du Rb ($\frac{\Gamma}{2\pi} \approx 6$ MHz).

Afin de s'affranchir de l'élargissement par effet Doppler nous avons utilisé la spectroscopie d'absorption saturée. Cette technique consiste à superposer deux faisceaux contrapropageants de même fréquence ν dans une cellule remplie du gaz à analyser. L'un des faisceaux dit pompe (p), est plus intense que l'autre dit sonde (s).

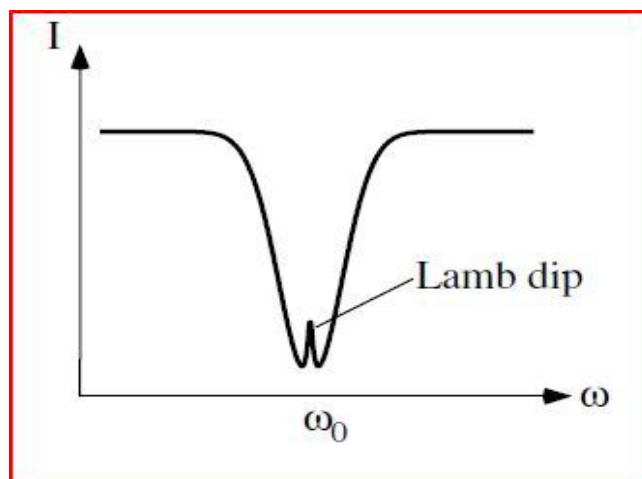


Figure 2 : spectre de transmission [4]

Si les faisceaux s et p sont accordés à la résonance ($\nu=\nu_0$), ils vont alors interagir avec les atomes de même classe de vitesse nulle. Et lorsque p est suffisamment intense il va saturer la transition : c'est-à-dire le nombre d'atomes dans l'état excité décroît au détriment du nombre dans l'état fondamental jusqu'à ce que les populations soient

équipées et dans ce cas le faisceau s n'est plus absorbé. Sur la courbe d'absorption (voir figure 2), on voit un creux appelé « Lamb dip » qui n'est du qu'à la seul classe de vitesse nulle. On peut ainsi déterminer la fréquence de transition ν_0 qui n'est plus limitée par l'élargissement Doppler mais par sa largeur naturelle Γ . [4] [5]

I.2.b. Montage expérimental

Le montage expérimental mis en place pour la réalisation de la spectroscopie d'absorption saturée est illustré sur la figure suivante :

