

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE  
LABORATOIRE KASTLER BROSSEL

THÈSE DE DOCTORAT  
DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE  
Spécialité : **PHYSIQUE QUANTIQUE**

# Atomes de Rydberg circulaires piégés

présentée par

**Tigrane Cantat-Moltrecht**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE**

Soutenue le décembre 2017 devant le jury composé de :

|                  |                    |
|------------------|--------------------|
| Dr. Michel BRUNE | Directeur de thèse |
| Dr. ??           | Rapporteur         |
| Pr. ??           | Rapporteur         |
| Dr. ??           | Examinateur        |
| Pr. ??           | Examinateur        |
| Pr. ??           | Examinateur        |



*To ???*



# Table des matières

|   |            |
|---|------------|
| <b>Table des figures</b>  | <b>v</b>   |
| <b>Liste des tableaux</b>   | <b>vii</b> |
| <b>Introduction</b>   | <b>1</b>   |
| <b>I Atomes de Rydberg alcalins en interaction</b>  | <b>3</b>   |
| I.1 Les atomes de Rydberg alcalins : des hydrogénoides géants . . . . .                                 | 4          |
| I.1.1 Hamiltonien de l'atome de Rydberg et défaut quantique . . . . .                                   | 5          |
| I.1.2 Partie radiale de la fonction d'onde et calcul du dipôle de transition                            | 6          |
| I.1.3 L'effet Stark . . . . .   | 7          |
| I.1.4 Temps de vie des niveaux de Rydberg . . . . .   | 9          |
| I.2 Les niveaux de Rydberg circulaires . . . . .  | 11         |
| I.2.1 La base des états paraboliques . . . . .  | 11         |
| I.2.2 Le niveau de Rydberg 50C : $ n = 50, l = 49, m_l = 49\rangle$ . . . . .                           | 15         |
| I.3 Atomes de Rydberg en interaction . . . . .  | 17         |
| I.3.1 Deux atomes de Rydberg qui se parlent . . . . .   | 17         |
| I.3.2 Deux atomes dans le même niveau de Rydberg . . . . .  | 19         |
| I.3.3 Deux atomes dans des niveaux de Rydberg différents . . . . .                                      | 20         |
| I.3.4 Les interactions dipolaires du niveau 60S . . . . .   | 21         |
| I.3.5 Les interactions dipolaires du niveau 50C . . . . .   | 22         |
| <b>II Des atomes de Rydberg froids en environnement cryogénique</b>                                     | <b>27</b>  |
| II.1 Un nuage d'atomes ultra-froids sur puce, du MOT de capture au condensat de Bose-Einstein . . . . . | 28         |
| II.1.1 L'environnement cryogénique : cryostat et puce à atomes supraconductrice . . . . .               | 28         |
| II.1.2 Séquence de piégeage et refroidissement . . . . .  | 34         |
| II.1.3 Imagerie atomique par absorption . . . . .   | 39         |
| II.1.4 Quelques nuages typiques . . . . .   | 44         |
| II.2 Excitation et détection d'atomes de Rydberg près d'une puce . . . . .                              | 45         |
| II.2.1 L'excitation à deux photons des atomes de Rydberg . . . . .                                      | 46         |
| II.2.2 La détection par ionisation des atomes de Rydberg . . . . .                                      | 48         |
| II.2.3 Les champs électriques parasites, défi des atomes de Rydberg sur puce . . . . .                  | 50         |
| II.2.4 Contrôle du champ électrique perpendiculaire à la puce . . . . .                                 | 51         |
| II.2.5 Manipulation cohérente des états de Rydberg . . . . .  | 54         |

|   |           |
|---|-----------|
| II.2.6 Temps de vie des atomes de Rydberg et température effective . . . . .              | 56        |
| <b>III Interaction entre atomes de Rydberg sphériques et excitation de gaz dense</b>      | <b>59</b> |
| III.1 Les effets de l'interaction dipolaire en nuage dense . . . . .                      | 59        |
| III.1.1 Rappels sur l'interaction dipolaire . . . . .                                     | 59        |
| III.1.2 Mouvement des atomes au sein d'un gaz dense de Rydberg . . . . .                  | 60        |
| III.1.3 Deux régimes d'excitation en interaction dipolaire forte . . . . .                | 61        |
| III.2 Observation expérimentale des interactions . . . . .                                | 64        |
| III.2.1 Spectroscopie optique du nuage : différents régimes d'excitation .                | 64        |
| III.2.2 Spectroscopie microonde : une sonde pour l'énergie d'interaction                  | 67        |
| III.3 Premier modèle numérique et accord qualitatif . . . . .                             | 73        |
| III.3.1 Au cœur du modèle numérique . . . . .   | 74        |
| III.3.2 Comparaison aux spectres microonde expérimentaux . . . . .                        | 75        |
| III.3.3 La limite du modèle : l'absence de temps . . . . .                                | 76        |
| III.4 Raffinement du modèle de la dynamique d'excitation . . . . .                        | 78        |
| III.4.1 Simulations . . . . .   | 78        |
| III.4.2 Les limites du modèle . . . . .   | 78        |
| <b>IV Les atomes de Rydberg circulaires en interaction : vers un simulateur quantique</b> | <b>79</b> |
| <b>V Des atomes de Rydberg circulaires sur puce</b>                                       | <b>81</b> |
| V.1 Modifications du dispositif expérimental . . . . .                                    | 81        |
| V.1.1 Contrôle du champ perpendiculaire à la puce . . . . .                               | 81        |
| V.1.2 Contrôle du champ parallèle à la puce . . . . .                                     | 82        |
| V.2 Comment exciter des atomes de Rydberg circulaires . . . . .                           | 86        |
| V.2.1 Les niveaux atomiques du fondamental au Rydberg circulaire .                        | 86        |
| V.2.2 Spectroscopie 5s-50d . . . . .  | 86        |
| V.2.3 Spectroscopie 50d-50f . . . . .   | 87        |
| V.3 Comment caractériser les atomes de Rydberg circulaires . . . . .                      | 87        |
| V.3.1 Spectroscopie microonde vers les niveaux voisins . . . . .                          | 87        |
| V.3.2 Temps de vie . . . . .  | 87        |
| V.3.3 Temps de cohérence . . . . .  | 87        |
| V.4 Éjectable : Première évidence du piégeage des atomes circulaires . . .                | 87        |
| V.4.1 Dispositif laser de piégeage . . . . .  | 87        |
| V.4.2 Comment observer le piégeage des atomes circulaires . . . . .                       | 87        |
| <b>Conclusion</b>   | <b>89</b> |
| <b>A Système de lock</b>  | <b>93</b> |

# Table des figures

|       |  |    |
|-------|--|----|
| I.1   | Fonction d'onde du niveau nS . . . . .   | 7  |
| I.2   | Diagramme Stark autour du niveau 60S . . . . .                                     | 8  |
| I.3   | Coefficients d'Einstein de 60S vers $nP_j, j \in 1/2, 3/2$ . . . . .               | 11 |
| I.4   | Échelle des niveaux paraboliques $ n, m_1, m_2\rangle$ . . . . .                   | 13 |
| I.5   | Échelle des niveaux paraboliques $ n, m, k\rangle$ . . . . .                       | 14 |
| I.6   | Fonction d'onde du niveau nC . . . . .   | 14 |
| I.7   | Échelle des niveaux paraboliques $ n, m, k\rangle$ . . . . .                       | 15 |
| I.8   | Schéma de niveaux 50C-49C . . . . .  | 16 |
| I.9   | Durée de vie du niveau 50C . . . . .   | 17 |
| I.10  | Couplage dipolaire entre mêmes niveaux de Rydberg . . . . .                        | 19 |
| I.11  | Couplage dipolaire entre niveaux de Rydberg différents . . . . .                   | 21 |
| I.12  | Interaction dipolaire 60S-60S . . . . .  | 22 |
| I.13  | Interaction dipolaire 60S-60P <sub>3/2</sub> . . . . .                             | 23 |
| I.14  | Deux atomes circulaires côte à côte . . . . .                                      | 24 |
| I.15  | Interaction dipolaire 50C-50C . . . . .  | 24 |
| II.1  | Schéma du cryostat . . . . .   | 29 |
| II.2  | Schéma de la puce à atomes supraconductrice . . . . .                              | 31 |
| II.3  | Champs magnétiques créés par la puce . . . . .                                     | 32 |
| II.4  | Schéma de principe du MOT miroir . . . . .   | 33 |
| II.5  | Séquence expérimentale typique . . . . .   | 35 |
| II.6  | Raie D2 du <sup>87</sup> Rb . . . . .  | 36 |
| II.7  | Schéma du 2D-MOT . . . . .   | 37 |
| II.8  | Refroidissement évaporatif RF . . . . .  | 38 |
| II.9  | Condensat de Bose-Einstein sur puce . . . . .                                      | 39 |
| II.10 | Faisceaux sonde . . . . .  | 40 |
| II.11 | Image par absorption du nuage par la sonde côté . . . . .                          | 41 |
| II.12 | Effet de l'algorithme de réduction des franges . . . . .                           | 43 |
| II.13 | Absorption « no-log » . . . . .  | 44 |
| II.14 | Estimation de la température d'un nuage par temps de vol . . . . .                 | 45 |
| II.15 | Excitation du niveau 60S . . . . .   | 46 |
| II.16 | Faisceaux laser pour l'excitation des Rydberg . . . . .                            | 48 |
| II.17 | Système de détection des atomes de Rydberg . . . . .                               | 48 |
| II.18 | Détection sélective des niveaux 60S <sub>1/2</sub> et 57S <sub>1/2</sub> . . . . . | 49 |
| II.19 | Spectres d'excitation laser 5S-60S avant le dépôt de rubidium sur la puce          | 50 |
| II.20 | Dépôt contrôlé de rubidium sur la puce . . . . .                                   | 52 |

|  |    |
|--|----|
| II.21 Spectres d'excitations laser 5S-60S avant et après le dépôt de rubidium sur la puce . . . . .      | 52 |
| II.22 Premier circuit de contrôle de la tension des électrodes d'ionisation . . . . .                    | 53 |
| II.23 Spectroscopie de la transition 60S-61S . . . . .   | 54 |
| II.24 Écho de spin 60S-61S . . . . .   | 55 |
| II.25 Durée de vie du niveau 60S . . . . .   | 57 |
| <br>   |    |
| III.1 Ensemble de $N$ atomes de Rydberg en interaction Van der Waals . . . . .                           | 60 |
| III.2 Mécanisme du blocage dipolaire . . . . .   | 62 |
| III.3 Mécanisme de d'excitation facilitée . . . . .  | 64 |
| III.4 Spectres optiques d'excitation en régime d'interaction dipolaire forte . . . . .                   | 66 |
| III.5 Saturation de l'excitation optique en régime d'interaction dipolaire forte . . . . .               | 67 |
| III.6 Structure de niveau 60S-nS sous interaction dipolaire . . . . .                                    | 68 |
| III.7 Structure de niveaux d'un nuage de 60S contenant une excitation 57S . . . . .                      | 70 |
| III.8 Spectroscopie microonde du nuage avec expansion . . . . .  | 71 |
| III.9 Formation d'un agrégat de Rydberg et accumulation de l'énergie d'interaction . . . . .             | 72 |
| III.10 Spectroscopie microonde de l'expansion du nuage . . . . .   | 73 |
| III.11 Énergie moyenne au cours de l'expansion du nuage . . . . .  | 74 |
| III.12 Comparaison des simulations aux spectres microonde immédiatement après excitation laser . . . . . | 76 |
| III.13 Comparaison des simulations aux spectres microonde lors de l'explosion du nuage . . . . .         | 77 |
| III.14 Comparaison des simulations aux spectres optiques . . . . .                                       | 77 |
| <br>   |    |
| V.1 Second circuit de contrôle de la tension des électrodes d'ionisation . . . . .                       | 82 |
| V.2 Électrodes de circularisation et de contrôle du champ parallèle . . . . .                            | 83 |
| V.3 Électrodes de circularisation et de contrôle du champ parallèle . . . . .                            | 85 |
| V.4 Champ électrique créé par les électrodes RF . . . . .  | 86 |

# Liste des tableaux

|       |   |    |
|-------|---|----|
| I.1   | Défauts quantiques du $^{87}Rb$ et $^{85}Rb$                      | 5  |
| I.2   | Effet Stark quadratique des niveaux proches du 60S                | 9  |
| I.3   | Temps de vie du niveau 60S à température finie.                   | 10 |
| I.4   | Coefficients de Van der Waals 60S-nl                              | 23 |
| II.1  | Quelques nuages typiques  | 45 |
| II.2  | Estimation des gradients de champ électrique près de la puce      | 56 |
| III.1 | Coefficients de Van der Waals pour différents niveaux $60S - n'S$ | 69 |



# Introduction



## Chapitre I

# Atomes de Rydberg alcalins en interaction

Un atome de Rydberg est un atome dont un électron au moins occupe un état de grand nombre quantique principal  $n$ . Par là, un atome de Rydberg présente des propriétés physiques exacerbées par rapport à un atome non excité ou peu excité. On le remarque tout d'abord sur sa taille : un atome de rubidium dans le niveau  $n = 110$  a une extension spatiale de l'ordre d'1  $\mu\text{m}$ , vingt mille fois plus grande que le rayon de Bohr, qui représente l'ordre de grandeur caractéristique de la taille d'un atome dans son état fondamental.

Avec un électron à une telle distance du cœur atomique, les atomes de Rydberg présentent de très grands moments dipolaires de transition entre états de Rydberg voisins. On comprend dès lors leur très grande sensibilité au rayonnement électromagnétique [1]. Ces très grands moments dipolaires de transition engendrent également de très forts couplages entre atomes de Rydberg voisins, par l'intermédiaire de l'interaction dipolaire. Ces couplages sont eux aussi plusieurs ordres de grandeur plus importants que ceux qui se manifestent entre des atomes dans le niveau fondamental. L'interaction dipolaire entre atomes de Rydberg est au cœur des travaux de recherche présentés dans cette thèse. Ce premier chapitre vise à en apporter les éléments théoriques importants pour la compréhension des résultats et discussions qui seront abordés par la suite.

La première partie de ce chapitre décrit la théorie du défaut quantique [2], qui permet de calculer les énergies propres des états de Rydberg et leur fonction d'onde radiale loin du cœur atomique positif. Il est alors aisément de calculer les éléments de matrice de l'opérateur de dipôle électrique entre deux niveaux de Rydberg. Connaître les dipôles de transition entre un niveau de Rydberg et les niveaux voisins permet entre autres de calculer la durée de vie des niveaux de Rydberg. Nous introduirons ensuite la base des états paraboliques qui permet une description claire des niveaux de Rydberg circulaires en présence d'un champ extérieur. La connaissance des dipôles de transition est également essentielle au calcul des interactions dipolaires entre deux atomes de Rydberg, ce que nous aborderons dans un troisième paragraphe. Enfin, nous discuterons le détail de cette interaction dans deux cas particuliers : les atomes de Rydberg en interaction autour du niveau 60S et les atomes de Rydberg en interaction autour du niveau circulaire 50C. Ces deux cas particuliers seront à nouveau discutés plus en détail dans des chapitres dédiés aux expériences que nous avons menées.

## I.1 Les atomes de Rydberg alcalins : des hydrogénoides géants

Un atome de Rydberg alcalin a un seul électron dans un niveau de grand nombre quantique principal  $n$ . L'essentiel de la fonction d'onde de cet électron est localisé dans des régions atomiques éloignées du cœur, c'est-à-dire de l'ensemble du noyau atomique et des couches électroniques inférieures. Pour cette raison, il ressemble à un atome d'hydrogène, dont l'unique électron voit un cœur protonique simple de charge totale  $+q = 1,602\,176\,565(35) \times 10^{-19}$  C [3]. Dans le cas de l'hydrogène, ce cœur est plusieurs ordres de grandeurs plus petit que la taille typique de l'orbite de l'électron : le niveau électronique fondamental 1S a un « rayon » caractéristique  $a_0 = 0,529\,177\,210\,92(17)$  Å [3], alors que le proton a un rayon  $r_p = 0,8775(51)$  fm [3].

Les cinq ordres de grandeur séparant le rayon de l'orbite électronique et le rayon du proton permettent de considérer que le potentiel vu par l'électron est parfaitement coulombien sur tout l'espace. Les énergies propres de l'atome d'hydrogène sont alors données par

$$E(n, l, j) = -\frac{E_I}{n^2}, \quad (\text{I.1})$$

avec

$$E_I = \frac{1}{1 + \frac{m_e}{M}} \frac{m_e q^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \quad (\text{I.2})$$

l'énergie d'ionisation pour l'électron dans le niveau 1S de l'atome d'hydrogène, où  $M$  est la masse du cœur atomique (masse d'un proton pour l'atome d'hydrogène, masse atomique  $m_{Rb87}$  pour l'atome de  $^{87}Rb$  dans un état de Rydberg),  $n$  le nombre quantique principal,  $m_e$  la masse de l'électron,  $\epsilon_0$  la permittivité diélectrique du vide, et  $\hbar$  la constante de Planck réduite.

Les états propres de ce modèle s'écrivent en coordonnées sphériques comme le produit d'une partie radiale, fonction de  $r$  qui est la distance de l'électron au cœur atomique, par une partie angulaire, fonction des coordonnées angulaires  $\theta$  et  $\phi$  [4] :

$$\psi(r, \theta, \phi) = R_{nl}(r) \cdot Y_l^{m_l}(\theta, \phi). \quad (\text{I.3})$$

Ici,  $l$  est le nombre quantique orbital et  $m_l$  le nombre quantique magnétique, associé à la projection du moment angulaire orbital de l'électron sur l'axe de quantification. Cette première description ne prend pas en compte les corrections aux énergies dues au couplage entre le moment magnétique intrinsèque de l'électron, son spin, et son moment magnétique orbital correspondant à la structure fine. Elle néglige tout autant le couplage entre le moment magnétique total de l'électron et le moment magnétique du cœur atomique, le couplage hyperfin [5].

Là où la structure fine est importante, les bons nombres quantiques deviennent  $n, l, j, m_j$ , avec  $j = l + s$  où  $s = 1/2$  est le moment magnétique de spin de l'électron. Le couplage hyperfin étant très petit pour les niveaux de Rydberg, nous en ferons fi et continuerons d'utiliser la base avec moment cinétique total  $j$  de l'électron pour décrire les niveaux électroniques.

En comparaison avec l'atome d'hydrogène, le cœur positif de l'atome de Rydberg alcalin comporte une structure d'extension spatiale bien plus importante [2]. Dans la région des couches électroniques inférieures, le potentiel est bien plus profond que le potentiel coulombien car l'effet d'écrantage partiel de la charge totale positive du cœur par les électrons internes disparaît lorsque l'on s'en approche : c'est l'effet de pénétration du cœur. Par ailleurs, la distribution spatiale des charges positives et négatives entraîne une polarisabilité du cœur composé. L'électron de Rydberg interagit avec cette distribution de charge complexe, ce qui modifie sa fonction d'onde et son énergie propre. Afin de rendre compte de ces effets, il est nécessaire d'apporter une correction aux énergies propres de l'électron de Rydberg d'un atome alcalin : le défaut quantique.

### I.1.1 Hamiltonien de l'atome de Rydberg et défaut quantique

Les deux effets précédemment cités de pénétration du cœur et de polarisabilité du cœur peuvent être efficacement décrits par la théorie du défaut quantique. Celui-ci apparaît comme une correction  $\delta_{nlj}$  au nombre quantique principal  $n$  dans l'équation des énergies propres des niveaux électroniques [2], qui devient

$$E(n, l, j) = \frac{-E_I}{(n - \delta_{nlj})^2}, \quad (\text{I.4})$$

avec

$$\delta(n, l, j) = \delta_{lj,0} + \frac{\delta_{lj,2}}{(n - \delta_{lj,0})^2} + \frac{\delta_{lj,4}}{(n - \delta_{lj,0})^4} + \frac{\delta_{lj,6}}{(n - \delta_{lj,0})^6} + \dots \quad (\text{I.5})$$

**Table I.1** Défauts quantiques du  $^{85}\text{Rb}$  extraits de [6, 7] et du  $^{87}\text{Rb}$  extraits de [8]

|            | $^{85}\text{Rb}$ |                 | $^{87}\text{Rb}$ |                 |
|------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|            | $\delta_{lj,0}$  | $\delta_{lj,2}$ | $\delta_{lj,0}$  | $\delta_{lj,2}$ |
| $nS_{1/2}$ | 3,131 180 4(10)  | 0,1784(6)       | 3,131 180 7(8)   | 0,1787(2)       |
| $nP_{1/2}$ | 2,654 884 9(10)  | 0,2900(6)       |                  |                 |
| $nP_{3/2}$ | 2,641 673 7(10)  | 0,2950(7)       |                  |                 |
| $nD_{3/2}$ | 1,348 091 71(40) | -0,602 86(26)   | 1,348 091 8(11)  | -0,6054(4)      |
| $nD_{5/2}$ | 1,346 465 72(30) | -0,596 00(18)   | 1,346 462 2(11)  | -0,5940(4)      |
| $nF_{5/2}$ | 0,016 519 2(9)   | -0,085(9)       |                  |                 |
| $nF_{7/2}$ | 0,016 543 7(7)   | -0,086(7)       |                  |                 |

La série (I.5) développe le défaut quantique en puissances de  $1/(n - \delta_{lj,0}) = 1/n^*$  :  $n^*$  est le nombre quantique principal corrigé du défaut quantique. Ses coefficients, présentés en table (I.1), sont extraits des mesures précises des fréquences de transition entre niveaux de Rydberg voisins [9–11] et la série sous cette forme converge rapidement [12] : pour les niveaux de  $n > 40$ , les deux premiers termes suffisent à obtenir une précision meilleure que la centaine de kHz sur une large gamme de valeurs de  $n$ . Les coefficients de la série sont fonction de  $l$  et  $j$ , ainsi que de l'espèce atomique. Nous n'avons pas connaissance de défauts quantiques mesurés pour le  $^{87}\text{Rb}$  autres que ceux présentés ici,

mais l'utilisation de ceux du  $^{85}\text{Rb}$  fournit de bons résultats grâce à la grande similarité des structures électroniques de ces deux isotopes. En ce qui concerne les niveaux de  $l > 3$ , leurs défauts quantiques sont petits, et donc d'autant plus difficiles à mesurer. Ils seront donc négligés par la suite. Avec les valeurs connues des défauts quantiques, nous obtenons des fréquences de transition entre niveaux de Rydberg voisins avec une précision meilleure que  $\sim 50\text{kHz}$ .

Dans le cas extrême des niveaux de Rydberg circulaires, qui ont un moment orbital maximal  $l = n - 1$ , le défaut quantique peut être considéré nul et alors on retrouve le modèle de l'atome d'hydrogène sans correction autre que la masse du cœur.