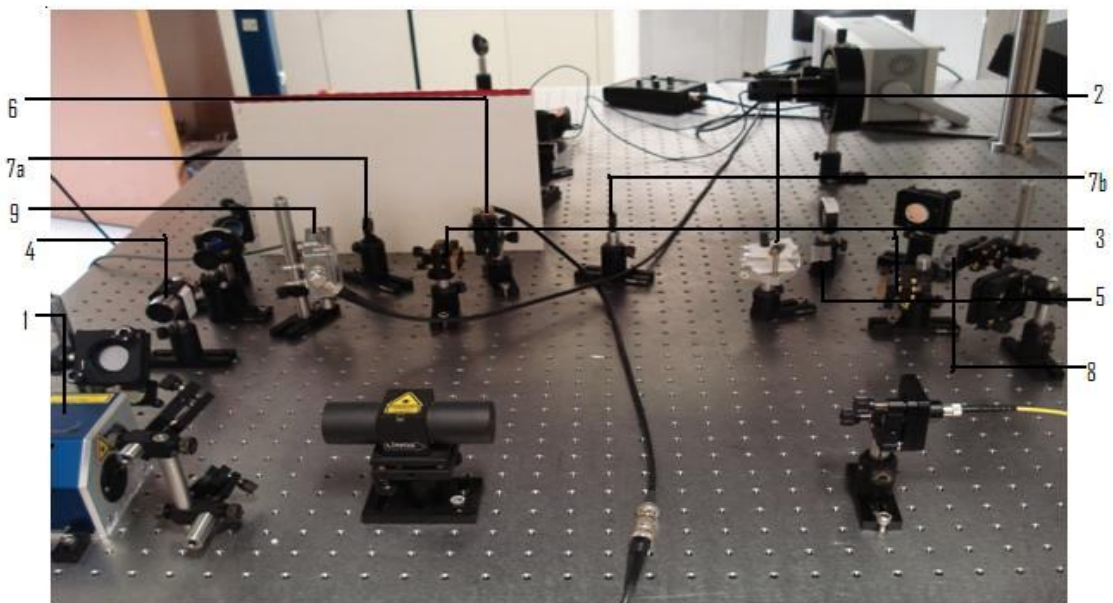


Figure 3 : Montage expérimental pour la spectroscopie d'absorption saturée

Les éléments qui le composent sont :

- 1) un laser Toptica Photonics Modèle DLX110, Bandwidth=1MHz.
- 2) une cellule de rubidium.
- 3) miroirs : ils permettent d'ajuster la direction des faisceaux pompes et sondes de façon parallèle.
- 4) isolateur optique : pour protéger le laser et éviter les feedbacks optiques c'est-à-dire le retour du faisceau laser en sens inverse.
- 5) lentilles de focales $F=300$ mm, elles permettent la réduction du diamètre du faisceau.

6) un modulateur acousto-optique (MAO) il permet de moduler la fréquence et l'intensité du faisceau incident.

7) diaphragmes a : pour vérifier l'alignement du faisceau,

b: il sert à isoler l'ordre 1 du faisceau diffracté provenant du MAO.

8) lame séparatrice : elle sépare le faisceau incident en 4% de faisceau s et 96% de faisceau p environ.

9) un détecteur (photodiode) : il détecte le signal du faisceau sonde.

Ce montage va nous permettre de stabiliser le laser.

I.3. Stabilisation du laser

La fréquence de rayonnement laser peut être ajustée suivant trois paramètres :

La position de l'angle du réseau situé dans le boîtier de la diode laser, le courant injecté dans la diode et la température.

Pour stabiliser le laser à la fréquence des transitions du rubidium on a d'abord cherché un seul mode d'émission du laser.

I.3.a. Recherche du single mode :

Le laser balaie initialement plusieurs modes correspondants à différentes longueurs d'ondes. Pour avoir un seul mode on a utilisé un étalon Fabry Péro¹ (voir annexe 1) qui permet d'ajouter des pertes aux autres modes.

Après avoir ajustée les vis de réglages de la cavité F. P., on obtient sur l'oscilloscope des pics très étroits espacés de 1,6 GHz. C'est le single mode.

Une fois que le laser est monomode, nous avons cherché la température et l'intensité correspondant à la résonance du rubidium.

¹ Un étalon Fabry-Pérot est composé de deux miroirs semi-réfléchissants parallèles. Un rayon incident sur la cavité FP subit de multiples réflexions par les deux miroirs. Pour un étalon à longueur fixée seul un nombre discret de longueur d'onde seront en interférence constructive et seront transmises par l'étalon.

I.3.b. Recherche de I et T de la résonance

On fait varier la température et le courant et on lit sur le spectromètre (voir annexe 1) la longueur d'onde du laser correspondante. Le but étant de se rapprocher au maximum de la longueur de transition du rubidium ($\lambda=780,241$ nm dans le vide).

Lorsque le laser balaie une fréquence correspondant à celle de la transition du rubidium, la cellule émet dans l'infrarouge une lumière intense qui résulte de l'absorption et de l'émission de photons par les atomes de rubidium.

I.4. Résultats

On a pu obtenir la résonance pour une température égale à 22.4°C et un courant d'intensité 2000 mA environ. En observant sur l'oscilloscope le signal du faisceau sonde détecté par la photodiode on aurait du obtenir 4 pics correspondant à la transition entre les niveaux $5s^2S_{1/2}$ et $5p^3P_{1/2}$ dont deux pour le ^{85}Rb et deux pour le ^{87}Rb (voir figure 4).