### I.1.2 Partie radiale de la fonction d'onde et calcul du dipôle de transition

Ayant ces outils à notre disposition, nous pouvons désormais nous employer à calculer les éléments de matrice de l'opérateur de transition dipolaire  $\mathbf{d} = q\mathbf{r}$  entre niveaux de Rydberg, qui apparaît de façon essentielle dans les termes de couplage des atomes avec le rayonnement électromagnétique et dans le couplage dipolaire entre deux niveaux de Rydberg  $|n, l, j, m_j\rangle$  et  $|n', l', j', m'_j\rangle$ . Ces éléments de matrice s'écrivent

$$\begin{aligned} \langle nl, l, j, m_j | q\mathbf{r} | n', l', j', m'_j \rangle &= q \langle n, l, j, m_j | r \frac{\mathbf{r}}{r} | n', l', j', m'_j \rangle \\ &= q \cdot \int r^2 dr R_{nl}^*(r) r R_{n'l'}(r) \langle l, j, m_j | \frac{\mathbf{r}}{r} | l', j', m'_j \rangle \quad (\text{I.6}) \\ &= q\mathcal{R}(nl, n'l')\mathcal{A}(ljm_j, l'j'm'_j), \end{aligned}$$

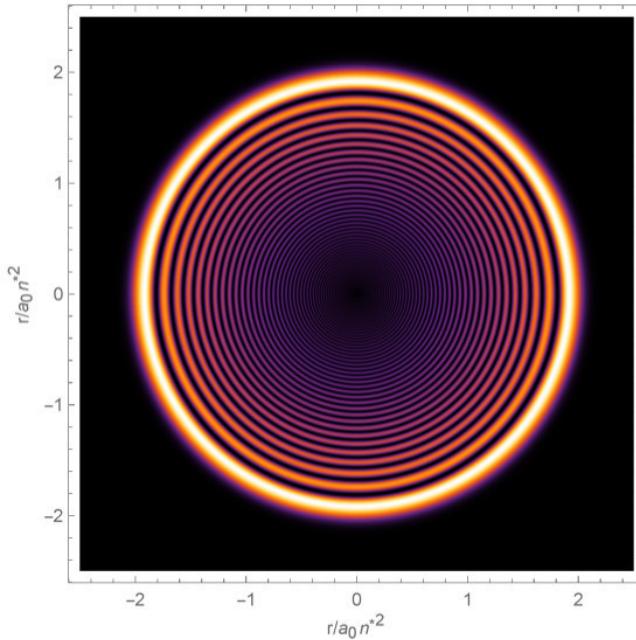
c'est-à-dire comme produit d'une partie radiale  $\mathcal{R}$  et d'une partie angulaire  $\mathcal{A}$ . Or la partie radiale  $R_{nl}(r)$  de la fonction d'onde est affectée par l'effet de pénétration du cœur décrit plus haut et doit donc être corrigée [2]. Le calcul de  $\mathcal{R}$  peut être fait numériquement par une méthode dite de Numerov [2, pp.10-24]. Cette méthode s'appuie sur le fait que le potentiel à l'extérieur du cœur atomique reste coulombien. La partie radiale de la fonction d'onde peut donc y être calculée à partir de la même équation que pour l'atome d'hydrogène, avec les mêmes conditions aux limites à  $r \rightarrow \infty$ , mais avec une énergie totale différente qui est fixée par les défauts quantiques, et en tronquant à une distance finie du cœur pour éviter la divergence du potentiel à distance nulle.

La figure (I.1) montre la probabilité de présence  $r^2|R_{ns}(r)|^2$  de l'électron de Rydberg dans le niveau nS du  $^{87}\text{Rb}$ . Cela montre que la fonction d'onde se situe essentiellement loin du cœur atomique et justifie donc la validité de la méthode de Numerov.

À partir du calcul de  $R_{nl}(r)$ , l'on peut aisément dériver la partie radiale de l'opérateur dipôle  $\mathbf{d}$ . L'on apprend en particulier que la partie radiale de  $\mathbf{d}$  entre deux niveaux de nombre quantique principal similaire varie comme  $\mathcal{R} \sim a_0 \cdot n^{*2}$ . Mentionnons ici que le rayon moyen de l'orbitale électronique d'un niveau de Rydberg est très similaire au calcul de la partie radiale de l'opérateur dipôle :

$$\langle r_{|n,l,j,m_j\rangle} \rangle = \int r^2 dr R_{nl}(r).r.R_{nl}(r) = \mathcal{R}(nl, nl) \propto a_0 \cdot n^{*2}. \quad (\text{I.7})$$

À titre d'exemple, l'équation (I.7) permet d'obtenir la taille de l'orbitale électronique



**Figure I.1** Probabilité de présence de l'électron dans le niveau nS :  $r^2 \times |R_{nS}(r)|^2$ , dans l'un quelconque de ses plans de symétrie.

dans le niveau  $60S_{1/2}$  : son rayon moyen vaut  $\langle r \rangle = 4850 a_0 = 256,5$  nm.

### I.1.3 L'effet Stark

Les atomes de Rydberg étant très sensibles au champ électrique, il est important de comprendre comment celui-ci agit. La présence d'un champ électrique constant  $\mathbf{F}$  dans l'environnement ajoute au hamiltonien atomique un terme de couplage « Stark » entre le champ et l'opérateur dipolaire électrique. En présence d'un champ électrique, le hamiltonien devient

$$\hat{H} = \hat{H}_0 - \hat{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{F} = \hat{H}_0 + q \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{F}, \quad (\text{I.8})$$

où  $\hat{H}_0$  est le hamiltonien libre de l'atome, dont les énergies propres sont calculées par la théorie du défaut quantique selon l'équation (I.4),  $\hat{\mathbf{r}}$  l'opérateur position de l'électron dans le potentiel atomique et  $q$  la charge élémentaire, supposée positive.

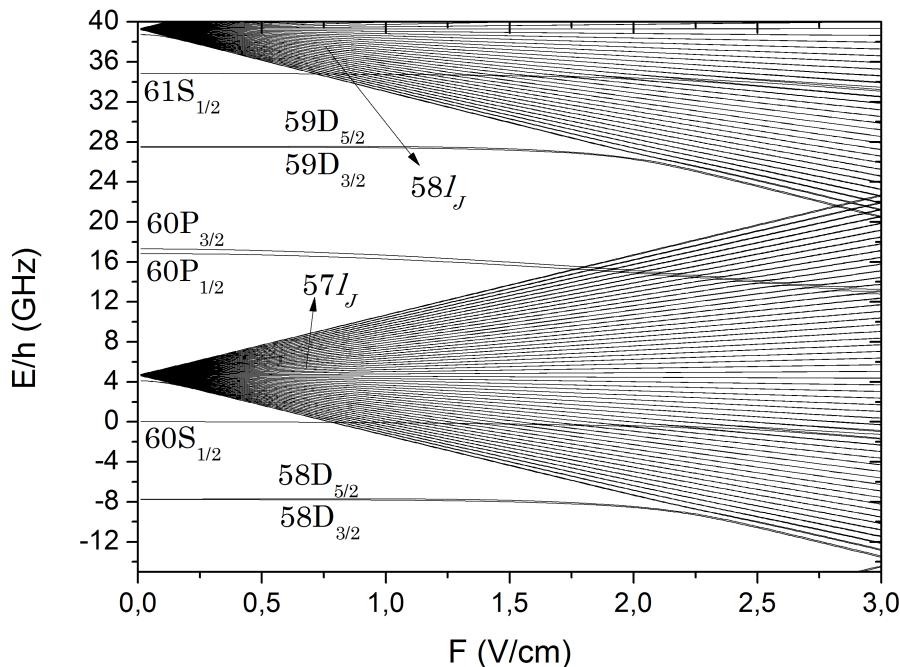
Le hamiltonien Stark (I.8) perd la symétrie sphérique de  $\hat{H}_0$ , au profit d'une symétrie cylindrique autour de l'axe défini par le vecteur de champ électrique  $\mathbf{F}$ . Cet axe, que nous choisirons comme étant l'axe ( $Oz$ ), devient alors l'axe de quantification naturel du problème. Dans la base construite autour de cet axe, le terme d'énergie Stark prend la forme

$$\hat{H}_S = q\hat{z}|\mathbf{F}| = q\hat{r}\sqrt{\frac{4\pi}{3}}Y_1^0|\mathbf{F}|. \quad (\text{I.9})$$

où  $\hat{z}$  est la composante selon  $z$  de l'opérateur position,  $\hat{r}$  sa norme, et  $Y_1^0$  l'harmonique sphérique ( $l = 1, m_l = 0$ ). Ce hamiltonien ne couple que les états de même  $m_l$  et

vérifiant  $\Delta l = \pm 1$ .

Le calcul de l'effet Stark par diagonalisation du hamiltonien pour un niveau de Rydberg donné est alors simple à mener numériquement, en réduisant le sous-espace à considérer grâce à la règle de sélection  $\Delta m_l = 0$ . Cette même règle de sélection permet d'imposer la condition  $\Delta m_j = \Delta m_l + \Delta m_s = 0$ , car l'effet Stark n'introduit aucun terme permettant de coupler des états de spins électroniques différents. La figure (I.2) montre les énergies propres trouvées par diagonalisation du hamiltonien (I.8), pour les états d'énergie proche de celle du niveau  $60S_{1/2}$ ,  $m_j = 1/2$  et de même  $m_j$ . Deux cas



**Figure I.2** Diagramme Stark autour du niveau  $60S$ , pour les états de  $m_j = 1/2$ . Le défaut quantique déplace beaucoup les niveaux  $S,P$  et  $D$ . Ces niveaux non-dégénérés ont un effet Stark quadratique en champ électrique. Les niveaux de grand  $l$  sont dégénérés et ont un effet Stark linéaire (ce sont les multiplicités qui s'ouvrent en éventail).

sont à distinguer. Les niveaux de faible moment orbital  $l \leq 3$  sont déplacés en énergie par leur défaut quantique important. Le terme d'interaction Stark ne couplant que des niveaux ayant la même énergie en l'absence de champ électrique, ces niveaux  $S,P$  et  $D$  ne sont perturbés qu'au second ordre par l'effet Stark. Leur énergie varie donc de façon quadratique avec le champ électrique. Les niveaux de grand nombre quantique orbital  $l$  et de même nombre quantique principal  $n$  sont, eux, dégénérés. Le champ électrique sépare donc leurs énergies linéairement\*. La figure (I.2) montre deux telles multiplicités,  $n = 57$  et  $n = 58$ .

Les niveaux de bas  $l$  présentent donc tous un effet Stark quadratique que l'on

\*. Le cas de l'effet Stark pour les atomes de grand  $l$  sera traité plus en détail dans le chapitre IV.

exprime sous la forme

$$\Delta\nu_S = A \cdot \mathbf{F}^2. \quad (\text{I.10})$$

La diagonalisation du hamiltonien (I.8) et l'ajustement des énergies propres ainsi calculées nous permettent d'extraire les coefficients d'effet Stark pour n'importe quel niveau. La table (I.2) répertorie les coefficients d'effet Stark quadratique pour quelques niveaux autour du 60S.

**Table I.2** Coefficients d'effet Stark quadratique des niveaux proches du 60S.

| Niveau de Rydberg<br>$ n, l, j\rangle$ | Coefficient Stark quadratique<br>$A_{n,l,j,m_j}$ en MHz/(V/cm) $^2$ |
|--|---|
| 60S <sub>1/2</sub>                     | -89,9   |
| 61S <sub>1/2</sub>                     | -100,9  |
| 60P <sub>3/2</sub> , $m_j = \pm - 1/2$ | -676  |
| 60P <sub>3/2</sub> , $m_j = \pm - 3/2$ | -569  |

#### I.1.4 Temps de vie des niveaux de Rydberg

Avec la connaissance des dipôles de transition d'un niveau de Rydberg vers les niveaux voisins, il est possible de connaître le temps de vie de celui-ci. Deux processus entrent en jeu dans la désexcitation radiative à température finie de ces niveaux atomiques : les transitions par émission spontanée mais aussi les transitions par absorption ou émission stimulée par le rayonnement de corps noir de leur environnement. En effet, les transitions entre niveaux de Rydberg proches en énergie sont dans le domaine des micro-ondes millimétriques. Cela implique qu'elles seront à considérer dès les très basses températures : contrairement aux photons optiques, des photons micro-ondes sont déjà émis par le rayonnement du corps noir aux températures cryogéniques, de quelques mK à quelques K.

À titre d'exemple, la fréquence de la transition entre le niveau  $|60S1/2\rangle$  et le niveau  $|59P3/2\rangle$  vaut  $\nu = E/h = 18,5213$  GHz. La température de corps noir correspondant à cette fréquence est de  $T = h\nu/k_B = 0,89$  K. Cette transition sera donc limitante pour le temps de vie du niveau 60S dès lors que celui-ci sera dans un environnement dépassant les 500 mK.

À température nulle, le temps de vie d'un niveau excité est calculé uniquement à partir des coefficients d'Einstein pour l'émission spontanée [13]. Un électron dans un niveau excité est couplé aux niveaux de plus basse énergie par les modes électromagnétiques du vide et le taux de désexcitation d'un niveau initial  $|i\rangle$  vers un niveau final  $|f\rangle$  séparés d'une énergie  $E_f - E_i = -\hbar\omega_{if} < 0$  est donné par :

$$A_{if} = \frac{2\omega_{if}^3}{3\epsilon_0 c^3 h} \cdot q^2 \cdot |\langle i | r | f \rangle|^2 \quad (\text{I.11})$$

Ce coefficient est le produit de la densité de modes du rayonnement électromagnétique autour de la fréquence résonante  $\nu_{if} = \omega_{if}/2\pi$  et du moment dipolaire de transition

entre les niveaux  $|i\rangle$  et  $|f\rangle$  couplés par ce rayonnement. Le temps de vie de l'état excité est alors calculé en sommant les taux d'émission spontanée vers chacun des niveaux auxquels il a accès par transition dipolaire électrique. Les transitions dipolaires par émission d'un photon respectant la règle de sélection  $\Delta l = \pm 1$  et  $\Delta m \leq 1$ , la quantité de termes à considérer s'en trouve heureusement limitée.

À température finie cependant, l'absorption et l'émission stimulée vers les niveaux voisins entrent en jeu. Le coefficient d'Einstein pour l'absorption et l'émission stimulée s'écrit ici

$$B_{if} = A_{if} \bar{n}(\omega_{if}) \quad (\text{I.12})$$

Il s'agit alors de connaître, pour une température donnée, le taux d'occupation du rayonnement électromagnétique aux fréquences des transitions entre niveaux de Rydberg. Ce taux nous est donné par la distribution de Bose-Einstein pour un gaz de bosons [14] :

$$\bar{n}(\omega) = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1} \quad (\text{I.13})$$

qui devient, lorsque  $k_B T \gg \hbar\omega$ ,

$$\bar{n}(\omega) \sim \frac{k_B T}{\hbar\omega}. \quad (\text{I.14})$$

Le nombre de photons par mode varie alors linéairement avec la température et ces photons stimulent des transitions vers des niveaux de Rydberg proches, diminuant ainsi le temps de vie du niveau de départ.

### Temps de vie du niveau $60S_{1/2}$

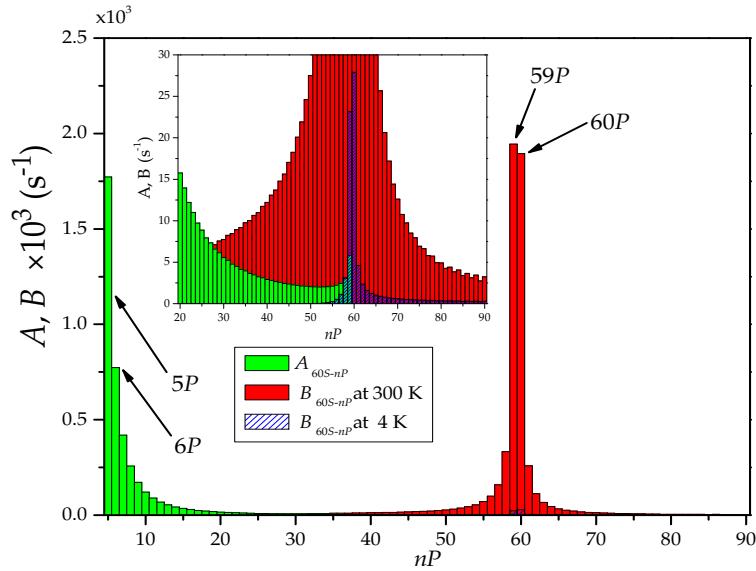
De par la règle de sélection  $\Delta l = \pm 1$ , les termes à considérer pour les transitions dipolaires depuis le niveau  $|n = 60, l = 0\rangle$  sont les couplages avec les niveaux  $nP_j = |n, l = 1, j\rangle$ ,  $j \in \{1/2, 3/2\}$ . La figure (I.3) montre, pour tous les  $n$ , la somme des coefficients d'Einstein d'émission spontanée et d'absorption et émission stimulée à différentes températures vers les niveaux  $nP_j$ .

Il est clair d'après la figure (I.3) que le rayonnement du corps noir à 4,2 K contribue peu à une réduction de la durée de vie du niveau  $60S$  par rapport à l'émission spontanée vers les niveaux de bas  $n$ , alors que le rayonnement du corps noir à 300 K aura un effet considérable, ce que confirme la table (I.3).

**Table I.3** Temps de vie du niveau  $60S$  à température finie.

|             | temps de vie à 0 K  | temps de vie à 4,2 K | temps de vie à 300 K |
|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| $60S_{1/2}$ | 244,5 $\mu\text{s}$ | 239,8 $\mu\text{s}$  | 99,4 $\mu\text{s}$   |

Le temps de vie du niveau  $60S$ , de l'ordre de 250  $\mu\text{s}$  aux températures cryogéniques, permet d'observer et manipuler celui-ci pendant des temps qui sont longs à l'échelle



**Figure I.3** Coefficients d’Einstein pour l’émission spontanée (A) et pour l’absorption et émission stimulée par le rayonnement du corps noir(B), depuis le niveau 60S vers les niveaux  $nP_j$ . Pour chaque  $n$ , nous montrons la somme des coefficients vers  $nP_{j=1/2}$  et  $nP_{j=3/2}$ . L’insert montre à une échelle plus adaptée la contribution du rayonnement du corps noir à 4 K .

du mouvement d’un nuage de Rydberg. Cependant si l’on souhaite développer une plateforme de simulation quantique, des temps d’observation beaucoup plus longs sont nécessaires. Les atomes de Rydberg circulaires ont des durées de vie à température nulle de l’ordre de la dizaine de ms, soit cent fois plus que le niveau 60S. Cela fait des atomes circulaires de bons candidats pour un simulateur quantique.

## I.2 Les niveaux de Rydberg circulaires

Les niveaux de Rydberg de grand moment orbital, et en particulier les états de Rydberg circulaires, présentent une structure fine et un défaut quantique qui sont très largement négligeables. Ils sont en cela parfaitement similaires à l’atome d’hydrogène. On peut utiliser pour les étudier les fonctions d’onde analytiques hydrogénoides sans perte de précision. Pour la même raison, le nombre quantique  $j$  qui rend compte du couplage fin n’est plus nécessaire.

Les autres perturbations que peut subir le modèle de l’atome d’hydrogène, comme la présence d’un champ électrique ou magnétique extérieur en deviennent d’autant plus importantes à prendre en compte. De plus, les niveaux circulaires étant extrêmement anisotropes, l’absence d’axe de quantification leur est préjudiciable. Ils se mélangeant alors rapidement aux niveaux voisins et il est utile de leur imposer un champ électrique, même faible, afin de pallier ce problème.

### I.2.1 La base des états paraboliques

La construction de la base des harmoniques sphériques était fondée sur la conservation du moment cinétique lors du mouvement et sur l’ensemble complet d’opérateurs qui

commutent (« ECOC »)  $\{\hat{H}, \hat{L}^2, \hat{L}_z\}^\dagger$ . En présence d'un champ électrique extérieur définissant l'axe ( $Oz$ ), le terme de couplage Stark  $-\hat{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{F} = q\hat{z}|\mathbf{F}|$  (cf équation I.8) brise la symétrie sphérique du problème, de façon telle que l'opérateur  $\hat{L}^2$  ne commute plus avec le hamiltonien du système. Il est alors nécessaire de trouver un nouvel invariant du mouvement, qui permettra de définir un nouvel ECOC. Celui-ci pourra toujours contenir  $\hat{L}_z$ , qui reste un bon opérateur.

Dès lors que la fonction d'onde électronique reste loin du cœur atomique, l'interaction entre l'électron de valence et le cœur se réduit à un mouvement à force centrale. La mécanique céleste a traité extensivement des mouvements à force centrale, et nous apprend qu'ils ont en commun l'invariance du vecteur de Runge-Lenz, qui caractérise l'excentricité des trajectoires des corps. L'analogie entre l'interaction gravitationnelle des corps célestes et l'interaction coulombienne au sein des atomes permet de définir l'opérateur vectoriel :

$$\hat{\mathbf{A}} = \frac{1}{\sqrt{-2m_e E}} \left( \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{p}} \wedge \hat{\mathbf{L}} - \hat{\mathbf{L}} \wedge \hat{\mathbf{p}}) - m_e e^2 \frac{\mathbf{r}}{r} \right). \quad (\text{I.15})$$

Cet invariant commute avec le hamiltonien de l'atome d'hydrogène et est de même dimension que l'opérateur de moment orbital  $\hat{\mathbf{L}}$ . Les vecteurs propres de  $\hat{\mathbf{A}}$  prennent donc une forme similaire à ceux de  $\hat{\mathbf{L}}$  et ses valeurs propres varient de  $0$  à  $\hbar(n-1)$ .

Malheureusement, les opérateurs  $\hat{\mathbf{L}}$  et  $\hat{\mathbf{A}}$  ne commutent pas. Il est donc nécessaire, afin d'obtenir une bonne base de description, de construire de nouveaux opérateurs qui commutent entre eux et vérifient les relations de commutation d'un moment cinétique à trois dimensions. Les opérateurs

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{J}}_1 &= \frac{1}{2} (\hat{L} - \hat{A}) \\ \text{et} \\ \hat{\mathbf{J}}_2 &= \frac{1}{2} (\hat{L} + \hat{A}) . \end{aligned} \quad (\text{I.16})$$

vérifient ces propriétés, et commutent avec le hamiltonien. Au sein d'une même multiplicité, ces opérateurs vérifient

$$\hat{\mathbf{J}}_1^2 = \hat{\mathbf{J}}_2^2 = -\frac{\hbar^2}{4} - \frac{m_e e^4}{8E_n}, \quad (\text{I.17})$$

ce qui s'écrit aussi

$$E = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2(2j_1+1)^2} = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2(2j_2+1)^2} . \quad (\text{I.18})$$

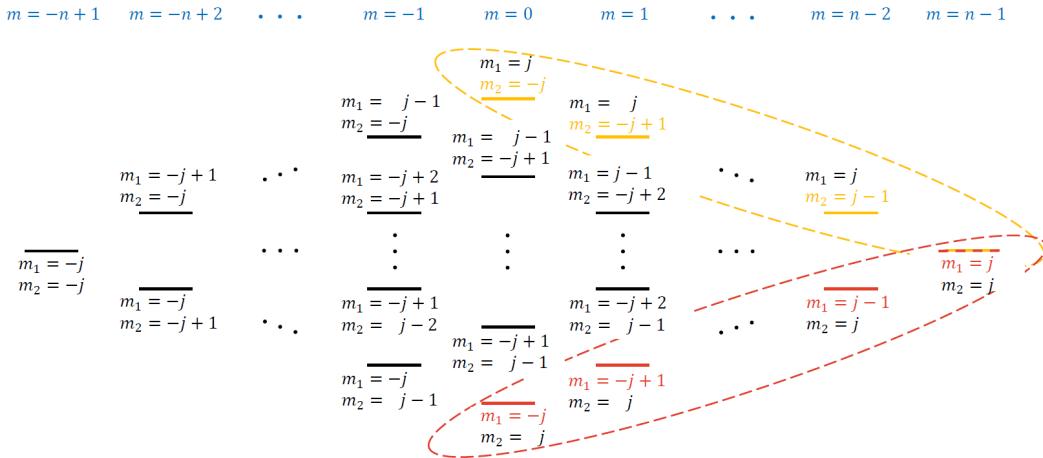
L'on retrouve ici le fait que pour une énergie  $E$  fixée et donc au sein d'une multiplicité de nombre quantique principal  $n$ ,  $\hat{\mathbf{J}}_1$  et  $\hat{\mathbf{J}}_2$  définissent chacun un moment cinétique  $j_{1,2} = (n-1)/2$ .