Le laser ainsi stabilisé va être asservi à la résonance pour être par la suite utilisé dans le refroidissement et le piégeage des atomes.

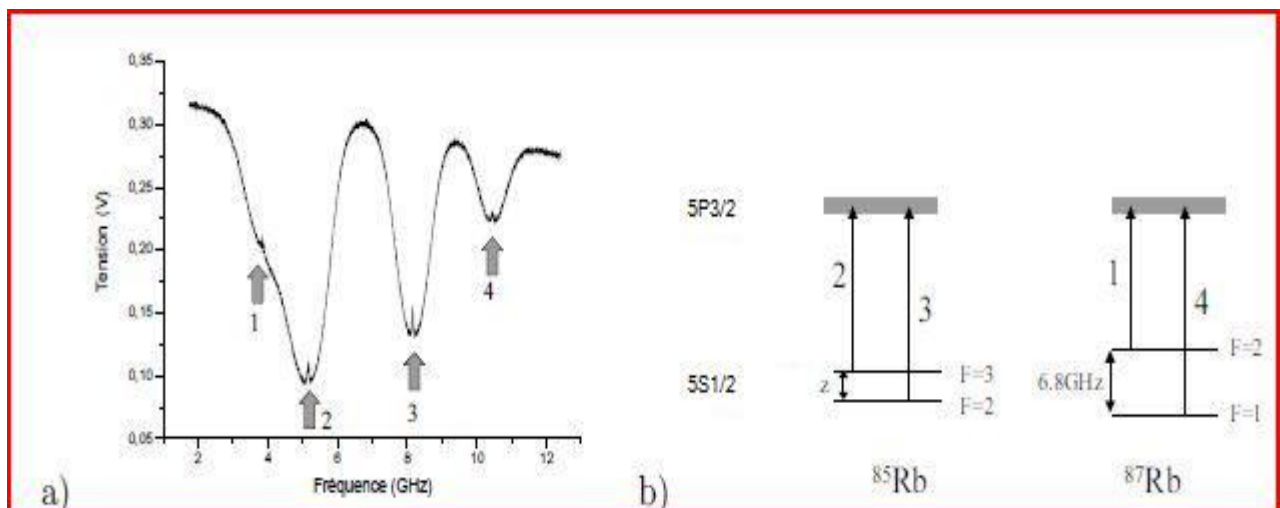


Figure 4: a) Spectre d'absorption saturée de la transition $5s^2S_{1/2} \rightarrow 5p^3P_{1/2}$ b) Attribution des pics. [4]

II. Refroidissement et piégeage magnéto-optiques des atomes

Le laser est souvent associé à l'idée de chaleur, puisqu'il permet de souder, de découper, voire même de détruire... Et pourtant, on sait depuis quelques années utiliser la pureté de la lumière laser pour refroidir des gaz à des températures extrêmement basses.

Nous verrons tout d'abord le principe du refroidissement par laser ensuite nous aborderons une des techniques de refroidissement le refroidissement Doppler et enfin nous verrons comment maintenir les atomes refroidis immobiles grâce à un piège magnéto-optique (PMO).

II.1. Le Refroidissement d'atomes par Laser

Le principe du refroidissement laser repose sur le fait qu'une lumière résonante peut exercer une force énorme sur un atome, jusqu'à 50000 fois la gravité, et sur le fait que cette force dépend de la vitesse de l'atome.

Refroidir des atomes, c'est diminuer leurs agitation thermique en diminuant les fluctuations de la vitesse autour de la vitesse moyenne. Ainsi un atome décéléré est donc un atome refroidi.

Pour répondre à cette exigence expérimentale (obtenir des atomes ultra froids), plusieurs mécanismes de refroidissement sont mises en place. Le plus élémentaire d'entre eux est celui de Doppler. [1] [6]

II.2. Le refroidissement *Doppler*

Si on se place dans une configuration à une dimension, l'atome de fréquence de résonance ν_0 , est soumis à deux ondes laser de fréquence apparente ν inférieure à la fréquence de résonance atomique qui sont dans des sens de propagations opposées (voir figure5) ; si cet atome bouge, la fréquence de l'onde qui vient à sa rencontre lui paraît, par effet Doppler, rapprochée de la résonance. Au contraire' si l'on se déplace dans le même sens que l'onde, la fréquence apparente est abaissée. Les photons sont donc plus facilement absorbés. [1]

L'atome absorbe des photons du laser et les réémet ensuite dans toutes les directions. Chaque photon absorbé transmet une impulsion élémentaire à l'atome dans la direction et le sens de propagation du faisceau laser (dans le sens opposé du déplacement de l'atome). Il en résulte que les atomes se déplaçant à l'opposé du faisceau laser subissent une force de freinage et sont donc progressivement décélérés suivant la direction du faisceau.

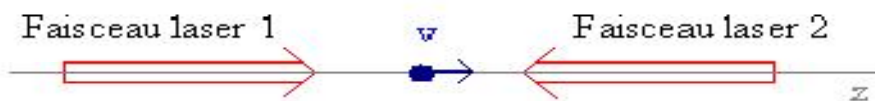


Figure 5: Ralentiement d'un atome par effet Doppler

Si on généralise la configuration de la figure 5 à trois dimensions en disposant de trois paires de faisceaux laser pour chacune des trois directions de l'espace on obtient ce qu'on appelle une "mélasse optique" : il s'agit en effet d'un milieu visqueux dans lequel les atomes se trouvent ralentis et on peut atteindre de cette manière des températures de l'ordre de 100 microkelvins (10^{-4}).

Une fois les atomes refroidis on les maintient dans cet état grâce à un piège magnéto-optique.

II.3. Piège magnéto-optique

La force de friction subie par un atome dans une mélasse optique n'est qu'une force moyenne ; à cause de ses fluctuations (dus aux absorptions et émissions successives de photons), chaque atome effectue un mouvement erratique et finit par s'échapper de la mélasse optique au bout de quelques secondes.

Pour allonger le temps de confinement, on superpose à la mélasse optique un champ magnétique statique inhomogène produit par deux bobines parcourues par des courants de sens opposés et nul au centre de la mélasse. Son intensité augmente dès que l'on s'écarte de ce point central et, en deux points symétriques par rapport au centre, les champs ont des sens opposés.

Ce champ magnétique crée un déséquilibre entre les pressions de radiation exercées par les faisceaux lasers sur un atome écarté du centre (la force de pression de radiation est en tout point dirigée vers l'intérieur de la mélasse), ce qui engendre alors, en plus de la force de friction, une force de rappel tendant à ramener les atomes vers l'intérieur de la mélasse.

Par ailleurs ce champ magnétique inhomogène va permettre de maintenir les atomes du gaz en lévitation au centre d'une enceinte où règne un vide très poussé (10^{-9} torr).