Les états propres au sein d'une même multiplicité sont alors obtenus en diagonalisant  $\hat{\mathbf{J}}_1^2$ ,  $\hat{\mathbf{J}}_2^2$  et les composantes  $\hat{J}_{1z}$  et  $\hat{J}_{2z}$ . En notant  $\hbar m_{1,2}$  les valeurs propres de  $\hat{J}_{1,2 z}$ ,

---

†. On a ici oublié la structure fine, qui exige lorsqu'elle est prise en compte, de remplacer  $\hat{\mathbf{L}}$  par  $\hat{\mathbf{J}} = \hat{\mathbf{L}} + \hat{\mathbf{S}}$ .

on pourra caractériser les états propres par les nombres  $\{j_1, m_1, j_2, m_2\}$ . Or pour  $n$  fixé,  $j_1 = j_2 = (n-1)/2$ . Ainsi, un état propre sera entièrement défini par les nombres quantiques  $|n, m_1, m_2\rangle$ , avec  $m_1$  et  $m_2$  variant entre  $-(n-1)/2$  et  $+(n-1)/2$ . Par construction de  $\hat{\mathbf{J}}_{1,2}$ , il est aisément de retrouver le nombre quantique magnétique  $m = m_1 + m_2$ . La figure (I.4) propose une représentation schématique des niveaux  $|m_1, m_2\rangle$  d'une même multiplicité  $n$ .



**Figure I.4** Niveaux paraboliques  $|n, m_1, m_2\rangle$  de même nombre quantique principal  $n$ , classés horizontalement en fonction de leur nombre quantique magnétique  $m = m_1 + m_2$ . Le nombre  $j = j_1 = j_2$  est la valeur des moments cinétiques  $\hat{\mathbf{J}}_1$  et  $\hat{\mathbf{J}}_2$  et vaut  $j = (n-1)/2$ . La diagonale jaune représente la direction de variation de  $m_2$  à  $m_1$  fixé et la diagonale rouge la direction de variation de  $m_1$  à  $m_2$  fixé.

Afin d'aider à la représentation des états atomiques, introduisons un nouveau nombre quantique  $k = m_1 - m_2$ , qui quantifie l'excentricité de l'orbite électronique et permet de transformer la base  $|n, m_1, m_2\rangle$  en la base  $|n, m, k\rangle$  :

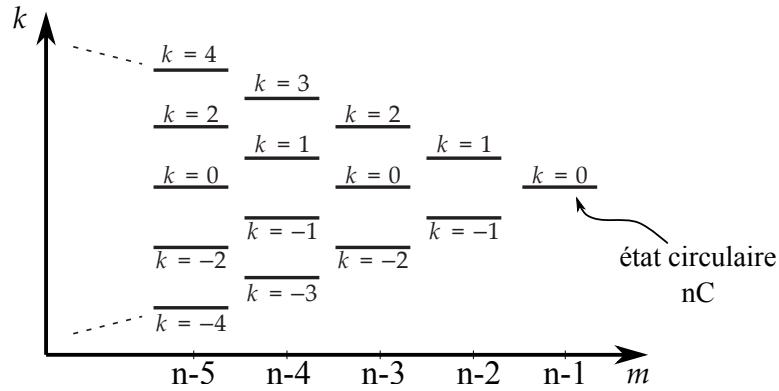
$$\begin{cases} n & \text{le nombre quantique principal} \\ m & \text{le nombre quantique magnétique variant de } -(n-1) \text{ à } (n-1) \\ k = m_1 - m_2 & \text{variant de } (-m - (n-1)) \text{ à } (-m + n - 1). \end{cases} \quad (\text{I.19})$$

La figure (I.5) propose une représentation schématique des niveaux  $|m, k\rangle$  de  $m$  très élevé au sein d'une multiplicité  $n$ .

Le niveau de  $m$  maximal dans une multiplicité donnée,  $|n, m = n-1, k=0\rangle = |n, l=n-1, m=l\rangle$ , est appelé le niveau circulaire nC. Sa fonction d'onde électronique se réduit à un tore éloigné du cœur atomique, de rayon  $\sim n(n-1)a_0$ , et contenu dans le plan perpendiculaire à l'axe de quantification. La figure (I.6) montre la probabilité de présence  $r^2|R(r)|^2$  de l'électron dans le plan perpendiculaire à l'axe de quantification, pour le niveau de Rydberg nC. Celle-ci a une présente un rayon moyen valant

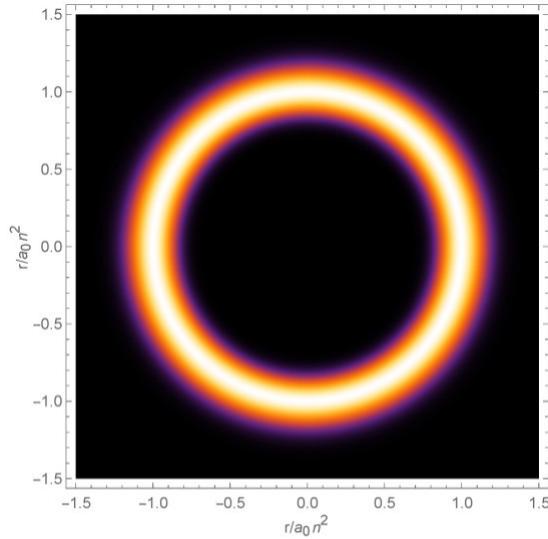
$$\langle r_{|\text{nC}\rangle} \rangle \simeq a_0 \cdot n^2. \quad (\text{I.20})$$

Les niveaux de  $m$  élevé mais non maximal seront appelés niveaux elliptiques en raison



**Figure I.5** Niveaux paraboliques  $|n, m, k\rangle$  de même nombre quantique principal  $n$ , classés horizontalement en fonction de leur nombre quantique magnétique  $m$  et étiqueté selon le nombre quantique  $k$ . Seuls les niveaux de très grand  $m$  sont représentés.

de la forme de leurs fonctions d'onde et seront étiquetés sur la base  $|n, m, k\rangle$ .



**Figure I.6** Probabilité de présence de l'électron dans le niveau nC :  $r^2 \times |R_{nC}(r)|^2$ , dans le plan perpendiculaire à l'axe de quantification et passant par le noyau. Celle-ci décrit un tore de rayon  $n^2 a_0$  autour du cœur atomique.

### L'effet Stark pour les atomes de grand moment cinétique

Comme nous l'avons dit en I.1.3, dans la base parabolique construite autour de l'axe ( $Oz$ ) défini par la direction du champ électrique, le terme de couplage Stark prend une forme simple donnée par l'équation (I.9) :

$$\hat{H}_S = q\hat{z}|\mathbf{F}| = q\hat{r}\sqrt{\frac{4\pi}{3}}Y_1^0|\mathbf{F}|. \quad (\text{I.21})$$

Dans le cas des niveaux de Rydberg à grand moment cinétique, l'absence de défaut quantique permet de résoudre ce hamiltonien analytiquement par un traitement perturbatif de la forme [15]

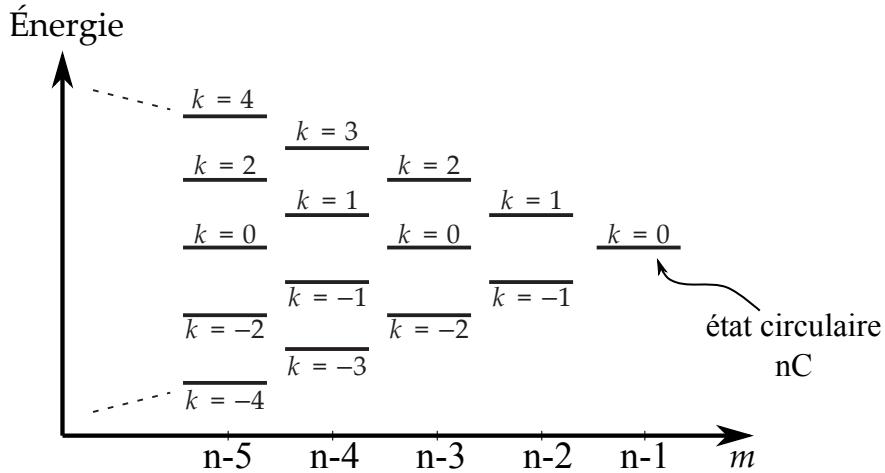
$$E = E^{(0)} + E^{(1)} + E^{(2)} + \dots, \quad (\text{I.22})$$

où

$$\begin{aligned} E^{(0)} &= -\frac{1}{2n^2} \\ E^{(1)} &= \frac{3}{2}nk|\mathbf{F}| \\ E^{(2)} &= -\frac{1}{16} \cdot (19 + 17n^2 - 9m^2 - 3k^2) \cdot n^4 |\mathbf{F}|^2. \end{aligned} \quad (\text{I.23})$$

On remarque ici que les états à  $k = 0$ , et en particulier l'état circulaire, ne subissent l'effet Stark qu'au second ordre.

Nous pouvons désormais représenter les niveaux paraboliques  $|n, m, k\rangle$  en présence d'un champ électrique qui lève leur dégénérescence. La figure I.5 se transforme alors en la figure I.7.



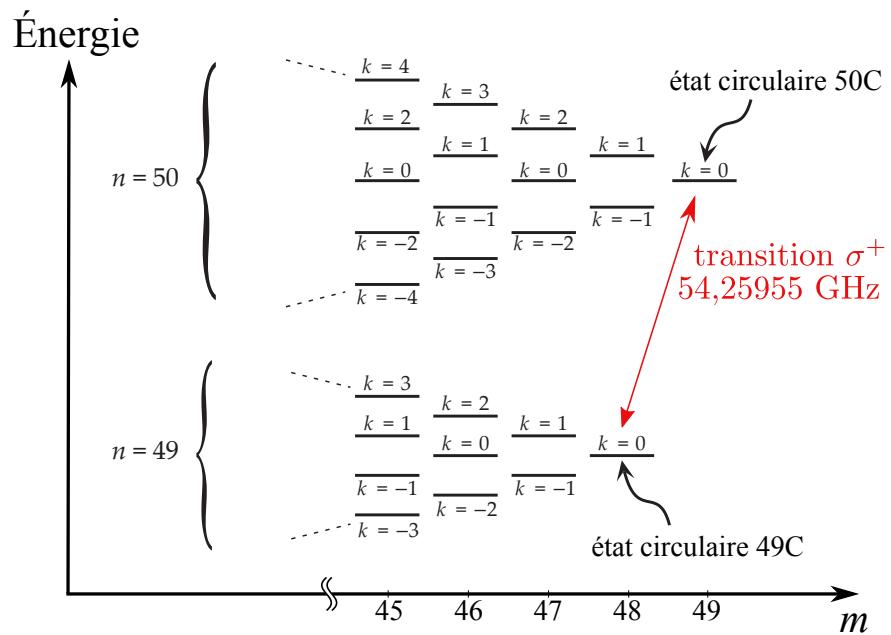
**Figure I.7** Énergie des niveaux paraboliques  $|n, m, k\rangle$  de même nombre quantique principal  $n$  en présence d'un champ électrique. Les niveaux sont classés horizontalement en fonction de leur nombre quantique magnétique  $m$  et étiqueté selon le nombre quantique  $k$ . Seuls les niveaux de très grand  $m$  sont représentés.

### I.2.2 Le niveau de Rydberg 50C : $|n = 50, l = 49, m_l = 49\rangle$

Parmi les niveaux de Rydberg circulaires, le niveau 50C sera d'un intérêt particulier pour nous. Ce niveau circulaire  $n = 50$  a une taille valant  $\langle r \rangle_{50C} \simeq 50^2 a_0 = 2500 a_0 = 132$  nm.

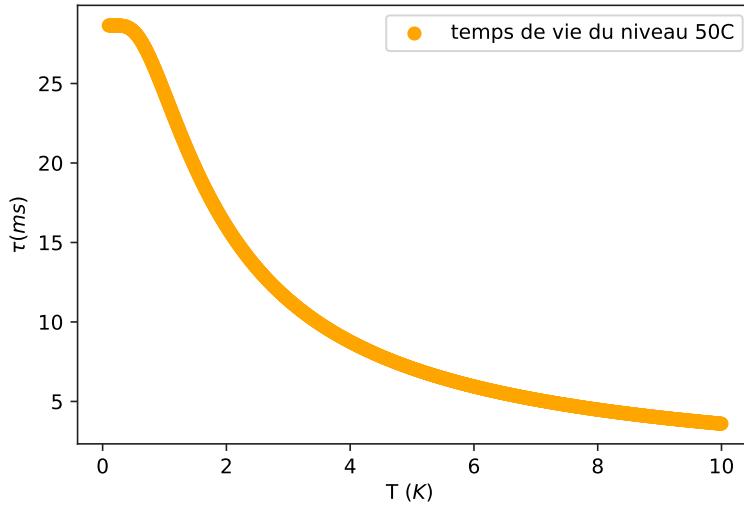
En ce qui concerne leur temps de vie, les niveaux de Rydberg circulaires ont une différence essentielle avec les niveaux de faible  $l$  : les niveaux circulaires n'ont de transition dipolaire possible que vers des niveaux eux aussi à très grand  $l$ , et donc à très grand  $n$ . Il n'y a d'ailleurs qu'une seule transition spontanée possible depuis

le niveau circulaire  $nC = |n, l = n - 1, m_l = l\rangle$ , c'est celle vers le niveau circulaire  $(n-1)C = |n' = n - 1, l' = n' - 1, m'_l = l'\rangle$ . En effet, il n'existe aucun niveau de plus basse énergie que  $nC$  mais qui aurait un  $l$  qui lui soit égal ou supérieur. La figure (I.8) représente les schémas de niveaux près de l'état circulaire  $n = 50$  et met en évidence l'absence de toute autre transition par émission spontanée depuis le niveau  $50C$ . Le niveau  $50C$  ne peut donc se désexciter spontanément que vers le niveau  $49C$ , ce qui réduit considérablement la contribution de l'émission spontanée à son taux de désexcitation radiative. Le calcul du dipôle de transition  $\langle 50C | \hat{d} | 49C \rangle$  donne une valeur de  $1704,71 \text{ ea}_0$ . En appliquant l'équation (I.11) à la fréquence de transition  $50C \rightarrow 49C$  de  $54,259\,55 \text{ GHz}$ , on obtient un taux de désexcitation valant  $\Gamma_{50C}(0 \text{ K}) = A_{i=50C-f=49C} = 34,9056 \text{ Hz}$ . Le temps de vie à température nulle du niveau  $50C$  est donc de  $\tau_{0,50C} = 28,65 \text{ ms}$ , soit cent fois plus que pour le niveau  $60S$ .



**Figure I.8** Schéma de niveaux des multiplicités  $n = 50$  et  $n = 49$  près des niveaux  $50C$  et  $49C$ , en présence d'un champ électrique. La seule transition possible par émission spontanée depuis le  $50C$  est la transition vers le  $49C$ .

Étant donné le faible taux de désexcitation spontanée du niveau  $50C$ , l'effet du rayonnement du corps noir sur sa durée de vie sera important dès les très basses températures. Le rayonnement du corps noir amplifiera non seulement le taux de désexcitation vers le niveau  $49C$ , mais autorisera également par absorption les transitions vers les niveaux de  $n$  supérieur. Ainsi, alors que la réduction du temps de vie du niveau  $60S$  entre  $0 \text{ K}$  et  $4,2 \text{ K}$  est faible (voir table I.3, la durée de vie du  $60S$  est réduite de  $(1 - 239,8/244,5) = 2\%$ ), la réduction du temps de vie du niveau  $50C$  entre  $0 \text{ K}$  et  $4,2 \text{ K}$  est bien plus importante et se porte à  $(1 - 8,36 / 28,65) = 71\%$ . À température ambiante de  $300 \text{ K}$ , la durée de vie de  $50C$  est même réduite à  $122 \mu\text{s}$ , très similaire à celle du niveau  $60S$ . La figure (I.9) montre l'évolution de la durée de vie du niveau  $50C$  en fonction de la température de rayonnement du corps noir, calculée à partir des équations (I.12) et (I.13).



**Figure I.9** Durée de vie radiative du niveau de Rydberg 50C en fonction de la température de rayonnement du corps noir.

Nous avons désormais une bonne connaissance des caractéristiques des atomes de Rydberg individuels, en particulier dans les niveaux 60S et 50C. Ce sont de très grands atomes, avec de très grands moments dipolaires de transition, et un temps de vie très long. Comment se comportent ces atomes de Rydberg lorsqu'ils ne sont plus isolés mais proches les uns des autres ?

## I.3 Atomes de Rydberg en interaction

Dans cette thèse, nous allons nous intéresser aux interactions entre plusieurs atomes de Rydberg voisins, dans des niveaux identiques ou proches en énergie. Le reste de ce chapitre est consacré au calcul de ces interactions et à leur application aux deux cas qui nous concernent : autour des niveaux 60S et 50C.

### I.3.1 Deux atomes de Rydberg qui se parlent

L'opérateur de moment dipolaire entre deux niveaux de Rydberg proches est grand, comme nous l'avons évoqué. En cela, les atomes de Rydberg sont de très bonnes antennes pour le rayonnement électromagnétique lorsque celui-ci est résonant avec les fréquences de transition entre niveaux proches. Cette caractéristique s'accentue fortement lorsque le nombre quantique principal augmente, car le moment dipolaire varie en  $n^2$ . Ces grands moments de transition dipolaires font aussi apparaître une interaction importante entre deux atomes de Rydberg différents : bien qu'ils restent des objets neutres électriquement, ces grands dipôles se voient très bien de loin. En électromagnétisme classique, le terme de couplage entre deux dipôles électriques s'écrit [16]

$$V_{dd}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left( \mathbf{d}_1 \cdot \mathbf{d}_2 - 3(\mathbf{d}_1 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r})(\mathbf{d}_2 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}) \right) \quad (\text{I.24})$$

où  $\mathbf{d}_1$  décrit le premier dipôle,  $\mathbf{d}_2$  le deuxième dipôle et  $\mathbf{r}$  le vecteur d'espace qui les sépare. On peut alors écrire, par analogie, le hamiltonien d'interaction entre deux atomes en remplaçant les dipôles classiques par les opérateurs dipôle électrique de chaque atome. La distance entre les atomes sera cependant traitée de façon classique, en supposant que la distance entre les atomes est très grande devant l'extension spatiale de leurs fonctions d'onde. Le potentiel d'interaction dipolaire s'écrit dans ce cas

$$\begin{aligned} \hat{V}_{dd}(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left( \hat{\mathbf{d}}_1 \cdot \hat{\mathbf{d}}_2 - 3(\hat{\mathbf{d}}_1 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r})(\hat{\mathbf{d}}_2 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}) \right) \\ &= \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left( \hat{\mathbf{r}}_1 \cdot \hat{\mathbf{r}}_2 - 3(\hat{\mathbf{r}}_1 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r})(\hat{\mathbf{r}}_2 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}) \right). \end{aligned} \quad (\text{I.25})$$

Remarquons que ce terme dépend du produit des opérateurs de transition dipolaire électrique de chaque atome. L'interaction entre atomes de Rydberg varie donc comme  $(n^{*2})^2 = n^{*4}$ .

Calculer l'interaction entre deux atomes de Rydberg revient à diagonaliser le hamiltonien total du système des deux atomes dans l'espace de Hilbert des états possibles pour la paire d'atomes. Sans autre *a priori*, une base naturelle pour cet espace est le produit tensoriel  $|R_1\rangle \otimes |R_2\rangle$  des états de chaque atome. Dans cette base, le hamiltonien du système s'écrit

$$\hat{H} = \hat{H}_{0,1} + \hat{H}_{0,2} + \hat{V}_{dd}(\mathbf{r}) \quad (\text{I.26})$$

où  $\hat{H}_{0,i}$  est le hamiltonien de l'atome  $i$  isolé.

En l'absence de champ électrique ou magnétique extérieur, l'axe de quantification pour les niveaux de chaque atome n'est pas déterminé. Il semble naturel de choisir alors comme axe de quantification le vecteur qui sépare les atomes. Dans cette géométrie, le potentiel d'interaction dipolaire prend la forme

$$\begin{aligned} \hat{V}_{dd}(\mathbf{r}) &= -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hat{r}_1 \hat{r}_2}{r^3} \frac{4\pi}{3} \times \left( \hat{Y}_1^1(\theta_1, \phi_1) \hat{Y}_1^{-1}(\theta_2, \phi_2) \right. \\ &\quad \left. + \hat{Y}_1^{-1}(\theta_1, \phi_1) \hat{Y}_1^1(\theta_2, \phi_2) + 2\hat{Y}_1^0(\theta_1, \phi_1) \hat{Y}_1^0(\theta_2, \phi_2) \right) \end{aligned} \quad (\text{I.27})$$

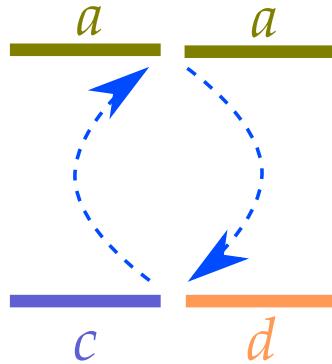
où les  $Y_l^{m_l}$  sont les harmoniques sphériques, solutions des équations de Legendre [4]. Dans cette base, l'opérateur  $\hat{V}_{dd}$  préserve le nombre quantique magnétique total  $M = m_{j1} + m_{j2}$ . Cette condition définit un sous-espace des niveaux de même  $M$  pour la paire d'atomes, sous-espace qui a une dimension infinie. Il sera donc nécessaire, pour calculer l'interaction entre les deux atomes, de tronquer ce sous-espace. Dans le sous-espace tronqué, nous pouvons diagonaliser le hamiltonien (I.26) pour chaque distance interatomique  $r$ .

### I.3.2 Deux atomes dans le même niveau de Rydberg

Dans le cas de deux atomes dans le même niveau de Rydberg  $a$ , la règle de sélection  $\Delta l = \pm 1$  impose que  $\langle aa | \hat{V}_{dd} | aa \rangle = 0$ . L'opérateur d'interaction dipolaire n'agit donc sur la paire  $|aa\rangle$  que comme une perturbation de second ordre, *via* le couplage à des niveaux de paire intermédiaires  $|cd\rangle$ . La figure (I.10) représente ce couplage au second ordre. L'énergie d'interaction résultant de cette perturbation prend la forme

$$hC_{aa}(r) = \sum_{|cd\rangle} \frac{\langle aa | \hat{V}_{dd} | cd \rangle \langle cd | \hat{V}_{dd} | aa \rangle}{2E_a - E_c - E_d} = \frac{hC_{6,aa}}{r^6} \quad (\text{I.28})$$

où  $E_i$  est l'énergie d'un atome de Rydberg individuel dans l'état  $i$ . L'interaction dipolaire prend donc la forme d'une interaction de Van der Waals en  $1/r^6$ , avec un coefficient valant  $C_{6,aa}$ .



**Figure I.10** Schéma du couplage dipolaire entre deux atomes dans des niveaux de Rydberg  $a$  identiques : le couplage s'effectue au second ordre *via* les niveaux  $c$  et  $d$ .