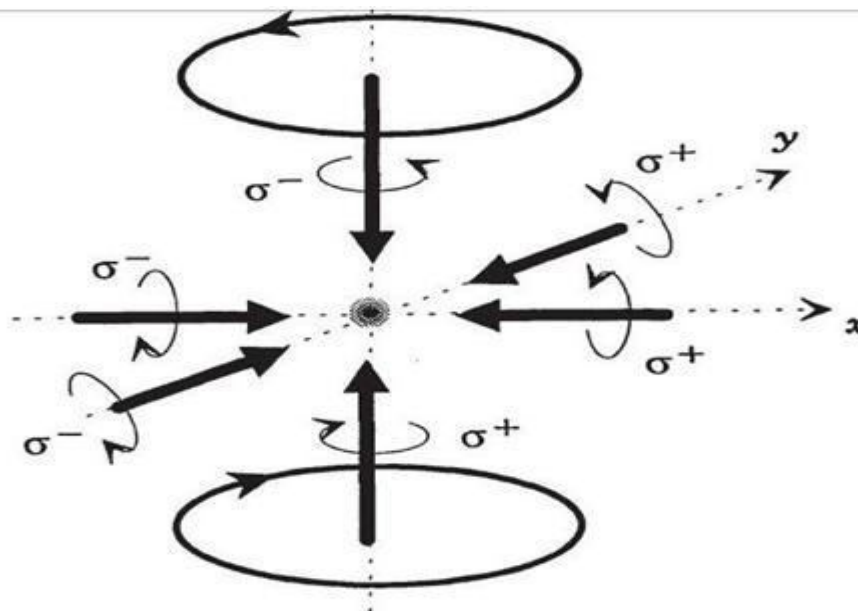


Figure 6 Principe d'un PMO : Un piège magnéto – optique utilise un système de trois paires de faisceaux laser contra propageant disposées dans les trois directions de l'espace et combinées à un gradient de champ magnétique généré par deux bobines en configuration anti – Helmholtz (cette configuration diffère de la configuration Helmholtz par le fait que les courants des bobines sont inversés). [6]

➡ Les atomes ainsi refroidis et piégés sont répartis dans ce qu'on appelle un réseau optique [7]. Ce réseaux obtenu à l'aide de plusieurs lasers ressemble à un réseau

cristallin possédant des sites .Et si l'on représente ce qui se passe en terme d'énergie on voit une série périodique de puits formant la géométrie d'un carton d'œufs (voir couverture).

Conclusion :

Le stage que nous avons effectué au LPMC nous a permis d'explorer différents aspects de la physique expérimentale. En effet, en ayant pour objectif de stabiliser le laser à la fréquence de résonance du Rb, nous avons pu nous familiariser avec l'alignement de montages optiques et la manipulation de certains appareillages (laser, cavité Fabry Pérot, spectromètre...).

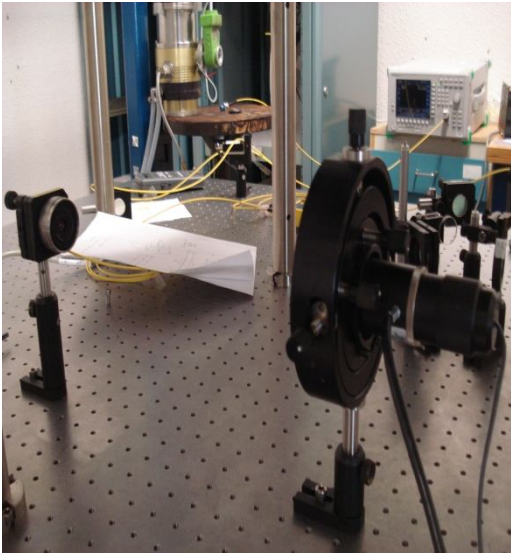
Ce stage a été aussi l'occasion de découvrir d'une part un domaine de recherche qui nous était totalement inconnu le refroidissement d'atomes par laser et de découvrir d'autre par la vie en laboratoire et le travail en équipe.

Par ailleurs nous espérons avoir contribué à faire avancer l'équipe de recherche sur le projet.