La situation se complique lorsque l'un des niveaux intermédiaires  $|cd\rangle$  est quasi-dégénéré avec le niveau  $|aa\rangle$ , c'est-à-dire lorsque  $\langle aa | \hat{V}_{dd} | cd \rangle \gg |2E_a - E_c - E_d|$ . Le développement perturbatif est en effet invalidé sous cette condition et il est nécessaire de traiter le problème différemment. Si  $|c\rangle = |d\rangle$ , alors le sous-espace à observer est composé des deux états  $|aa\rangle$  et  $|cc\rangle$  et l'on a  $E_c \simeq E_a$ . Le hamiltonien d'interaction s'écrit alors

$$H_{aa-cc} = \begin{pmatrix} |aa\rangle & |cc\rangle \\ |aa\rangle & \frac{\langle aa | V_{dd} | cc \rangle}{r^3} \\ |cc\rangle & \frac{\langle aa | V_{dd} | cc \rangle}{r^3} \\ |cc\rangle & 2E_a \end{pmatrix}. \quad (\text{I.29})$$

Les états propres de ce hamiltonien sont les combinaisons symétrique et antisymétrique  $(|aa\rangle \pm |cd\rangle)/\sqrt{2}$ , et présentent les énergies propres

$$2E_a \pm \Delta E_{dd} = 2E_a \pm \frac{\langle aa | V_{dd} | cc \rangle}{r^3} = 2E_a \pm \frac{hC_{3,aa}}{r^3}. \quad (\text{I.30})$$

Si, au contraire,  $|c\rangle \neq |d\rangle$ , on est alors en présence de trois états dégénérés :  $|aa\rangle$ ,  $|cd\rangle$  et  $|dc\rangle$ . Il est utile de réécrire ceux-ci en combinant  $|cd\rangle$  et  $|dc\rangle$  symétriquement et anti-symétriquement en  $|C\rangle = (|cd\rangle + |dc\rangle)/\sqrt{2}$  et  $|NC\rangle = (|cd\rangle - |dc\rangle)/\sqrt{2}$ . En

effet,  $\hat{V}_{dd}$  ne couple pas le niveau  $|aa\rangle$  avec le niveau  $|NC\rangle$ . On peut donc appliquer le traitement réservé jusqu’ici au cas  $|c\rangle = |d\rangle$  en remplaçant  $|cc\rangle$  par  $|C\rangle$ . Nous obtenons donc deux états propres  $(|aa\rangle \mp |C\rangle)/\sqrt{2}$  avec les énergies

$$2E_a \pm \Delta E_{dd} = 2E_a \pm \frac{\langle aa|V_{dd}|C\rangle}{r^3} = 2E_a \pm \frac{\langle aa|V_{dd}|cd\rangle}{r^3} = 2E_a \pm \frac{hC_{3,aa}}{r^3}. \quad (\text{I.31})$$

Ces cas particuliers sont analogues à ce que l’on appelle dans d’autres contextes les résonances de Förster [17].

### I.3.3 Deux atomes dans des niveaux de Rydberg différents

Intéressons-nous désormais aux interactions entre deux atomes de Rydberg dans les états  $a$  et  $b$ . Il y a alors deux états de paire dégénérés  $|ab\rangle$  et  $|ba\rangle$ . De même que précédemment, les termes de couplage  $\langle ab|\hat{V}|ab\rangle = \langle ba|\hat{V}|ba\rangle$  sont nuls. L’on peut tout de même introduire un opérateur potentiel effectif  $V_{eff}$  pour le système à deux niveaux  $|ab\rangle$  et  $|ba\rangle$ , qui tiendra compte du couplage éventuel au premier ordre entre  $|ab\rangle$  et  $|ba\rangle$  mais également des couplages de second ordre avec des états intermédiaires. Les éléments de matrice de  $V_{eff}$  sont

$$\begin{aligned} hC_{ab} &= \langle ab|V_{eff}|ab\rangle = \langle ba|V_{eff}|ba\rangle \\ \text{et} \\ hA_{ab} &= \langle ab|V_{eff}|ba\rangle = \langle ab|V_{eff}|ba\rangle. \end{aligned} \quad (\text{I.32})$$

L’hamiltonien d’interaction s’écrit sous forme matricielle

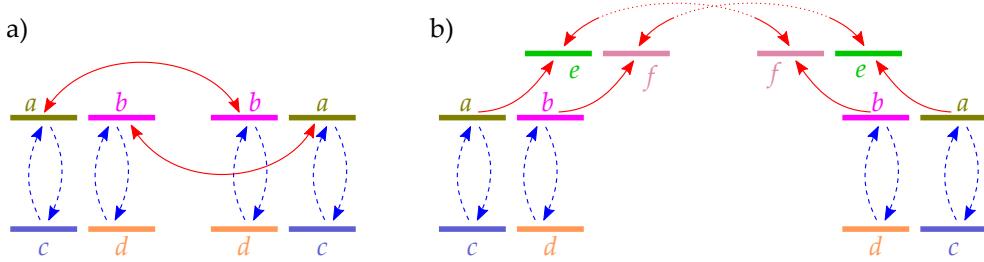
$$V_{eff}/h = \frac{\langle ab|}{\langle ba|} \begin{pmatrix} |ab\rangle & |ba\rangle \\ C_{ab} & A_{ab} \\ A_{ab} & C_{ab} \end{pmatrix}. \quad (\text{I.33})$$

Les termes diagonaux de ce hamiltonien représentent l’interaction directe d’un état de paire avec lui-même, qui se calcule donc comme une perturbation de second ordre *via* les niveaux intermédiaires  $|cd\rangle$ . Comme c’était le cas pour deux atomes dans le même état de Rydberg, cette interaction prend la forme de Van der Waals avec un coefficient  $C_{6,ab}$  :

$$hC_{ab}(r) = \sum_{|cd\rangle} \frac{\langle ab|\hat{V}_{dd}|cd\rangle \langle cd|\hat{V}_{dd}|ab\rangle}{E_a + E_b - E_c - E_d} = \frac{hC_{6,ab}}{r^6}. \quad (\text{I.34})$$

Les termes non-diagonaux  $A_{ab}$  correspondent eux à une interaction au cours de laquelle les deux atomes échangent leurs états. Si la transition  $a \rightarrow b$  est autorisée par les règles de sélection dipolaires, alors cette interaction d’échange est un couplage *direct* de  $|ab\rangle$  et  $|ba\rangle$ . Il varie donc comme un potentiel dipolaire en  $1/r^3$ . Dans le cas contraire, l’interaction d’échange sera un couplage dipolaire indirect au second ordre, variant donc en  $1/r^6$ , voire d’ordre supérieur, comme l’illustre la figure (I.11).

Lorsque les termes d’échange  $A_{ab}$  deviennent comparables aux termes d’interaction directe  $C_{ab}$ , il peut être judicieux de diagonaliser le hamiltonien effectif (I.33). En effet, les états propres de celui-ci, qui sont les combinaisons symétrique et anti-symétrique



**Figure I.11** Schéma du couplage dipolaire entre deux atomes dans des niveaux de Rydberg différents  $a$  et  $b$  : le couplage  $ab - ab$  s'effectue au second ordre *via* les niveaux  $c$  et  $d$ . Le couplage  $ab - ba$  peut s'effectuer à l'ordre 1(a), à l'ordre 2 via des niveaux intermédiaires  $e$  et  $f$ (b), ou plus encore.

$(|ab\rangle \pm |ba\rangle)/\sqrt{2}$ , ne sont plus dégénérés et présentent respectivement des déplacements d'énergie

$$\Delta E_{dd}/h = C_{ab} \mp A_{ab}. \quad (\text{I.35})$$

Afin d'illustrer la discussion des interactions que nous venons de présenter, nous allons les appliquer à nos deux exemples que sont le niveau 60S et le niveau 50C. Dans les deux cas, le calcul numérique consiste à diagonaliser le hamiltonien (I.26) à tous les ordres perturbatifs, en limitant l'espace de Hilbert à quelques centaines d'états de paire et en traitant la distance interatomique de façon classique.

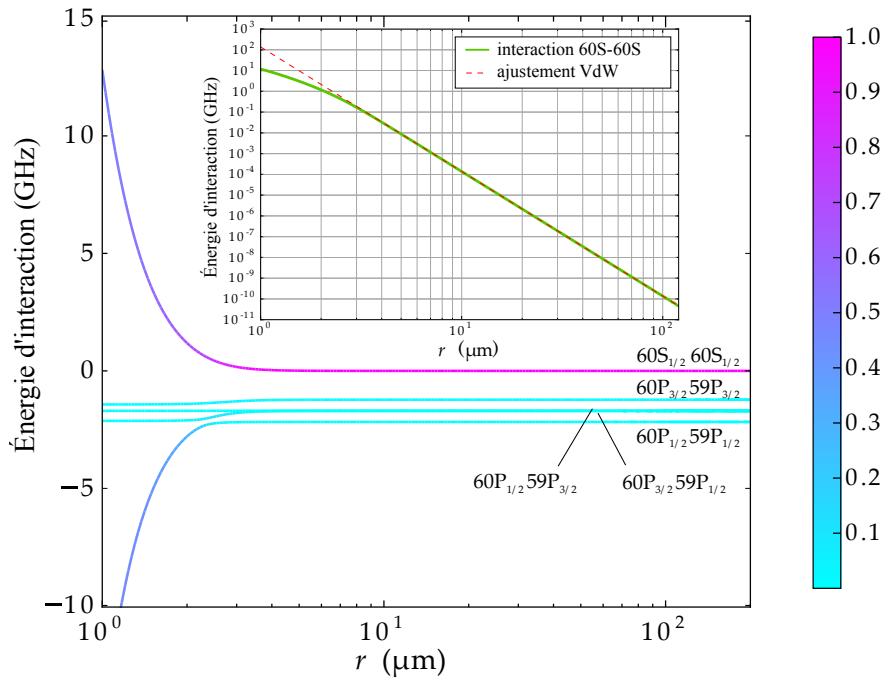
### I.3.4 Les interactions dipolaires du niveau 60S

#### L'interaction 60S-60S

Dans le cas de l'état  $|60S, 60S\rangle$ , le terme dominant dans la somme (I.28) permettant de calculer le coefficient de Van der Waals  $C_{6,60S60S}$  est le couplage avec les paires  $|60P_j, 59P_j\rangle$ . Puisque  $E_{60S} - E_{59P} > E_{60P} - E_{60S}$ , le dénominateur du terme de couplage principal dans (I.28) est positif. On en déduit que l'interaction 60S-60S, et plus généralement toute interaction dipolaire nS-nS, est toujours répulsive. Le calcul numérique de l'interaction 60S-60S et son ajustement sous la forme de Van der Waals, représentés en figure (I.12), donnent la valeur

$$C_{6,60S60S} = 137,6(1) \text{ GHz } \mu\text{m}^6. \quad (\text{I.36})$$

L'ajustement de Van der Waals fonctionne très bien aux distances supérieures à  $\sim 3 \mu\text{m}$ . Cependant, aux très courtes distances, la paire  $|60S, 60S\rangle$  est très fortement couplée aux niveaux  $|60P_j, 59P_j\rangle$ . La distance critique est celle à laquelle le couplage dipolaire est aussi fort que la différence d'énergie entre les deux états de paire non perturbés, soit ici  $\sim 2 \text{ GHz}$ . En deçà de cette distance, les états propres du hamiltonien s'éloignent de plus en plus de l'état non perturbé  $|60S, 60S\rangle$  et l'interaction évolue vers une interaction dipolaire résonante en  $1/r^3$ .



**Figure I.12** Déplacement en énergie de la paire 60S-60S par interaction de Van der Waals. Les différents sous-niveaux  $|60P_j, 59P_j\rangle$  sont représentés. L'échelle de couleur représente le carré de la projection sur l'état non perturbé  $|60S, 60S\rangle$ . L'insert représente le déplacement d'énergie en échelle log-log et son ajustement sous la forme de Van der Waals.

### Les interactions 60S-*nl*

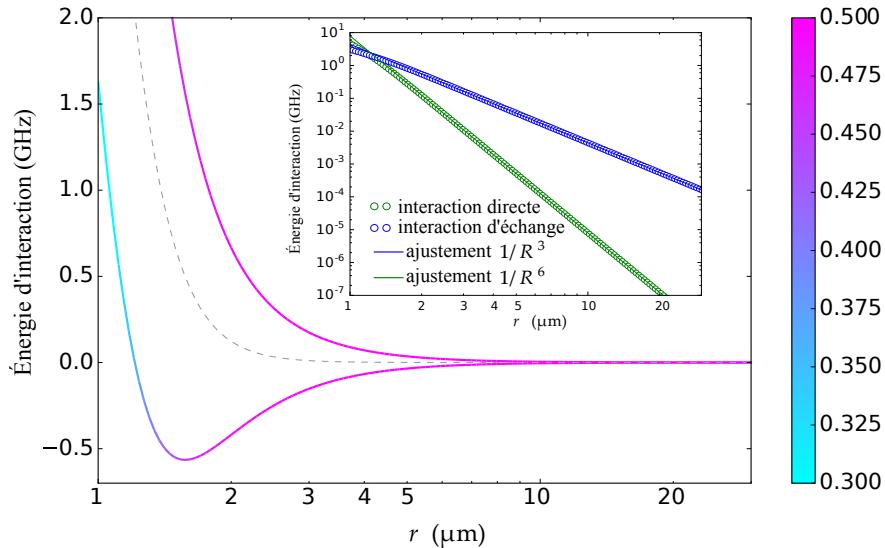
Le niveau 60S interagit également avec des états de  $n$  et  $l$  différents. Il convient alors, comme nous l'avons montré en (I.3.3), de calculer non seulement les coefficients de Van der Waals  $C_{ab}$ , mais aussi les éléments de matrice d'échange  $A_{ab}$ . De plus, il est possible ici d'avoir des termes d'échange dûs à un couplage dipolaire direct et qui varient donc en  $r^3$ .

La figure (I.13) montre par exemple le résultat du calcul de l'interaction dipolaire pour une paire 60S-60P<sub>3/2</sub>. Aux grandes distances, l'état de la paire est projeté uniformément sur les deux superpositions symétrique et anti-symétrique. Aux plus courtes distances cependant, d'autres niveaux contaminent la paire, qui n'est plus dans une superposition de  $|60S\rangle$  et  $|60P_{3/2}\rangle$ .

En procédant de la même façon, on peut obtenir les coefficients d'interaction dipolaire pour n'importe quelle paire 60S-*nl*. La table (I.4) synthétise les résultats des calculs numériques pour plusieurs paires contenant le niveau 60S.

#### I.3.5 Les interactions dipolaires du niveau 50C

L'interaction dipolaire entre atomes de Rydberg de très grand moment cinétique est rendue plus complexe du fait de leur forte anisotropie. En effet, l'interaction entre deux dipôles dépend de l'orientation relative de ceux-ci. Dans le cas des niveaux  $l = 0$  tel que le 60S, le problème ne se pose pas car ces niveaux sont à symétrie sphérique. Dès lors que l'on s'intéresse à l'interaction entre des niveaux à symétrie cylindrique, il



**Figure I.13** Énergie de la paire  $60S-60P_{3/2}$  en présence de l’interaction dipolaire. Les branches inférieure et supérieure correspondent respectivement aux superpositions symétrique et antisymétrique des deux niveaux de départ. L’échelle de couleur représente le carré de la projection sur l’état non perturbé  $|60S, 60P_{3/2}\rangle$ . La ligne pointillée représente le déplacement en énergie dû à l’interaction directe. L’insert représente le déplacement d’énergie ainsi que le terme d’échange en échelle log-log et leurs ajustements en  $1/r^6$  et  $1/r^3$  respectivement.

**Table I.4** Coefficients de Van der Waals pour les interactions de paire entre le niveau  $60S$  et différents niveaux voisins  $nl$ .

|                        | $C_6$ (GHz $\mu\text{m}^6$ ) | $A_6$ (GHz $\mu\text{m}^6$ ) | $A_3$ (GHz $\mu\text{m}^3$ ) |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| $60S_{1/2}, 60S_{1/2}$ | 137,6                        | 0                            | 0                            |
| $60S_{1/2}, 57S_{1/2}$ | -43,265                      | 0,325                        | 0                            |
| $60S_{1/2}, 61S_{1/2}$ | 290,125                      | 246,475                      | 0                            |
| $60S_{1/2}, 60P_{3/2}$ | 7,976                        | 0                            | 4,411                        |

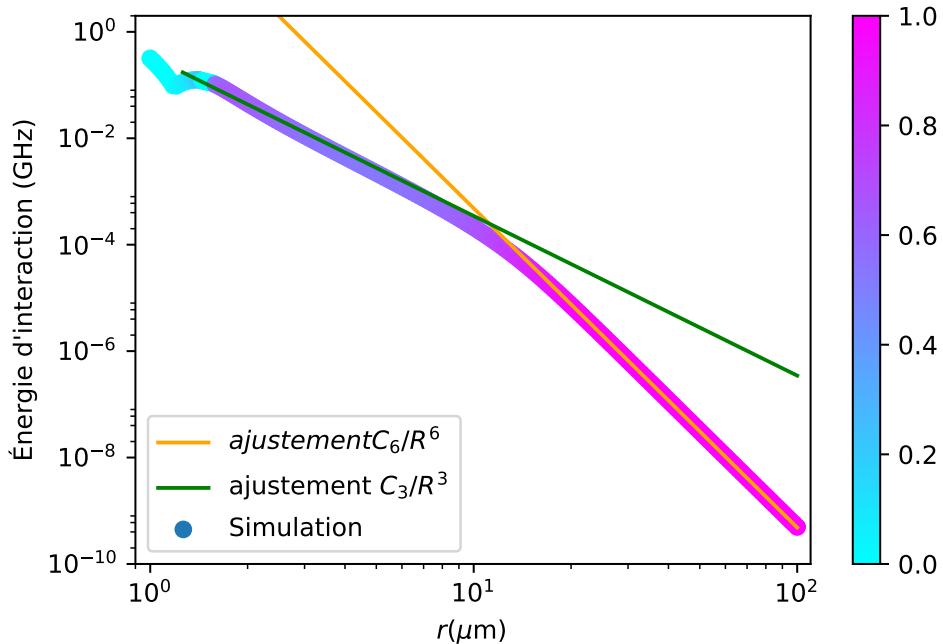
est indispensable de savoir comment les atomes s’orientent l’un par rapport à l’autre. L’interaction dipolaire entre atomes circulaires est encore compliquée par l’introduction d’un champ électrique extérieur, qui déplace et déforme les niveaux par effet Stark. Le détail de l’interaction dipolaire entre atomes circulaires en présence d’un champ sera discuté au chapitre IV, mais nous prendrons le temps ici de développer la situation la plus simple : celle de deux atomes dans le niveau  $50C$  dont les deux orbites sont contenues dans le même plan, comme l’illustre la figure (I.14). Comme il a été dit en I.2, les atomes de Rydberg circulaires ont besoin d’un champ électrique extérieur pour se stabiliser. Nous imposerons donc un champ de  $1\text{ V/cm}$ , qui définit l’axe de quantification, parallèle aux flèches rouges sur la figure (I.14).

Les règles de sélection étant toujours valides, le couplage se fait *a priori* à l’ordre deux, et l’équation (I.28) permet d’en extraire le coefficient de Van der Waals comme nous l’avons fait pour l’interaction  $60S-60S$ . Cependant, l’équation (I.27) ne prend plus



**Figure I.14** Représentation de deux atomes de Rydberg circulaires dont les orbites sont dans le même plan. Les tores bleus représentent les orbites électroniques et les flèches rouges la direction du moment cinétique. Si l'on imagine que le dessin est à l'échelle, alors les atomes sont ici séparés d'une distance d'environ 660 nm .

la même forme dans la base parabolique et le moment magnétique total  $M$  de la paire atomique n'est plus conservé, ce que doit prendre en compte le calcul numérique.



**Figure I.15** Déplacement en énergie de la paire 50C-50C placés côte à côte (cf fig(I.14)) par interaction dipolaire, sous un champ électrique de 1 V/cm. L'échelle de couleur représente le carré de la projection sur l'état non perturbé  $|50C, 50C\rangle$  de l'état propre du hamiltonien qui le suit adiabatiquement. Le comportement dévie franchement de la forme de Van der Waals en  $1/r^6$  dès que la distance interatomique est inférieure à 10  $\mu\text{m}$  .

La figure (I.15) présente le résultat du calcul numérique. Aux grandes distances, l'énergie d'interaction varie bien en  $1/r^6$  comme on l'attend, avec un coefficient de Van der Waals

$$C_{6,50C50C}(1 \text{ V/cm}) = 483,17 \text{ GHz } \mu\text{m}^6 . \quad (\text{I.37})$$

Mais dès que les atomes se rapprochent à une distance inférieure à  $10 \mu\text{m}$ , l'énergie d'interaction varie en  $1/r^3$  jusqu'à très courte distance. En effet, lorsque l'interaction dipolaire devient suffisamment forte, le champ électrique extérieur ne suffit plus à définir le plan des orbites, et le niveau de paire est perturbé. C'est ce que l'on retrouve sur la coloration de la courbe : à une distance critique de l'ordre de  $10 \mu\text{m}$  le niveau de la paire s'éloigne du niveau non perturbé  $|50\text{C}, 50\text{C}\rangle$ . La paire est alors dans un état superposé de plusieurs  $|nmk, n'm'k'\rangle$ , entre lesquels apparaissent des couplages dipolaires résonants en  $1/r^3$ . Ce problème sera traité en détail dans le chapitre IV, lorsque nous nous intéresserons aux conditions dans lesquelles les interactions entre atomes circulaires sont les plus avantageuses pour la simulation quantique.

Si l'on approche encore les deux atomes, à des distances inférieures à  $2 \mu\text{m}$ , la base des états propres du hamiltonien de paire devient très différente de la base des états non perturbés. Il est alors très difficile de décrire simplement l'interaction dipolaire.

## Conclusion

Nous avons dans ce chapitre présenté les caractéristiques physiques principales des atomes de Rydberg alcalins. Nous avons utilisé la théorie du défaut quantique afin de décrire les niveaux de Rydberg de faible moment cinétique. Ceux-ci dévient en effet du modèle de l'atome d'hydrogène par les effets de pénétration et de polarisabilité du cœur atomique, ce que permet de corriger le défaut quantique. Ainsi nous avons pu décrire le niveau  $60\text{S}$ , en donnant la forme de sa fonction d'onde, sa taille et sa durée de vie radiative à différentes températures.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux niveaux de Rydberg circulaires, qui semblent être de meilleurs candidats pour la simulation quantique grâce à leur temps de vie plus long. La théorie du défaut quantique n'est plus nécessaire pour décrire les niveaux circulaires. Cependant, l'introduction de la base des états paraboliques est d'une grande aide à leur description, en particulier en présence d'un champ électrique. Nous avons ainsi pu décrire le niveau de Rydberg circulaire  $50\text{C}$ , qui présente un temps de vie à température nulle de presque 30 ms.

En dernier lieu, nous avons vu comment les atomes de Rydberg interagissent entre eux par interaction dipolaire. À grande distance, l'interaction dipolaire entre deux atomes de Rydberg prend la forme de Van der Waals avec une dépendance en  $C_6/r^6$ , où  $r$  est la distance entre les deux atomes. Nous avons pu déterminer les coefficients de Van der Waals  $C_6$  pour l'interaction entre une paire d'atomes dans les niveaux  $|60\text{S}, 60\text{S}\rangle$ ,  $|60\text{S}, \text{nl}\rangle$  et  $|50\text{C}, 50\text{C}\rangle$ , en diagonalisant à chaque fois le hamiltonien complet du système pour toutes les distances  $r$ . Aux distances très courtes, lorsque l'interaction dipolaire devient comparable aux différences d'énergie entre les niveaux de Rydberg, les niveaux de Rydberg se mélangent et l'interaction dipolaire ne peut plus être traitée simplement.

Les expériences que nous avons menées portent sur l'étude de l'interaction dipolaire entre atomes de Rydberg. Il nous a fallu pour cela mettre en œuvre un dispositif expérimental que nous présentons dans le prochain chapitre.



## Chapitre II

# Des atomes de Rydberg froids en environnement cryogénique

L'observation d'atomes de Rydberg en interaction sur des temps longs, tant pour la question du mouvement d'un gaz de Rydberg ultra-froids que dans l'optique de la simulation quantique, requiert des conditions expérimentales spécifiques. D'une part, il est souhaitable que la durée de vie des niveaux de Rydberg soit la plus longue possible, ce qui nous pousse à travailler en environnement cryogénique. Les calculs menés dans le chapitre I nous montrent l'importance de la température de l'environnement sur la durée de vie des atomes de Rydberg, plus cruciale encore si l'on souhaite travailler avec des atomes de Rydberg circulaires.

D'autre part, il est nécessaire, étant donnés nos objectifs, que nos atomes de Rydberg soient aussi froids que possible. L'on pourrait imaginer piéger et refroidir des atomes qui auraient été préalablement excités dans des niveaux de Rydberg à partir d'un jet atomique chaud. Cependant, il n'y a pas de technique connue à ce jour qui permette cela, et la durée de vie des niveaux de Rydberg en limiterait très certainement les possibilités. Or les techniques de piégeage et de refroidissement des atomes alcalins non excités sont des outils bien maîtrisés. Voilà donc une piste bien plus prometteuse.

Une première difficulté se présente ici : les techniques d'atomes ultra-froids sont pour la plupart développées au sein de dispositifs à température ambiante. Il s'agira donc ici de les concilier avec un environnement cryogénique. Avec cette contrainte à l'esprit, et dans l'optique d'obtenir des nuages atomiques très confinés, il a été choisi de centrer le dispositif autour d'une puce à atomes supraconductrice. Prenons note dès maintenant d'une deuxième difficulté technique posée par un tel dispositif : les atomes de Rydberg sont extrêmement sensibles au champ électromagnétique, et nous souhaitons les exciter et les observer au voisinage de la surface conductrice qu'est notre puce atomique.

Ce chapitre sera donc dédié à la description du dispositif expérimental sur lequel nous avons effectué nos travaux. Nous nous intéresserons d'abord à l'aspect du dispositif qui nous sert à piéger et refroidir des atomes de  $^{87}\text{Rb}$  sur une puce atomique supraconductrice. Nous nous attacherons ensuite à décrire comment nous excitons, manipulons et détectons les atomes de Rydberg au sein de ce dispositif.

## II.1 Un nuage d'atomes ultra-froids sur puce, du MOT de capture au condensat de Bose-Einstein

Le développement de notre plateforme d'atomes froids autour d'une puce supraconductrice a été l'objet de plusieurs thèse de doctorat précédent celle-ci. Les thèses de Thomas Nirrengarten [18], de Cédric Roux [19] et d'Andreas Emmert [20] sont dédiées à la question du piégeage et du refroidissement jusqu'au BEC d'atomes de  $^{87}\text{Rb}$  près d'une surface à l'aide de fils supraconducteurs. La thèse de Raul Celistrino Teixeira [21] détaille la fabrication et les caractéristiques de la puce atomique que nous avons utilisée pour nos expériences.

Nous ferons donc ici une présentation rapide du cryostat et de la puce à atomes que nous utilisons, puis nous détaillerons la suite d'étapes que nécessite le piégeage et le refroidissement des atomes de rubidium au sein de notre dispositif. Enfin, après avoir présenté la technique d'imagerie atomique par absorption, nous présenterons quelques chiffres typiques de nos nuages atomiques.

### II.1.1 L'environnement cryogénique : cryostat et puce à atomes supraconductrice

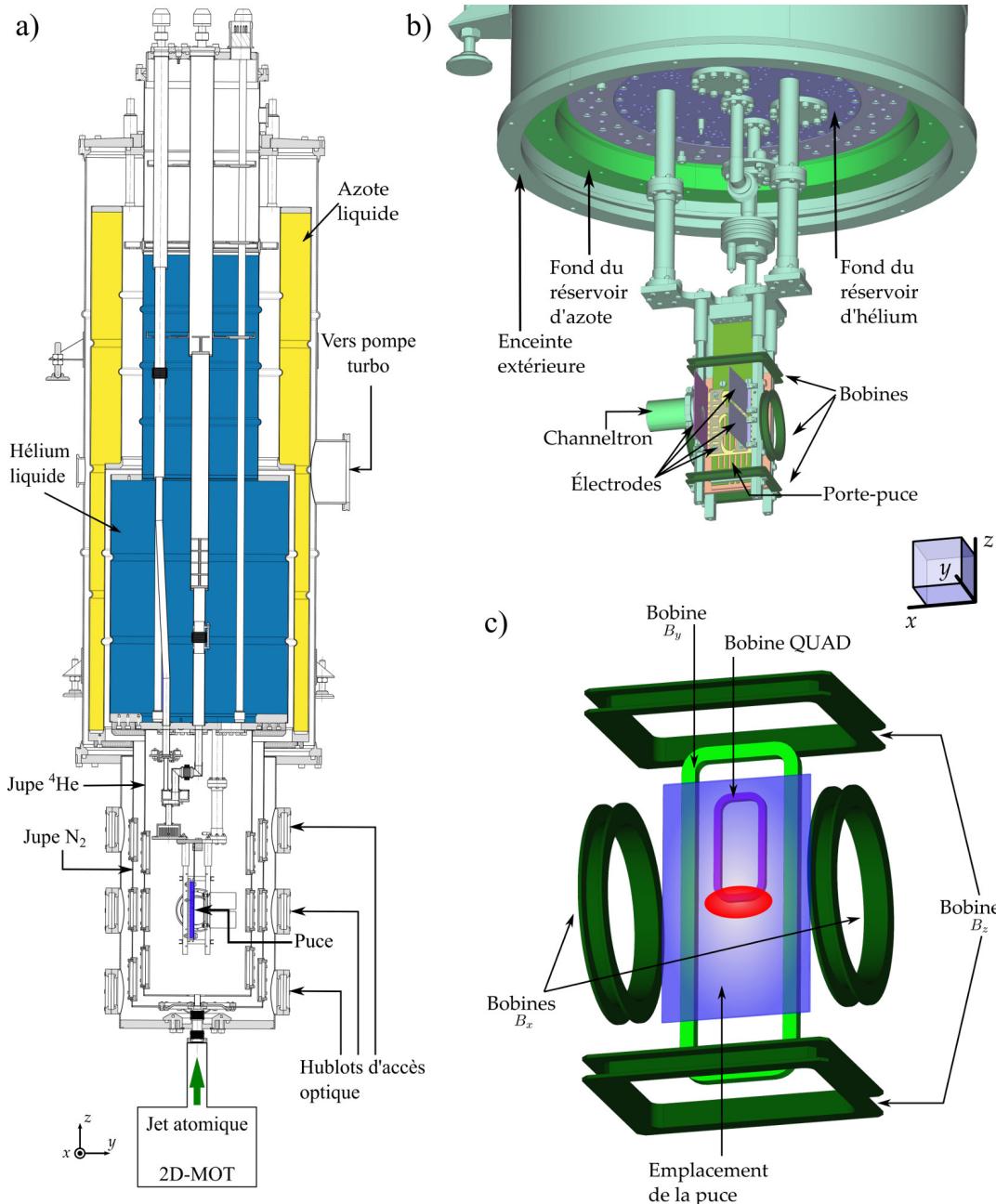
L'environnement cryogénique présente un avantage incomparable pour la durée de vie des atomes de Rydberg, mais impose aussi quelques spécificités à notre dispositif d'atomes froids. Le piégeage d'atomes froids pendant des durées suffisantes à leur manipulation exige un vide très poussé dans l'enceinte expérimentale, car les collisions avec les molécules de gaz résiduel éjectent les atomes hors de leur piège. Les chambres de piégeage d'atomes neutres à température ambiante sont généralement étuvées pendant plusieurs semaines afin d'atteindre des pressions de gaz résiduel suffisamment faibles. Dans un environnement cryogénique au contraire, les parois froides de l'enceinte adsorbent une grande partie du gaz résiduel, et des pressions très inférieures à  $1 \times 10^{-10}$  mbar sont obtenues sans étuvage. Travailler en environnement cryogénique permet en outre l'utilisation de fils et de bobines supraconducteurs pour le passage des courants électriques qui génèrent les champs magnétiques nécessaires au piégeage des atomes. Des courants de quelques Ampères sont ainsi passés sans dissipation et à proximité des atomes piégés, alors qu'une expérience d'atomes froids à température ambiante nécessite des bobines qui soient placées en-dehors de la chambre et refroidies par des circuits d'eau dédiés.

L'environnement cryogénique pour les atomes froids a cependant quelques inconvénients : en premier lieu, l'accès optique est limité car les parois de l'enceinte doivent être opaques pour le rayonnement du corps noir et donc métalliques, chaque hublot de verre réduisant l'isolation thermique du cœur de l'expérience. En second lieu, l'utilisation d'hélium et d'azote liquide à proximité d'un vide poussé présente une lourdeur technique supplémentaire au quotidien.

#### Le cryostat

Notre expérience est placée au cœur du cryostat représenté en figure (II.1). La conception de ce cryostat a été évoquée dans la thèse de Raul Celistrino Teixeira [21] et discutée plus en détail dans les thèses de Thomas Nirrengarten [18] et Cédric Roux

II.1. Un nuage d'atomes ultra-froids sur puce, du MOT de capture au condensat de Bose-Einstein29



**Figure II.1** Schéma du dispositif cryogénique : a) Coupe du cryostat, avec la puce (colorée en violet) tournée vers le côté droit. Le réservoir d'azote liquide est indiqué en jaune, le réservoir d'hélium liquide en bleu. Le cœur de l'expérience est visible, ainsi que les deux « jupes » et l'enceinte extérieure à température ambiante. Cinq hublots, trois en face de la puce et un sur chaque côté, sont installés sur chacune de ces jupes pour l'accès optiques. Derrière la puce, du côté gauche du schéma, les hublots optiques sont remplacés par des disques métalliques. Les atomes proviennent du « 2D-MOT », une enceinte externe située sous le cryostat, où l'on réalise un piège magnéto-optique à deux dimensions. b) Vue schématique du cœur de l'expérience. La puce est fixée sur le porte-puce et fait face à la direction  $y$ . Les bobines (vert foncé) servent à créer des champs magnétiques pour le piégeage des atomes de rubidium. Le channeltron et les différentes électrodes représentées servent à la détection des atomes de Rydberg. On ne voit pas les « jupes » d'azote et d'hélium, ni l'enceinte extérieure. c) Vue de près des bobines : la bobine QUAD (mauve) génère un champ quadrupolaire pour faire un MOT sur puce. L'emplacement de la puce est représenté par le rectangle bleu devant la bobine QUAD et la bobine  $B_y$  (vert clair). La zone rouge indique l'endroit où les atomes de rubidium sont piégés, devant la puce. Les axes sont les mêmes qu'en b).

[19]. Le cœur de l’expérience est protégé de la radiation extérieure par des écrans thermiques (« jupes ») en cuivre doré. Ce sont des cylindres ouverts en haut et vissés sur le fond des réservoirs de liquides cryogéniques. La jupe  ${}^4\text{He}$  est vissée sur le fond du réservoir d’hélium 4 et la jupe  $\text{N}_2$  est vissée au fond du réservoir d’azote liquide. Elles sont donc respectivement thermalisées à 4,2 K et 77 K. Sur chaque jupe, cinq hublots sont installés pour l’accès optique à la zone de piégeage : deux sur les directions  $\pm x$ , un dans la direction  $+y$  qui fait face à la puce, et deux dans le plan  $yz$ , de part et d’autre du hublot de face sur les bissectrices des axes  $+y$  et  $\pm z$ , appelées direction  $\pm 45^\circ$  respectivement. Par ces hublots, tous les faisceaux laser atteignent la zone de piégeage au cœur de l’expérience. Tous les éléments qui sont installés à l’intérieur de la jupe hélium sont thermalisés à 4,2 K par contact thermique avec le réservoir d’hélium liquide.

L’intérieur de la jupe hélium est revêtu d’une couche de plomb, supraconducteur à 4,2 K. Cette couche de plomb écrante les champs magnétiques extérieurs par effet Meissner [22], et évite les courants de Foucault qui se créeraient dans les jupes en cuivre à l’allumage ou à l’extinction des courants dans les bobines. Il reste nécessaire cependant d’imposer un champ extérieur de compensation au moment du refroidissement, afin que la couche de plomb ne piége pas de lignes de champ magnétique provenant de l’environnement. Cette compensation du champ constant de l’environnement est réalisée à l’aide de grandes bobines placées à l’extérieur du cryostat.

Enfin, bien que les jupes ne soient pas parfaitement étanches, elles garantissent un vide différentiel entre la partie du cryostat à 300 K, où la pression vaut  $1,5 \times 10^{-7}$  mbar, et la partie à 4,2 K, où la pression est inférieure à  $1 \times 10^{-10}$  mbar \*.

## La puce à atomes

La puce à atome qui siège au cœur de notre expérience est représentée en figure (II.2). C’est une puce assez simple, conçue autour de trois fils supraconducteurs : le fil (LJ), en forme de  $\mathcal{U}$ , le fil (LG) en forme de  $\mathcal{Z}$ , et le fil (KM) droit. Ces fils sont fabriqués par dépôt de niobium d’une épaisseur de 2  $\mu\text{m}$  sur un substrat de silicium recouvert d’une couche d’oxyde  $\text{SiO}_2$ . Le dépôt de niobium est ensuite gravé, et l’ensemble de la puce est recouvert d’une couche d’or de 200 nm d’épaisseur afin de rendre la surface réfléchissante. Le niobium étant supraconducteur à 4,2 K, les courants électrique pourront toujours passer par les fils de la puce et non par la couche d’or qui reste dans un état conducteur normal. Les détails de la fabrication de la puce sont présentés en annexe dans la thèse de Raul Celistrino Teixeira [21].

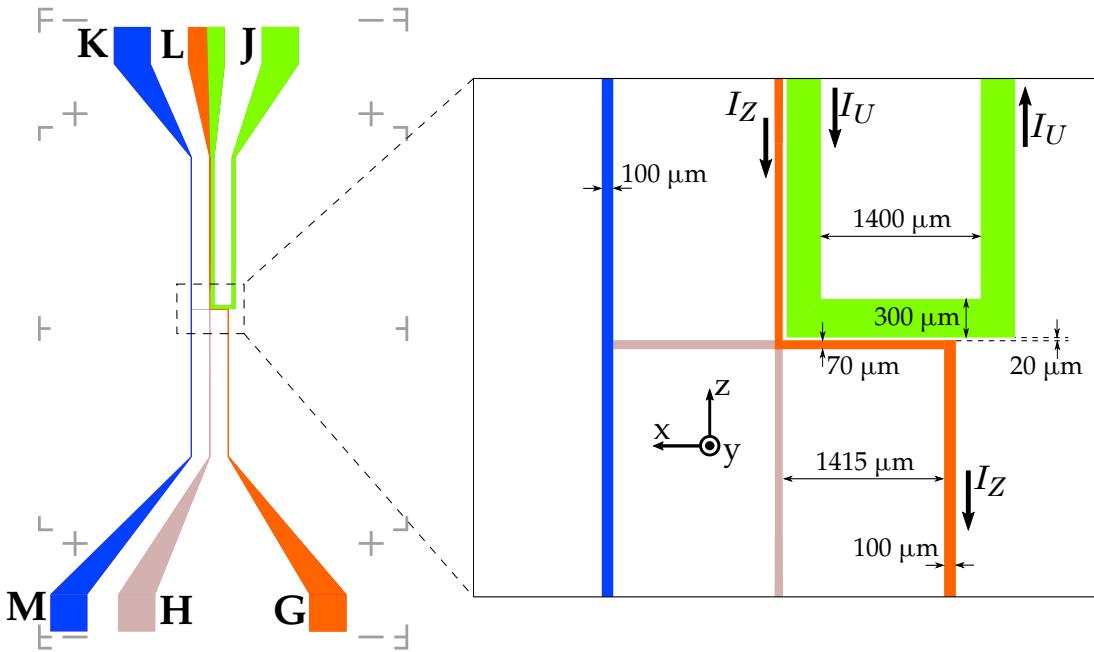
Les fils en  $\mathcal{U}$  et en  $\mathcal{Z}$  sont la simplification d’un dispositif en forme de  $\mathcal{H}$  qui repose sur la circulation d’un premier courant perpendiculairement à deux autres courants qui sont parallèles entre eux. La figure (II.3) représente les différentes configurations de champ magnétique créées par les fils  $\mathcal{U}$  et  $\mathcal{Z}$  de la puce.

Le passage d’un courant dans la partie horizontale du fil  $\mathcal{U}$  (segment parallèle à l’axe  $x$ ) crée un champ contenu orienté dans le plan  $yz$ , que l’on peut approximer au champ créé par un fil infini. L’ajout d’un champ de biais  $B_z$  selon l’axe  $z$  permet alors de créer un zéro de champ, là où le champ de biais compense exactement le champ créé par le fil. Autour de ce zéro, le champ magnétique est quadrupolaire dans le

---

\*. Cette valeur n’est pas mesurée en raison de l’absence de sonde de pression dans cette région du cryostat, mais inférée à partir du temps de vie des nuages d’atomes piégés, qui est de l’ordre de la minute [23].

## II.1. Un nuage d'atomes ultra-froids sur puce, du MOT de capture au condensat de Bose-Einstein31



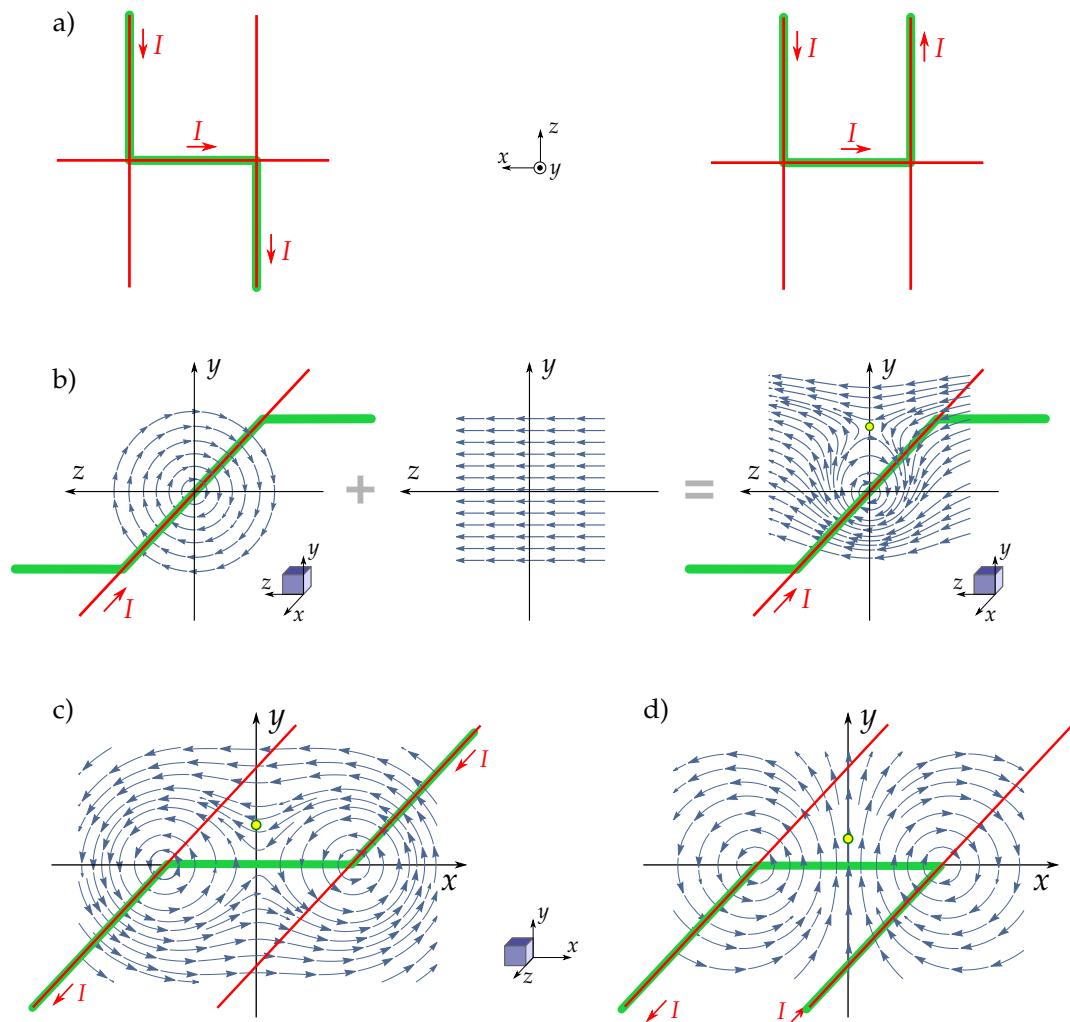
**Figure II.2** Schéma de la puce supraconductrice. Les lettres étiquettent les pattes d'entrée/sortie des courants électriques sur la puce. Les couleurs sont une aide visuelle pour mieux suivre les fils : en vert, le « fil  $\mathcal{U}$  », en orange le « fil  $\mathcal{Z}$  » et en bleu le « fil RF ». À droite, vue de près du centre de la puce, qui détaille la largeur des fils, la distance entre eux et le sens de circulation des courants. Les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  coïncident avec ceux de la figure (II.1).

plan  $yz$  (cf figure II.3b)). Afin de compléter ce champ quadrupolaire dans la direction  $x$ , un courant parcourt les bras verticaux du fil en  $\mathcal{U}$  : le sens opposé de circulation dans ces deux bras crée directement un champ quadrupolaire dans la direction  $x$  avec un minimum nul (cf figure II.3d)). La composante de champ résiduelle selon  $y$  est compensée par un champ de biais  $B_y$ . En fin de compte, le champ magnétique présente un comportement quadrupolaire dans les trois directions, autour d'un minimum nul dans les trois directions. Le champ total permet ici la réalisation d'un piège magnéto-optique sur puce en trois dimensions (« 3D-MOT miroir »).

Lors du passage d'un courant  $I$  dans le fil  $\mathcal{Z}$ , le champ créé dans le plan  $yz$  est similaire au cas du fil en  $\mathcal{U}$ . Cependant, le courant dans les deux bras verticaux circule dans le même sens et crée ainsi un champ quadrupolaire dans le plan  $xy$ . Le champ magnétique présente donc aussi un comportement quadrupolaire dans les trois directions, mais autour d'un minimum qui est cette fois non-nul (cf figure II.3c)). Le champ total forme alors un piège magnétique de Ioffe-Pritchard.

Pour le fil en  $\mathcal{Z}$  comme pour le fil en  $\mathcal{U}$ , le centre du piège se situe à une distance de la puce valant approximativement

$$r_0 \simeq \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{B_Z} \quad (\text{II.1})$$



**Figure II.3** Champs magnétiques créés par la puce. a) Les fils  $\mathcal{U}$  et  $\mathcal{Z}$  portent un courant dans la direction  $x$  et une paire de courants parallèles dans la direction  $z$ . b) Un champ quadripolaire est créé par la superposition du courant selon  $x$  et d'un champ de biais  $B_Z$ . Les courants verticaux peuvent circuler soit (c)) dans le même sens, soit (d)) dans des sens opposés. Le module du champ total présente alors respectivement un minimum non-nul ou nul aux positions marquées par les points jaunes.