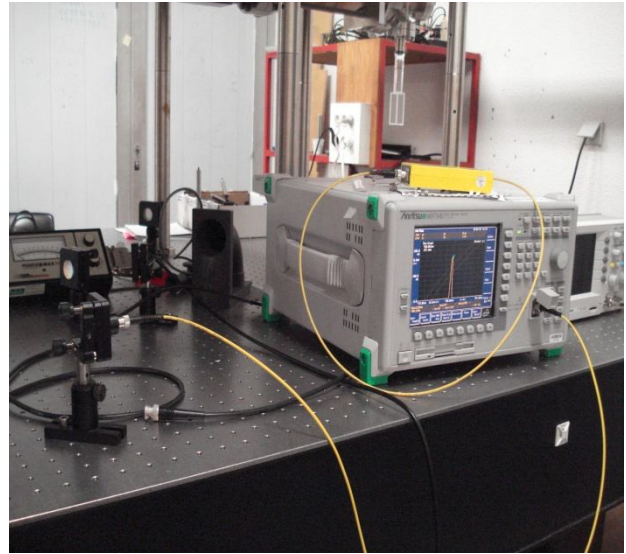
Bibliographies

- [1] <http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/tutorial/index2.htm>, site internet crée par l'équipe d'atomes froids du Laboratoire Kastler Brossel, 1999.
- [2] Javier M. G. Duarte and Sara L. Campbel, *Measurement of The Hyperfine Structure of Rubidium 85 and 87*, Mars, 2009.
- [3] Equipe enseignante de Paris 6 et Paris 7, Travaux Pratique Spectroscopie du Rubidium par Absorption Saturée 2006/2007.
- [4] Christine Guerlin, Nouveau schéma d'excitation des atomes de Rydberg, stage DEA, 2004.
- [5] Claude Fabre, *Introduction aux lasers et à l'optique quantique*, édition Ellipse, p246 et p263.
- [6] Jérémy Blicq, Couplage entre un piège magnéto-optique et un spectromètre d'impulsion d'ions de recul ; application aux ions-atomes, thèse, Université de Caen, 2008.
- [7] David Guéry-Odelin et Jean Dalibard, Atomes froids et condensat quantiques, p33, 2006.
- Image de couverture, <http://homepages.ulb.ac.be/~ngoldman/Site/News.html>, Nathan Goldman, 2009.

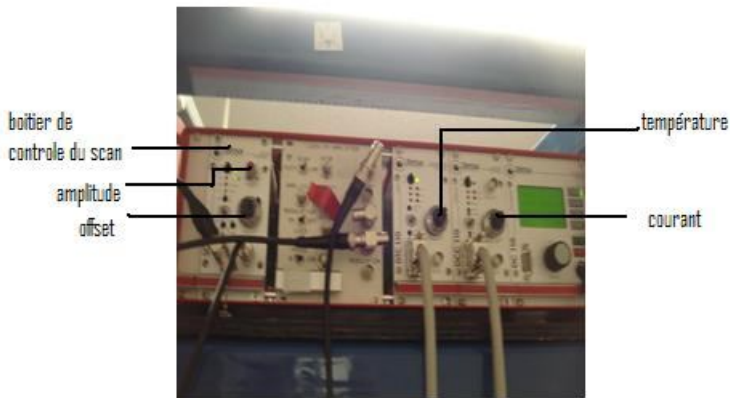
Annexe 1



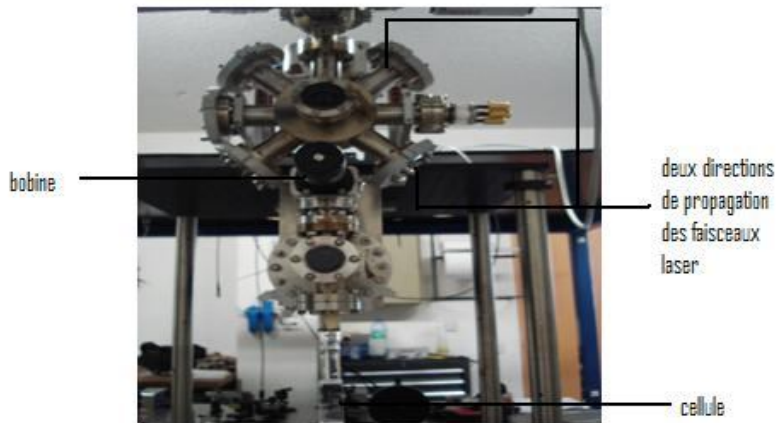
Cavité Fabry Péro



Spectromètre



Contrôle des paramètres du laser



piège magnéto-optique