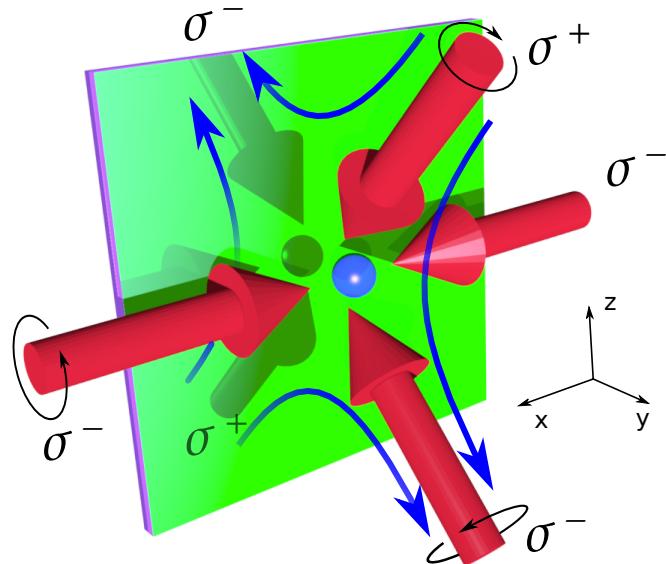
## II.1. Un nuage d'atomes ultra-froids sur puce, du MOT de capture au condensat de Bose-Einstein33

et le gradient de champ magnétique à cet endroit vaut

$$|B'(r_0)| = \frac{2\pi}{\mu_0} \frac{B_Z^2}{I} = \frac{B_Z}{r_0} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r_0^2}. \quad (\text{II.2})$$

C'est là une caractéristique importante de la géométrie des pièges : plus le centre du piège est proche de la puce, plus le piège sera confinant dans le plan  $yz$ . Le piège s'allonge alors dans la direction  $x$ , prenant une forme de cigare de plus en plus anisotrope.

Comme nous l'avons mentionné, notre dispositif nous permet de mettre en œuvre des pièges magnéto-optiques en trois dimensions. Dans beaucoup d'expériences d'atomes froids, ceux-ci sont réalisés à l'aide de trois paires de faisceaux laser contra-propageants, une dans chaque direction de l'espace. Il nous est impossible d'envisager cette configuration, puisque l'axe  $y$  est rendu inaccessible par la présence de la puce. L'on peut cependant, avec deux paires de faisceaux laser seulement, simuler une configuration à six faisceaux, en utilisant la surface réfléchissante de la puce. Deux faisceaux sont alors envoyés parallèlement à la surface de la puce, selon l'axe  $x$ . Deux autres faisceaux sont envoyés dans le plan  $yz$  et viennent se réfléchir sur la puce avec un angle de  $45^\circ$ . Ces réflexions sont équivalentes aux deux faisceaux manquants, réalisant ainsi la configuration à six faisceaux souhaitée. Le schéma de cette configuration, appelée « MOT miroir », est donné en figure (II.4).



**Figure II.4** Schéma de principe du MOT miroir : Deux faisceaux contra-propageants sont envoyés parallèlement à la puce réfléchissante, selon l'axe  $x$ . Les deux autres faisceaux dans le plan  $yz$  viennent frapper la puce avec un angle de  $45^\circ$ . Leur réflexion sur la puce équivaut à deux faisceaux supplémentaires d'hélicité inversée, représentés en ombre derrière la puce. On obtient bien ainsi une configuration de MOT à six faisceaux, avec les polarisations adaptées, représentées par des flèches tournant autour des faisceaux.

### II.1.2 Séquence de piégeage et refroidissement

Grâce à ce dispositif, nous pouvons piéger des nuages d'atomes froids sur puce. Nous donnons dans ce paragraphe le détail des différentes étapes de piégeage et de refroidissement des atomes. Les atomes sont envoyés dans le cryostat à partir d'un piège magnéto-optique à deux-dimensions externe, puis ils sont capturés dans deux pièges magnéto-optiques sur puce successifs. Enfin, les atomes sont transférés dans un piège magnétique pour y être refroidis par évaporation. L'ensemble de cette séquence est représentée en figure II.5.

#### Système laser

Le piégeage magnéto-optique du rubidium 87 exploite la raie D2 de celui-ci. La raie D2 est représentée en figure (II.6) avec le détail des sous-niveaux hyperfins des niveaux  $5S_{1/2}$  et  $5P_{3/2}$  du  $^{87}\text{Rb}$ . Nous utilisons la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$  de la raie D2 pour piéger et refroidir les atomes. Cette transition a une largeur naturelle  $\Gamma = 2\pi \times 6,065 \text{ MHz}$  [24]. Le laser de refroidissement est généré par un système commercial de diode laser amplifiée TOPTICA TA-110. La fréquence de ce laser est asservie par battement (« beatlock ») à un laser maître, lui-même stabilisé par une cavité Fabry-Pérot. Cette cavité est verrouillée en fréquence sur la transition de refroidissement par absorption saturée dans une cellule de  $^{87}\text{Rb}$ . Une commande de tension permet de définir la fréquence du battement et ainsi de contrôler le désaccord du laser de refroidissement par rapport à la transition  $|F = 2\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$ . Le système laser est détaillé en annexe A.

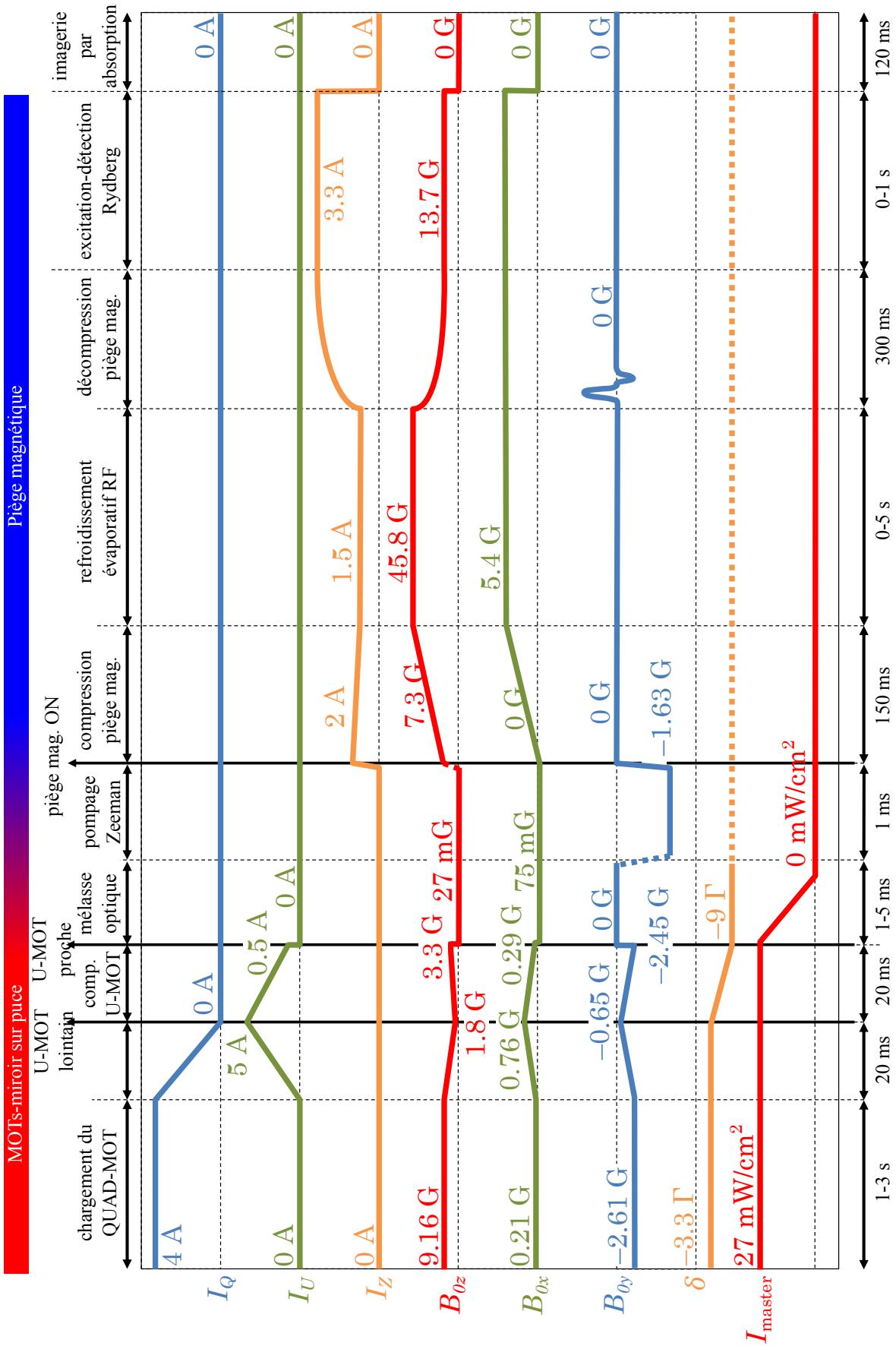
Il arrive qu'un photon du laser de refroidissement excite un atome du niveau  $|F = 2\rangle$  vers le niveau  $|F' = 2\rangle$  au lieu de  $|F' = 3\rangle$ . Cet atome peut alors se désexciter non pas vers le niveau  $|F = 2\rangle$  mais vers le niveau  $|F = 1\rangle$ , qui est un niveau noir pour le laser de refroidissement. Afin d'éviter le pompage des atomes vers ce niveau  $|F = 1\rangle$ , il est nécessaire d'envoyer, avec le laser de refroidissement, un laser « repompeur » accordé sur la transition  $|F = 1\rangle \rightarrow |F' = 2\rangle$ . Ce laser repompeur est généré par une troisième diode laser, et indépendamment verrouillé en fréquence par absorption saturée.

Deux autres fréquences laser sont utilisées dans notre expérience : les lasers de sonde, qui servent à l'imagerie atomique, et le laser de pompage Zeeman, qui sert à réaliser un pompage optique vers le niveau  $|F = 2, m_F = +2\rangle$ . Ces faisceaux sont prélevés sur le laser de refroidissement et décalés en fréquence par modulation acousto-optique. L'ensemble des faisceaux est transporté de la table optique de préparation au cryostat par des fibres optiques mono-modes à maintien de polarisation. Ils sont enfin mis en forme à proximité immédiate du cryostat.

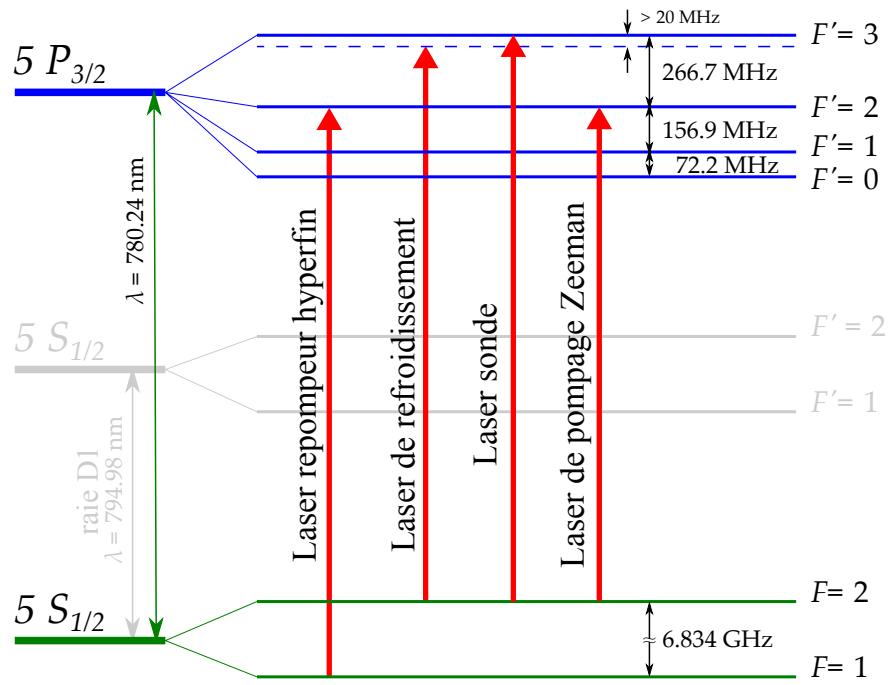
#### Piégeage magnéto-optique

Notre dispositif repose sur trois stades de piégeage magnéto-optique successifs. Les atomes de rubidium sont stockés dans une cellule en verre, ouverte vers une enceinte sous ultra-vide (UHV) située à l'extérieur du cryostat. Le travail en environnement cryogénique nous oblige en effet à utiliser une source externe : l'adsorption sur les surfaces froides à l'intérieur du cryostat interdit la présence d'une vapeur de rubidium à partir de laquelle capturer les atomes. Dans cette enceinte, les atomes sont piégés le long de l'axe  $z$  par un piège magnéto-optique à deux dimensions (« 2D-MOT »).

## II.1. Un nuage d'atomes ultra-froids sur puce, du MOT de capture au condensat de Bose-Einstein35



**Figure II.5** Séquence expérimentale typique. Les étapes de piégeage et de refroidissement sont décrites par la suite.  $I_{Q,U,Z}$  sont les courants dans la bobine QUAD, le fil  $U$  et le fil  $Z$ , en Ampères.  $B_{0x,y,z}$  sont les champs de biais générés par les bobines dans les directions  $x, y, z$ , en Gauss.  $\delta$  est le désaccord du laser en unité de la largeur de raie  $\Gamma = 6,065 \text{ MHz}$ , et  $I_{master}$  son intensité en  $\text{mW/cm}^2$ .

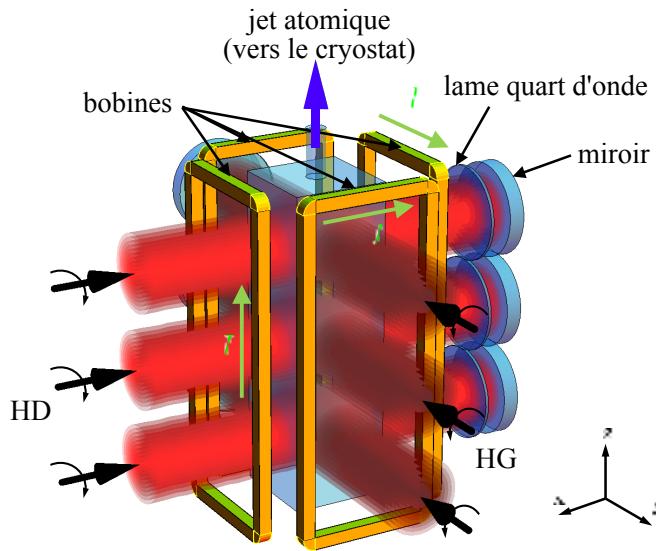


**Figure II.6** Structure hyperfine de la raie D2 du  $^{87}\text{Rb}$ . Les transitions cyclantes sont montrées pour le laser de refroidissement, le laser repompeur, le laser sonde et le laser de pompage Zeeman.

Celui-ci est schématisé en figure (II.7). L'ensemble du 2D-MOT a été conçu et fabriqué par la laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris.

Les atomes piégés dans le 2D-MOT se propagent librement selon l'axe  $z$ , formant un jet vertical qui arrive jusqu'à la puce atomique à l'intérieur du cryostat. Les atomes sont alors capturés dans un MOT de grand volume créé par les bobines de biais et le bas de la bobine « QUAD », représentée en figure (II.1). Le bas de la bobine QUAD permet de créer un champ quadrupolaire similaire à celui du fil  $\mathcal{U}$ , adapté au piégeage magnéto-optique. Le nombre de spires  $n = 19$  de la bobine permet de multiplier par autant le courant générateur de champ dans l'équation (II.1). Le grand volume du champ quadrupolaire ainsi créé permet de capturer efficacement les atomes du jet. Le chargement de ce gros « QUAD-MOT » dure de 1 à 3 s, pendant lesquels on peut y collecter quelques  $10^8$  atomes à une température de l'ordre de  $400 \mu\text{K}$ .

Le nuage atomique est alors transféré vers un second MOT, créé cette fois par les bobines de biais et le fil  $\mathcal{U}$ , comme nous l'avons mentionné en II.1.1. Ce « U-MOT lointain » présente des gradients similaires au QUAD-MOT mais un volume plus petit. Le taux de transfert entre les deux est estimé entre 10 et 40 % par des observations en fluorescence du nuage. Nous pouvons à ce moment réduire le courant dans le fil  $\mathcal{U}$ , ce qui d'après les équations (II.1) et (II.2) rapproche le piège de la surface de la puce et le comprime en augmentant les gradients de champ magnétique. Les gradients de champ étant plus forts, la force de rappel de la lumière s'en trouve grandie. On peut alors se permettre d'augmenter le désaccord des faisceaux lasers afin de refroidir le nuage atomique. Les températures atteintes dans ce « U-MOT proche » sont de l'ordre de  $40 \mu\text{K}$ , pour un nuage d'environ  $10^7$  à  $10^8$  atomes.



**Figure II.7** Schéma du 2D-MOT avec ses trois étages de piégeage. Les polarisations des faisceaux incidents sont indiquées par les lettres HD (pour hélicité droite) et HG (hélicité gauche). Le sens des courants dans les bobines est indiqué par les flèches vertes et la lettre  $I$ . Chaque faisceau est rétro-réfléchi par un miroir, et le double passage par une lame quart d'onde permet de garantir la bonne polarisation du faisceau réfléchi. Le jet atomique produit par le 2D-MOT est représenté par une flèche violette qui pointe vers le cryostat.

### Les étapes intermédiaires : mélasse optique et pompage Zeeman

L'objectif, après les étapes de piégeage magnéto-optique, est de transférer les atomes dans le piège de Ioffe-Pritchard créé par le fil  $\mathcal{Z}$ . Cela sera d'autant plus efficace que le nuage atomique sera froid, et que les atomes seront bien polarisés dans le sous-niveau Zeeman  $m_F = +2$  du niveau hyperfin  $5S1/2, F = 2$ . Avant de les transférer vers le « piège Z », nous faisons donc subir aux atomes deux étapes supplémentaires.

Tout d'abord, nous éteignons les champs magnétiques du U-MOT en laissant les faisceaux lasers allumés. Cela initie une étape de mélasse optique d'une durée comprise entre 1 et 5 ms, au cours de laquelle le désaccord laser est augmenté alors que la puissance lumineuse est graduellement diminuée jusqu'à zéro. Cette mélasse optique nous permet de refroidir quelques  $10^6$  à  $10^7$  atomes à des températures inférieures à  $10 \mu\text{K}$ .

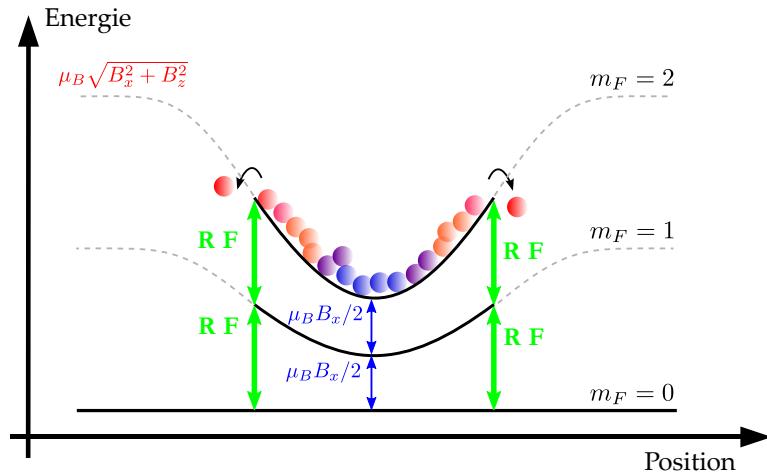
Après l'extinction des lasers de mélasse, un champ magnétique de 1 G à 2 G est rapidement allumé sur la direction  $-y$ , qui lève la dégénérescence des sous-niveaux Zeeman. Un laser de pompage optique polarisé  $\sigma^+$  se propageant selon  $-y$  pompe alors les atomes dans le sous-niveau  $m_F = +2$ . Après réflexion sur la puce ce faisceau laser repasse à travers le nuage atomique. Son hélicité a certes été inversée par la réflexion, mais sa polarisation du point de vue des atomes est restée la même. Les atomes sont donc encore pompés vers le sous-niveau  $m_F = +2$ .

### Le piégeage magnétique et le refroidissement évaporatif

Lorsque le nuage atomique est bien refroidi et polarisé par les étapes de mélasse et de pompage optique, le piège magnétique est allumé. Pour cela, un courant est imposé

dans le fil  $\mathcal{Z}$ . Un champ  $B_z$  est généré par les bobines, qui permet d'obtenir un champ quadrupolaire comme nous l'avons évoqué en II.1.1, centré sur la position du nuage atomique. Le champ au centre du piège est alors orienté selon la direction  $x$  et le minimum de champ, strictement supérieur à 0, permet d'éviter les pertes de Majorana par retournement du spin. Un second champ de biais,  $B_x$ , permet en outre de limiter les pertes atomiques dues à la présence d'un bruit radio-fréquence dans notre expérience. Ce bruit peut en effet causer des transitions atomiques vers les états non piégés  $m_F < 1$  et il s'agit d'ajuster  $B_x$  afin d'éviter que les transitions ne soient résonantes avec la fréquence du bruit [18].

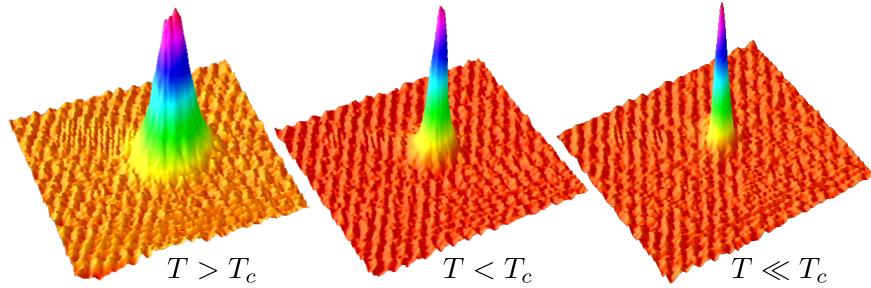
Une fois allumé, le piège magnétique est immédiatement comprimé afin d'augmenter le taux de collision entre les atomes en vue du refroidissement évaporatif. La compression du piège est réalisée adiabatiquement en 150 ms. Le piège comprimé a des fréquences de piégeage de l'ordre de  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) \simeq 2\pi \times (24, 3400, 3400)$  Hz à une distance de 80  $\mu\text{m}$  de la puce. Nous pouvons alors mettre en œuvre une séquence de refroidissement évaporatif radio-fréquence : les atomes les plus chauds sont transférés vers les sous-niveaux Zeeman non piégés par des transitions radio-fréquence (RF), et ainsi sont éjectés du piège. La fréquence de ces transitions dépend du champ magnétique vu par chaque atome, et donc de sa position dans le potentiel de piégeage. La fréquence du signal RF, envoyé dans le fil vertical (KM) de la puce (cf figure II.2), est progressivement diminuée afin d'évaporer les atomes les plus chauds en premier, puis de plus en plus froids. Le reste du nuage thermalise vite grâce au taux de collision élevé et se trouve ainsi refroidi. Plusieurs rampes de fréquence successives sont optimisées en durée et en puissance RF, afin d'obtenir le meilleur refroidissement du nuage atomique. L'étape de refroidissement évaporatif dure jusqu'à 5 s au total. Le schéma de principe du refroidissement évaporatif RF est donné en figure (II.8).



**Figure II.8** Refroidissement évaporatif radio-fréquence : le « couteau » RF induit les transitions entre sous-niveaux Zeeman. Une fois dans les sous-niveaux  $m_F < 1$ , les atomes ne sont plus piégés et sont éjectés du piège. L'aile chaude de la distribution de Boltzmann est évacuée et les atomes restants sont thermalisés à une température plus faible.

Cette étape de refroidissement nous permet d'abaisser la température du nuage sous le seuil de condensation de Bose-Einstein. Nous pouvons ainsi produire de façon repro-

ductible des condensats sur puce contenant de 10 000 à 20 000 atomes. La séquence de refroidissement peut également être interrompue avant la condensation, et en choisissant la fréquence finale de la rampe RF, nous pouvons choisir la température du nuage atomique. La figure (II.9) montre des images du nuage atomique après temps de vol pour différentes valeurs de la fréquence finale de la rampe RF.



**Figure II.9** Trois nuages de  $^{87}\text{Rb}$  évaporés jusqu'à des valeurs différentes de fréquence RF, imaginés après un temps de vol de 16,5 ms. Les images donnent directement la distribution d'impulsion au sein du nuage. Le nuage contient environ  $10^4$  atomes, et la température critique de condensation est de l'ordre de  $T_C = 100 \text{ nK}$ . À gauche, la température est supérieure à  $T_C$  : le nuage est purement thermique et montre une distribution gaussienne d'impulsion. Au milieu, la température est inférieure à  $T_C$ , le nuage montre un double profil en impulsions : un condensat de Bose-Einstein au centre et les atomes du nuage thermique autour. À droite, la température est très petite devant  $T_C$  et le condensat est quasi-pur : le nuage présente un profil de Thomas-Fermi dans l'espace des impulsions.

Enfin, une fois le nuage refroidi à la température souhaitée, le piège magnétique est décomprimé. Cela permet de choisir soit une distance particulière du nuage atomique à la puce, soit la taille du nuage atomique final.

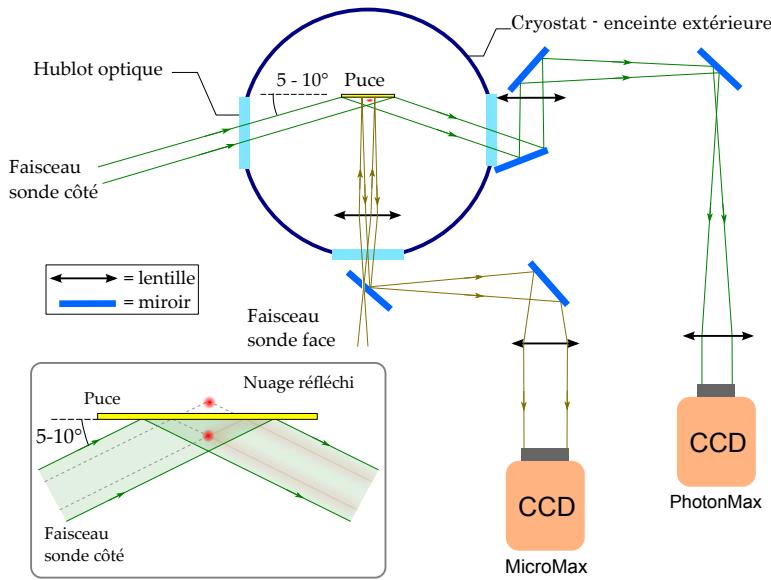
Les atomes qui seraient restés dans le sous-niveau  $m_F = +1$  peuvent à leur tour être éliminés du piège en envoyant sur le nuage un signal micro-onde à 6,8 GHz adressant la transition hyperfine  $|F = 2, m_F = 1\rangle \rightarrow |F = 1, m_F = 0\rangle$ . En présence d'un champ magnétique, les sous-niveaux Zeeman sont suffisamment résolus pour adresser uniquement cette transition, sans affecter les atomes dans le niveau  $|F = 2, m_F = +2\rangle$ .

### II.1.3 Imagerie atomique par absorption

Dans une expérience d'atomes froids, il est essentiel de pouvoir imager et dénombrer correctement le nuage atomique. L'imagerie par absorption est une technique précise et efficace pour cela. Lorsqu'une telle expérience est menée au cœur d'un cryostat, la tâche est rendue plus difficile en raison des accès optiques limités qui contraignent fortement l'optique d'imagerie.

#### Dispositif optique

Nous pouvons imaginer notre nuage atomique de deux façons différentes. Le dispositif optique d'imagerie est représenté en figure (II.10). Un premier faisceau sonde (« sonde face ») entre dans le cryostat et en ressort perpendiculairement à la puce après réflexion sur celle-ci, par le hublot de face. Un miroir percé permet de laisser passer le faisceau



**Figure II.10** Schéma optique des faisceaux sonde dans le cryostat. L'insert montre de plus près la réflexion du faisceau sonde côté sur la puce et la formation des deux images du nuage.

d'entrée et de collecter le faisceau de sortie, qui est ensuite envoyé vers une caméra CCD. Grâce à l'installation d'une lentille de focale  $f = 100$  mm à la place du hublot de face sur la jupe hélium du cryostat, soit à environ 100 mm de la puce, cet axe d'imagerie peut collecter beaucoup de lumière, avec une limite de résolution de  $1,6 \mu\text{m}$ .

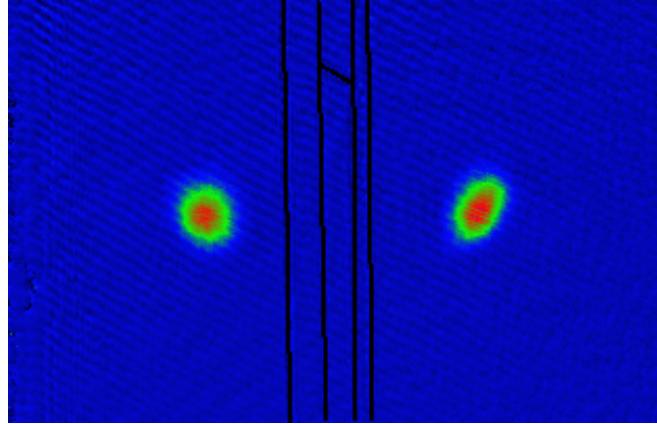
Un deuxième faisceau sonde (« sonde côté ») est envoyé par un hublot de côté ( $+x$ ), se réfléchit sur la puce avec un angle de  $5^\circ$  à  $10^\circ$ , et ressort par l'autre hublot de côté ( $-x$ ). Il est ensuite envoyé vers une autre caméra CCD. Cet axe d'imagerie ne dispose pas d'une lentille interne au cryostat. Ainsi, la lumière collectée et la résolution optique sont limitées par le diamètre du hublot de sortie du cryostat. Cette lentille est donc placée le plus près possible de l'enceinte du cryostat. En raison de cette géométrie, l'imagerie des atomes par la sonde côté forme deux images du nuage atomique : celui absorbe à la fois le faisceau incident et le faisceau réfléchi sur la puce. Cela nous permet d'évaluer précisément la distance du nuage atomique à la puce : elle vaut la moitié de la distance entre les deux images du même nuage. La figure (II.11) montre une image d'absorption de la sonde côté par un nuage froid (piégé magnétiquement et refroidi), après un temps de vol de 16,5 ms.

### Principe de l'imagerie par absorption

Les atomes peuvent être observés en temps réel par la collecte des photons qu'ils émettent par fluorescence, mais l'imagerie par absorption permet une meilleure précision sur l'estimation du nombre d'atome dans le nuage. Elle consiste à envoyer sur les atomes un faisceau laser, résonant avec une transition atomique choisie, et à mesurer quelle fraction de la lumière le nuage atomique a absorbé.

Lorsque l'intensité lumineuse reçue par les atomes est largement inférieure à l'intensité de saturation, l'absorption de celle-ci est bien décrite par la loi de Beer-Lambert :

## II.1. Un nuage d'atomes ultra-froids sur puce, du MOT de capture au condensat de Bose-Einstein41



**Figure II.11** Image par absorption d'un nuage froid après temps de vol, éclairé par la sonde de côté. Les deux images du nuage sont dues à la réflexion du faisceau sur la puce. Les ombres portées des fils de la puce sont tracées en surimpression entre les deux images du nuage.

$$\frac{dI(x, y, z)}{dx} = -\sigma n(x, y, z) I(x, y, z), \quad (\text{II.3})$$

où  $I(x, y, z)$  est l'intensité lumineuse au point de coordonnées  $(x, y, z)$ ,  $n$  la densité atomique en ce point,  $x$  la direction de propagation du faisceau lumineux et  $\sigma$  la section efficace de diffusion de la lumière par un atome unique. L'optique d'imagerie nous oblige cependant à intégrer cette équation dans la direction de propagation  $x$ . On obtient alors

$$I_f(y, z) = I_i(y, z) \cdot e^{-\int dx \sigma n(x, y, z)} \quad (\text{II.4})$$

où  $I_i$  est l'intensité du faisceau incident et  $I_f$  l'intensité du faisceau à la sortie du nuage atomique.

Les images enregistrées par les caméras permettent d'obtenir les quantités  $I_i(y, z)$  et  $I_f(y, z)$ . On peut alors calculer la densité optique du nuage, définie comme  $OD(y, z) = \int dx \sigma n(x, y, z)$ , et qui d'après l'équation (II.4) est égale à

$$OD(y, z) = \int dx \sigma n(x, y, z) = -\ln \frac{I_f(y, z)}{I_i(y, z)}. \quad (\text{II.5})$$

L'on en extrait ensuite la densité atomique intégrée le long de l'axe de propagation du laser à partir de l'équation (II.5) :

$$n(y, z) = \int dx n(x, y, z) = -\frac{1}{\sigma} \ln \frac{I_f(y, z)}{I_i(y, z)} = \frac{OD(y, z)}{\sigma}. \quad (\text{II.6})$$

Dans le cas simple d'une lumière résonante avec la transition non-dégénérée d'un système à deux niveaux, la section efficace de diffusion  $\sigma$  est donnée directement par

la section efficace de diffusion résonante

$$\sigma = \sigma_0 = \frac{3\lambda^2}{2\pi} = \frac{\Gamma\hbar\omega}{2I_{sat,0}}, \quad (\text{II.7})$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière résonante et  $I_{sat,0}$  l'intensité de saturation de la transition dans ce cas idéal. Les atomes dans notre piège magnétique sont préparés dans l'état  $|5S1/2, F = 2, m_F = +2\rangle$ , et la lumière de sonde est préparée de façon à adresser la transition  $\sigma^+$  vers le niveau  $|5P3/2, F = 3, m_F = +3\rangle$ .

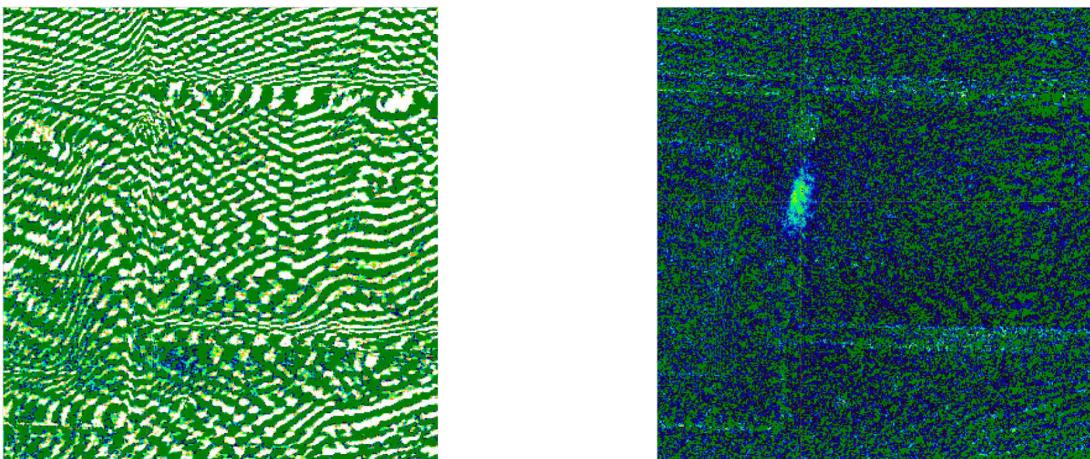
### Corrections et améliorations de l'imagerie par absorption

Malgré l'apparente simplicité du dispositif d'imagerie par absorption, plusieurs effets perturbent les mesures du nombre d'atomes et méritent d'être corrigés.

Premièrement, la section efficace de diffusion  $\sigma$  dans notre expérience n'est pas égale à la section efficace de diffusion résonante  $\sigma_0$ . En effet, la lumière des faisceaux sonde n'est pas parfaitement polarisée  $\sigma^+$ . De plus, les atomes ne sont pas tous dans le sous-niveau  $m_F = +2$ , en particulier lorsque l'on souhaite imager le nuage dans le MOT ou après l'étape de mélasse optique sans le charger dans le piège magnétique. Enfin, l'interférence entre le faisceau sonde de côté et sa réflexion sur la puce module l'intensité de la lumière vue par le nuage atomique. La combinaison de ces effets réduit peut être décrite en corrigeant la section efficace de diffusion d'un facteur  $\alpha$  [21, 25]. On obtient alors une section efficace de diffusion effective  $\sigma = \sigma_0/\alpha$ , ou, de façon équivalente, une intensité de saturation effective  $I_{sat} = \alpha \cdot I_{sat,0}$ . La calibration expérimentale de ce paramètre  $\alpha$  est effectuée par la mesure de l'intensité de saturation effective  $I_{sat}$ . Pour l'absorption de la sonde de côté par un nuage dans le piège magnétique, nous obtenons une valeur  $\alpha_{magn} = 2,06 \pm 0,1$ . Pour l'absorption de la sonde de côté par un nuage juste après la mélasse optique, nous obtenons une valeur  $\alpha_{melasse} = 2,27 \pm 0,1$ . Le nombre d'atomes évalué à partir des images par absorption dépend directement de la valeur de ce paramètre  $\alpha$ . Les valeurs expérimentales proches de  $\alpha = 2$  sont tout à fait cohérentes avec le fait que notre faisceau sonde est polarisé linéairement : seule la composante  $\sigma^+$  de la lumière résonante avec la transition sonde peut être absorbée. Cette composante représente la moitié de l'intensité totale envoyée, et seule cette moitié contribue à la saturation de la transition. Pour un même paramètre de saturation, l'intensité totale du faisceau doit donc être deux fois plus grande que si le faisceau était polarisé  $\sigma^+$ .

Deuxièmement, l'acquisition du signal d'imagerie se fait en trois temps. Une première image est enregistrée où les atomes absorbent le faisceau sonde, ce qui nous donne l'intensité  $I_f$ . Puis une deuxième image est enregistrée après que les atomes sont tombés par gravité, qui nous donne l'intensité du faisceau sonde non absorbé  $I_i$ . Enfin, une troisième image est enregistrée sans aucun laser allumé, qui permet de soustraire la lumière de fond des deux images précédentes. Les délais de quelques dizaines de ms entre les différentes images ont un effet délétère sur le signal. En effet, le signal enregistré par la caméra subit un bruit d'imagerie sous la forme de franges, dues à la diffraction et aux interférences du faisceau laser le long de son chemin optique et lors de sa réflexion sur la surface de la puce. Des vibrations et déformations de petite amplitude des éléments optiques et des variations d'indice de l'air le long du chemin optique décalent ces franges d'une image à l'autre. L'opération de traitement des images (équation II.6) ne permet

pas de d'affranchir des fluctuations de ces franges, qui viennent ainsi brouiller le signal d'imagerie. Ce problème se présente principalement sur l'imagerie par la sonde de face en raison des plus grands délais exigés par la caméra et de la plus grande sensibilité mécanique du chemin optique. Afin d'y remédier, nous avons implémenté un algorithme de réduction des franges qui, à partir d'une base de plusieurs images du faisceau sonde seul, reconstitue la meilleure combinaison linéaire de celles-ci pour chaque image où le nuage atomique est présent. Cet algorithme est décrit en détail dans [26]. La figure (II.12) montre une image d'un nuage froid par absorption de la sonde face, non traitée et après traitement par cet algorithme.

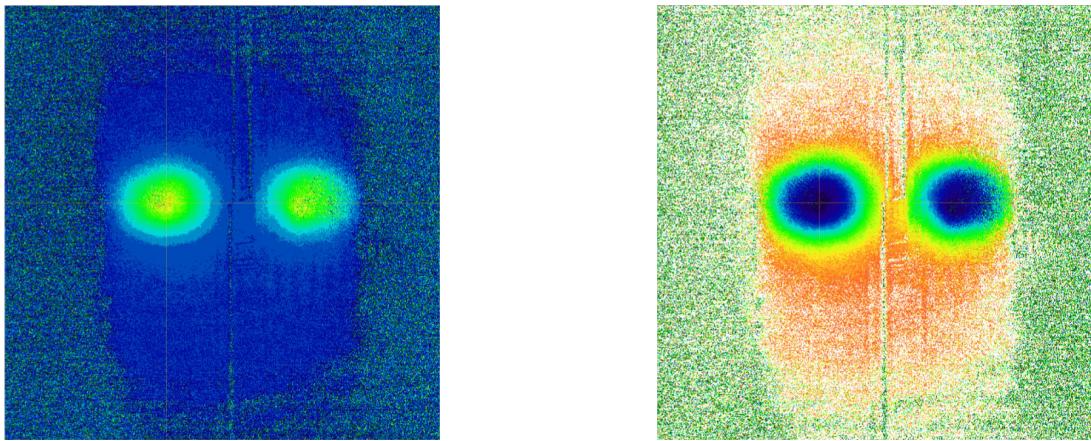


**Figure II.12** Images du nuage atomique froid par absorption du faisceau sonde face. À gauche, l'image est traitée selon l'équation (II.6). À droite, la même image après traitement par l'algorithme de réduction des franges. Les graphes sous les images sont les profils de densité du nuage en coupe horizontale. L'échelle de couleur est la même pour les deux images et a été optimisée pour l'image de droite.

Troisièmement, dans le cas d'un nuage très dense optiquement, comme par exemple pour les mélasses optiques, le centre du nuage où la densité atomique est très haute peut absorber l'intégralité de l'intensité incidente  $I_i$ . Le rapport des intensités  $I_f/I_i$  est alors très faible et dominé par le bruit. Le signal  $I_f/I_i$  au centre du nuage peut ainsi présenter des valeurs négatives, qui seront problématiques lorsque l'on souhaitera en prendre le logarithme. Afin de remédier à cela, il peut être intéressant de ne pas calculer la densité optique  $OD$  comme à l'équation (II.4), mais de s'arrêter à l'opération

$$\frac{I_f(y, z)}{I_i(y, z)} = e^{-OD(x, y)} = e^{-\sigma \cdot n(y, z)}. \quad (\text{II.8})$$

Nous appellerons cette opération « absorption no-log ». Ce traitement du signal permet de s'affranchir de « l'amplification » du bruit au centre par le logarithme et du problème des valeurs négatives, en se concentrant sur le signal aux bords du nuage. Le profil de densité est alors ajusté à l'exponentielle d'un profil gaussien. La figure (II.13) montre l'image d'une mélasse optique par absorption de la sonde de côté, traitée d'après l'équation (II.4) et d'après l'équation (II.8).



**Figure II.13** Images du nuage atomique de mélasse optique par absorption du faisceau sonde côté. À gauche, l'image est traitée par absorption selon l'équation (II.4). À droite, l'image est traitée selon l'équation (II.8). Les graphes sous les images sont les profils de densité du nuage en coupe horizontale. L'échelle de couleur est différente pour les deux images, adaptée à l'échelle des profils en coupe représentés. Les zones bruitées à gauche et à droite ne sont pas éclairées par le faisceau sonde. En absorption « no-log », le bruit est plus important dans les zones sombres, mais réduit au centre et sur les bords du nuage.

### Estimation de la température

L'imagerie par absorption permet facilement d'estimer la température du nuage atomique. En effet, la distribution des impulsions dans le nuage suit la distribution de Maxwell-Boltzmann tant que celui-ci n'est pas condensé. L'évolution de la taille gaussienne du nuage après extinction du piège, dictée par l'impulsion moyenne dans le nuage, nous renseigne alors sur sa température par l'équation de propagation balistique

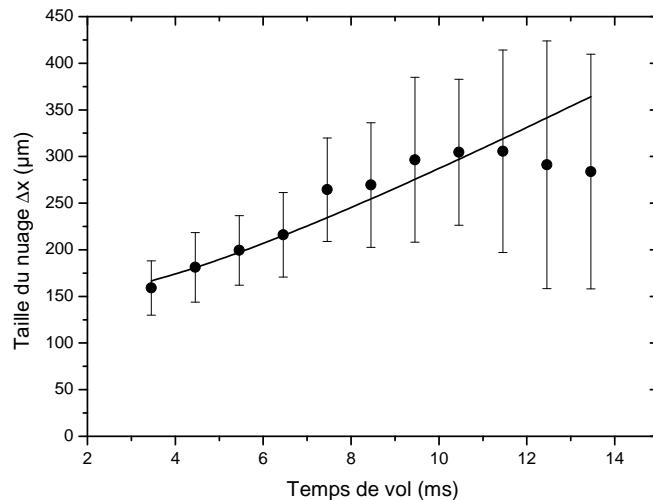
$$\Delta x^2(t) = \Delta x^2(t_0) + \frac{k_B T}{m} \cdot (t - t_0)^2, \quad (\text{II.9})$$

où  $\Delta x$  est l'extension spatiale du nuage dans la direction  $x$ ,  $t$  le temps et  $t_0$  la référence de temps,  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $m$  la masse d'un atome et  $T$  la température du nuage. En imageant le nuage à différents moments de son expansion (« temps de vol ») et en ajustant la largeur gaussienne du profil à l'équation (II.9), on accède à la fois à la température  $T$  du nuage et à sa taille initiale dans le piège  $\Delta x(t = 0)$ . La figure II.14 représente un ajustement de l'évolution de la taille du nuage après relâchement du piège.

#### II.1.4 Quelques nuages typiques

Nous avons décrit ici les éléments de notre dispositif qui servent à produire et caractériser des nuages d'atomes ultra-froids. Le tableau II.1 présente les caractéristiques principales des différents types de nuages atomiques que nous utiliserons pour y exciter des atomes de Rydberg.

Ces différents nuages d'atomes froids, ou ultra-froids, vont nous permettre d'explorer l'excitation d'atomes de Rydberg dans différentes conditions.



**Figure II.14** Estimation de la température d'un nuage par temps de vol. Le graphe représente l'évolution de la taille d'un nuage de mélasse optique, en fonction du temps écoulé depuis l'extinction des lasers. L'ajustement selon l'équation (II.9) permet d'estimer la température du nuage à  $6,43 \pm 1 \mu\text{K}$ , et sa taille initiale à  $142 \pm 13 \mu\text{m}$ .

**Table II.1** Quelques nuages typiques de notre expérience. Pour chacun, nous donnons les caractéristiques suivantes : nombre d'atomes  $N$ , taille  $\Delta x$  du nuage selon  $x$ , taille  $\Delta y, z$  du nuage selon  $y$  et  $z$ , température  $T$  est distance à la puce  $d$ .

| nuage            | $N$               | $\Delta x$        | $\Delta y, z$     | $T$                            | $d$               |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| QUAD-MOT         | quelques $10^8$   |                   |                   | $400 \mu\text{K}$              | 1 mm à 3 mm       |
| U-MOT proche     | $10^7$            | $200 \mu\text{m}$ | $200 \mu\text{m}$ | $40 \mu\text{K}$               | $600 \mu\text{m}$ |
| mélasse optique  | $5 \times 10^6$   | $80 \mu\text{m}$  | $80 \mu\text{m}$  | $10 \mu\text{K}$               | $600 \mu\text{m}$ |
| piège mag. chaud | $1,5 \times 10^6$ |                   |                   | $40 \mu\text{K}$               |                   |
| piège mag. froid | $1,2 \times 10^4$ | $45 \mu\text{m}$  | $4,5 \mu\text{m}$ | $0,75 \mu\text{K}$             | $450 \mu\text{m}$ |
| BEC              | 8000 à 20 000     |                   |                   | $30 \text{nK à } 80 \text{nK}$ |                   |

## II.2 Excitation et détection d'atomes de Rydberg près d'une puce

Cette diversité de nuages atomiques nous permet d'exciter des atomes de Rydberg dans différentes conditions de densité atomique, de température et de distance à la puce. Nous présentons dans le reste de ce chapitre la partie de notre dispositif expérimental servant à exciter, détecter et manipuler les atomes de Rydberg. Notre dispositif est particulier dans la mesure où tout ce qui concerne les niveaux de Rydberg a lieu près d'une surface, la puce atomique. Des champs parasites électriques parasites étant inévitables à proximité d'une surface, la grande sensibilité électromagnétique des atomes de Rydberg sera mise à rude épreuve.

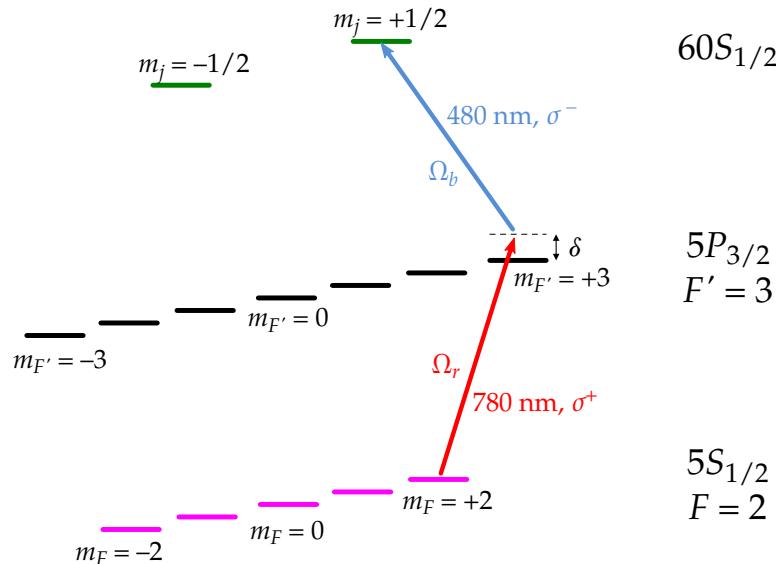
Après avoir donné le principe de l'excitation à deux photons des niveaux de Rydberg et de la détection par ionisation selective, nous ferons une présentation de rapide de

l'effet Stark et de ses conséquences sur nos expériences. Nous décrirons ensuite les techniques mises en place afin de contrôler les champs électriques près de la puce. Nous finirons ce chapitre par une présentation de la technique de spectroscopie microonde des niveaux de Rydberg et de son utilisation pour mesurer les champs électriques résiduels.

### II.2.1 L'excitation à deux photons des atomes de Rydberg

Les atomes de rubidium piégés dans un nuage près de la puce sont excités vers les niveaux de Rydberg par une transition laser à deux photons désaccordée par rapport au niveau intermédiaire. Dans nos expériences, deux niveaux de Rydberg différents ont été excités par laser à partir de l'état fondamental  $5S_{1/2}$  : le niveau  $60S_{1/2}$  et le niveau  $50D_{3/2}$ . Nous décrivons ici l'excitation d'un nuage d'atomes de Rydberg au sein d'un nuage froid dans le piège magnétique, en négligeant les interactions entre atomes de Rydberg et en nous concentrant sur le niveau  $60S_{1/2}$ .

La transition du niveau fondamental au niveau de Rydberg est faite par l'absorption d'un photon rouge à  $\lambda = 780 \text{ nm}$ , désaccordé de  $\delta = +2\pi \times 540 \text{ MHz}$  par rapport à la transition  $5S_{1/2}, F = 2 \rightarrow 5P_{3/2}, F' = 3$ , et d'un photon bleu à  $\lambda = 480 \text{ nm}$ , accordé pour satisfaire la condition de résonance vers le niveau choisi. La figure (II.15) représente le schéma de niveaux de l'excitation du niveau  $60S_{1/2}$ . Les deux faisceaux d'excitation sont superposés et se propagent selon la direction  $+x$ . Leurs polarisations sont définies par rapport à l'axe de quantification des niveaux atomiques, déterminé par le champ magnétique de biais  $B_x$  dans le fond du piège. La figure (II.16) représente la géométrie des faisceaux laser d'excitation. Dans cette configuration, seul le sous-niveau  $m_j = +1/2$  du niveau  $60S$  est excité.



**Figure II.15** Schéma de l'excitation laser du niveau  $60S$ , à partir d'atomes de  $^{87}\text{Rb}$  dans le niveau fondamental dans le piège magnétique. La polarisation de chaque laser est indiquée.  $\Omega_r$  et  $\Omega_b$  sont les fréquences de Rabi des transitions à  $780$  et  $480 \text{ nm}$  respectivement.  $\delta = +2\pi \times 540 \text{ MHz}$  est le désaccord par rapport au niveau intermédiaire.

Le laser rouge d'excitation est extrait du laser maître, mentionné en II.1.2, puis

décalé en fréquence par un modulateur acousto-optique. Le laser bleu à 480 nm est généré par un système commercial TOPTICA SHG-110 de diode laser amplifiée puis doublée en fréquence. La lumière laser à 960 nm est asservie en fréquence à la même cavité de Fabry-Pérot que le laser maître. Un modulateur acousto-optique intervient entre la diode et la cavité Fabry-Pérot, qui nous permet de contrôler la fréquence de la diode sur une plage d'environ 75 MHz. Après doublage de la fréquence, cela correspond à un balayage de la fréquence du laser bleu sur une plage de 150 MHz. Le détail du système laser est donné en annexe A.

Le faisceau rouge a typiquement un col de 150  $\mu\text{m}$  et une puissance de 50  $\mu\text{W}$  au niveau des atomes. Le laser rouge est désaccordé de  $\delta = +540 \text{ MHz}$  par rapport à la transition  $|5S_{1/2}, F=2, m_F=+2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}, F'=3, m'_F=+3\rangle$ , dont le moment de transition dipolaire vaut  $2,989\,31(62) \text{ ea}_0$  [24]. D'après les caractéristiques du faisceau, la fréquence de Rabi correspondant à cette transition est de l'ordre de  $\Omega_r \simeq 2\pi \times 40 \text{ MHz}$ . Le taux d'émission spontanée de photons rouge par le niveau intermédiaire, de durée de vie  $\Gamma^{-1} \simeq 26 \text{ ns}$ , est donné par

$$\Gamma_{sp} = \frac{1}{2} \frac{\Omega_r^2 \Gamma}{\delta^2 + \Omega_r^2 + \Gamma^2} \simeq \frac{\Omega_r^2}{2\delta^2} \Gamma, \quad (\text{II.10})$$

où  $\Gamma = 2\pi \times 6,065 \text{ MHz}$  est la largeur naturelle du niveau  $5P_{3/2}$ . La dernière égalité est vérifiée dans l'approximation  $\delta^2 \gg \Omega_r^2, \Gamma^2$ , qui est ici valide. Avec nos valeurs d'intensité et de désaccord du laser, on obtient  $\Gamma_{sp} \simeq 2,74 \times 10^{-3} \Gamma = 2\pi \times 0,0166 \text{ MHz}$ , ce qui correspond à l'émission d'un photon toutes les  $\Gamma_{sp}^{-1} = 9,565 \mu\text{s}$ . Or lorsqu'un atome absorbe et ré-émet un tel photon, il gagne une énergie moyenne  $\Delta E = p^2/(2m_{Rb87}) = h^2/(2m_{Rb87}\lambda^2) = k_B \times 180 \text{ nK}$ . Étant données nos valeurs d'intensité et de désaccord, cela implique un taux de chauffage de  $\Gamma_{sp} \Delta E/k_B = 18,8 \text{ nK}/\mu\text{s}$ . Le piège est ainsi chauffé par le laser rouge d'excitation, ce qui limite à la fois la puissance que l'on peut envoyer sur le nuage, et le nombre d'impulsions laser d'excitation que l'on peut faire subir à un même nuage sans l'altérer.

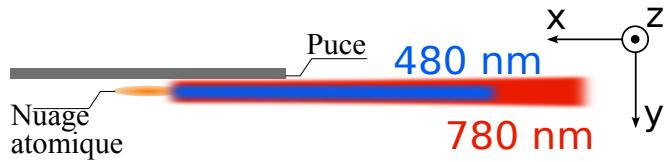
Le faisceau bleu a typiquement un col de 22  $\mu\text{m}$  et une puissance estimée à 4 mW au niveau des atomes. Le moment dipolaire de la transition  $|5P_{3/2}, F'=3, m'_F=+3\rangle \rightarrow |60S_{1/2}, m_j=+1/2\rangle$  est cependant bien plus faible que le précédent, et vaut  $9,9 \times 10^{-3} \text{ ea}_0$ <sup>†</sup>. La fréquence de Rabi pour cette transition est alors de  $\Omega_b = 2\pi \times 8 \text{ MHz}$ . Les fréquences de Rabi des deux transitions satisfont l'approximation  $\Omega_{r,b} \ll \delta$ , ce qui nous permet de négliger l'occupation du niveau intermédiaire, et donc de l'éliminer adiabatiquement [27]. Le système à trois niveaux se ramène alors à un système effectif à deux niveaux, couplés par une fréquence de Rabi

$$\Omega = \frac{\Omega_r \Omega_b}{\delta}. \quad (\text{II.11})$$

Avec nos paramètres, on obtient une fréquence de Rabi  $\Omega = 2\pi \times 296 \text{ kHz}$  pour la transition  $|5S_{1/2}, F=2, m_F=+2\rangle \rightarrow |60S_{1/2}, m_j=+1/2\rangle$ . Ce paramètre peut être varié simplement en ajustant la puissance du laser rouge ou la puissance du laser bleu.

---

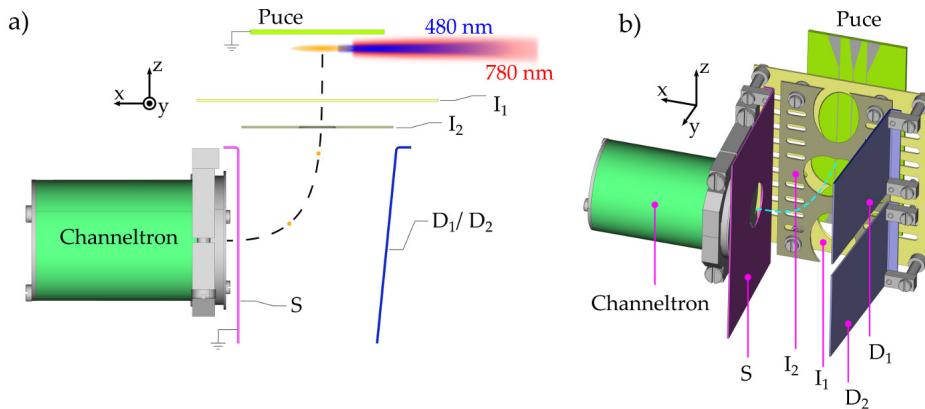
<sup>†</sup>. Nous rappelons ici que, comme nous l'avons mentionné en I.1, le bon nombre quantique magnétique pour les niveaux de Rydberg est  $m_j$  et non pas  $m_F$ .



**Figure II.16** Schéma représentant la géométrie des faisceaux laser d'excitation.

### II.2.2 La détection par ionisation des atomes de Rydberg

L'électron de valence d'un atome de Rydberg alcalin est très proche du seuil d'ionisation. Il est donc très facile de l'arracher au noyau en appliquant un champ électrique. Nous exploitons cette caractéristique pour détecter les atomes de Rydberg par ionisation en champ électrique : une fois l'atome ionisé, le cœur atomique est accéléré par des électrodes vers un détecteur à avalanche (Channeltron).



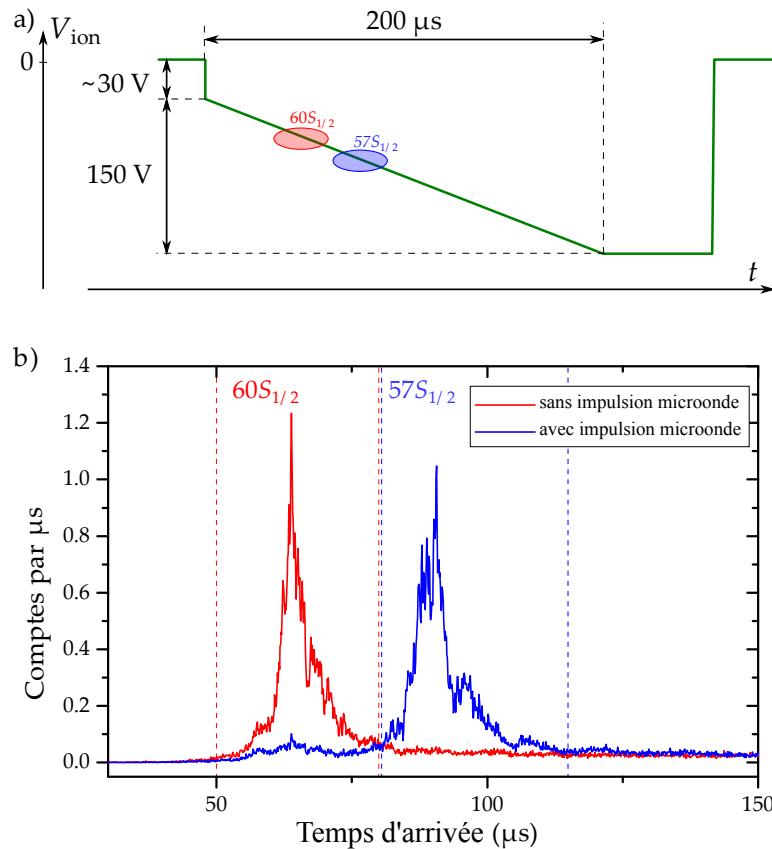
**Figure II.17** Schéma représentant le système de détection des atomes de Rydberg. **a)** vu de dessus et **b)** en projection axonométrique. Après excitation, les atomes de Rydberg sont ionisés par les électrodes  $I_1$  et  $I_2$ . Les ions ainsi créés et accélérés sont défléchis par les électrodes  $D_1$  et  $D_2$ , en direction du détecteur Channeltron. L'électrode  $S$  est mise à la masse et sert à écranner la tension présente à l'entrée du Channeltron. La trajectoire des ions est indiquée en lignes pointillées et les faisceaux lasers d'excitation sont représentés en **a)**.

La figure (II.17) présente un schéma détaillé du système de détection par ionisation. Au moment de la détection, une tension négative est appliquée sur les électrodes d'ionisation  $I_1$  et  $I_2$ . La tension sur ces électrodes crée un champ électrique de l'ordre de quelques 100 V/cm au niveau des atomes, la puce étant mise à la masse. Ce champ électrique ionise les atomes de Rydberg et accélère les ions positifs ainsi créés. Ces ions sont ensuite défléchis en direction du Channeltron par les électrodes  $D_1$  et  $D_2$ , mises en permanence à un potentiel  $V_{defl} = +150$  V. Une grille placée à l'entrée du Channeltron est alimentée par une tension de -3000 V. Une électrode trouée mise à la masse est placée devant cette grille afin d'écranner les -3000 V pour la région de piégeage des atomes. Lorsque les ions arrivent dans le Channeltron, celui-ci génère par avalanche un signal électrique qui est envoyé vers un amplificateur et un discriminateur permettant de décompter les ions détectés. Le Channeltron est isolé thermiquement et chauffé

à une température de 42 K afin d'augmenter son efficacité.

### Sélectivité de niveau de la détection par ionisation

Chaque atome de Rydberg présente une énergie différente, telle que discutée en I.1. Cela signifie qu'ils sont tous à une distance différente du seuil d'ionisation, et *in fine* que chaque niveau de Rydberg sera ionisé pour une valeur de champ électrique spécifique. On peut ainsi appliquer une rampe de tension sur les électrodes d'ionisation, afin que chaque niveau de Rydberg soit ionisé à un instant différent. Alors, les ions correspondants seront détectés à des instants différents par le Channeltron et pourront être distingués. Des fenêtres temporelles de détection peuvent alors être définies, qui permettent de compter les atomes détectés dans chacun des différents niveaux. La figure (II.18) montre un signal de détection sélective des niveaux de Rydberg  $60S_{1/2}$  et  $57S_{1/2}$ . La rampe de tension et les fenêtres temporelles de détection sont optimisées afin de distinguer au mieux les différents niveaux de Rydberg détectés. L'efficacité de détection de notre dispositif a été mesurée à  $90 \pm 10\%$  [21].



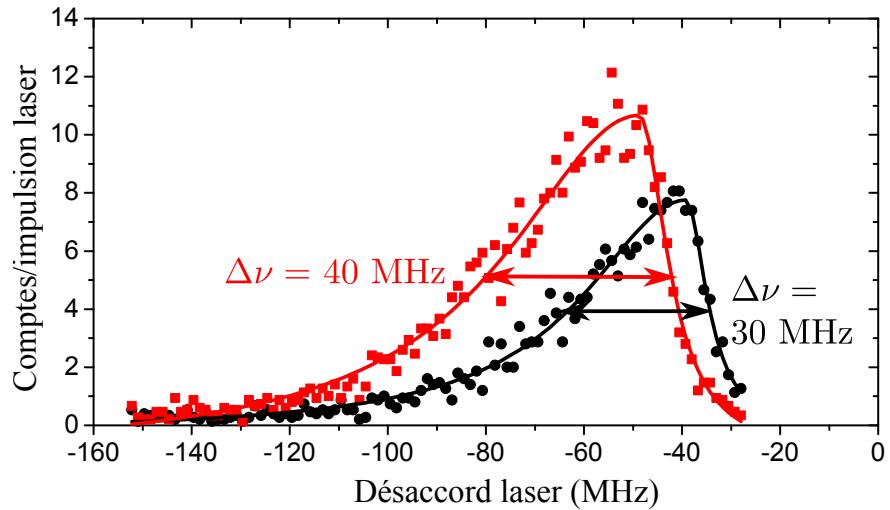
**Figure II.18** Détection sélective des atomes de Rydberg. **a)** Une rampe de tension  $V_{ion}$  typique appliquée sur les électrodes d'ionisation. Les seuils d'ionisation des niveaux  $60S_{1/2}$  et  $57S_{1/2}$  sont indiqués en rouge et bleu respectivement. **b)** Temps d'arrivée des ions correspondants. Des fenêtres temporelles de détection, représentées en pointillés, sont définies pour compter sélectivement les atomes dans les niveaux  $60S_{1/2}$  et  $57S_{1/2}$ . Les atomes sont préparés dans l'état  $60S_{1/2}$  et le niveau  $57S_{1/2}$  est peuplé par une impulsion  $\pi$  de la transition microonde adéquate. Les échelles de temps sont différentes en **a)** et **b)**.

### II.2.3 Les champs électriques parasites, défi des atomes de Rydberg sur puce

Comme nous l'avons dit au chapitre I, les atomes de Rydberg sont des objets extrêmement sensibles au champ électromagnétique. Or, dans notre expérience, nous souhaitons exciter et manipuler des atomes de Rydberg à proximité immédiate d'une surface, la puce à atomes. Les champs électriques parasites étant inévitables près d'une surface, la présence de la puce va rendre difficile l'excitation et la manipulation des atomes de Rydberg.

#### Premiers spectres

Ce problème est très clair sur les premiers spectres optiques que nous avons fait de la transition  $|5S_{1/2}\rangle \rightarrow |60S_{1/2}\rangle$ , présentés en figure (II.19). Ces premiers spectres pré-



**Figure II.19** Deux spectres laser de la transition  $5S \rightarrow 60S$ , avant correction des inhomogénéités et de la dérive du champ électrique. Leurs largeurs sont de 30 MHz et 40 MHz respectivement, et ils sont décalés en fréquence de 12 MHz l'un par rapport à l'autre. Les deux spectres ont été pris dans les mêmes conditions, à 1 h d'intervalle, pendant laquelle un MOT était piégé devant la puce. L'origine de l'axe des abscisses correspond à la fréquence résonante de la transition  $5S \rightarrow 60S$  en l'absence de champ électrique.

sentent des largeurs de raie de plusieurs dizaines de MHz, et une forme asymétrique caractéristique d'un élargissement Stark inhomogène. De plus, une heure de fonctionnement de l'expérience cause un déplacement en fréquence de la raie de 12 MHz.

Cet effet est causé par la variation spatiale et temporelle du champ électrique dans la région du nuage atomique : si les atomes dans différentes régions du nuage voient des champs électriques différents, la fréquence de la transition  $5S \rightarrow 60S$  sera déplacée différemment dans chaque région par l'effet Stark, et la raie spectrale s'en trouvera élargie. Une largeur de raie de 40 MHz correspond à un champ électrique variant de 0 V/cm à 0,667 V/cm sur l'extension du nuage, d'après les coefficients Stark donnés en table I.2. Or le nuage utilisé pour ces spectres était un MOT de  $\sim 200 \mu\text{m}$  de diamètre, ce qui nous donne une valeur de gradient de champ électrique de l'ordre de 35 (V/cm)/cm.

### Potentiel de contact du rubidium sur l'or et dépôt contrôlé

La cause principale de l'inhomogénéité spatiale et temporelle des champs électriques est l'accumulation d'un dépôt d'atomes de rubidium sur la surface en or de la puce : lorsque les atomes du piège sont relâchés à la fin de chaque séquence, une partie d'entre eux entre en contact avec la surface froide de la puce et s'y dépose. Des dépôts volontaires d'atomes sur la puce, à partir de nuages piégés, nous ont confirmé l'importance de ce phénomène et de ses effets sur les spectres d'excitation laser.

L'accumulation d'atomes de rubidium sur la puce forme d'importants dipôles électriques. En effet, les niveaux de Fermi de l'or et du rubidium étant différents, lorsque les deux métaux sont mis en contact les électrons se déplacent de l'un à l'autre pour équilibrer les niveaux de Fermi. Un potentiel électrostatique de contact est alors créé entre l'or et le rubidium. La surface de la puce étant mise à la masse, ce sont les plaques de rubidium déposé qui se chargent à 2,5 V environ. Or le dépôt de rubidium depuis les nuages piégés est un processus lent et non contrôlé, sur des échelles de longueur de l'ordre du mm. Cela a pour conséquence un champ électrique variant dans le temps et inhomogène à une distance de la puce inférieure à quelques mm. C'est justement là que se trouvent les atomes piégés que l'on souhaite exciter.

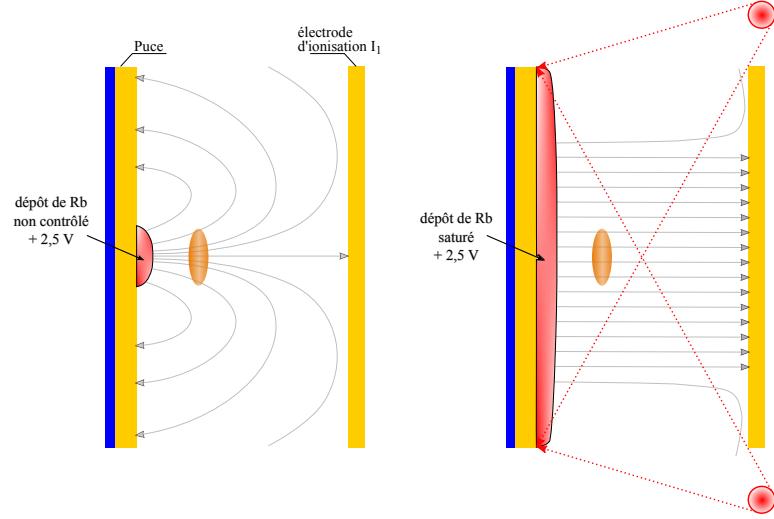
La solution que nous avons mise en œuvre fut de saturer le dépôt de rubidium sur la puce, en faisant un dépôt contrôlé macroscopique sur une surface grande devant la région de piégeage. Pour que cela fonctionne, il est important que le rubidium déposé reste métallique, non oxydé, et ne migre pas dans le cryostat en raison de différences de températures. Ces contraintes nous ont décidés à faire le dépôt de rubidium à froid, lorsque le cryostat est sous vide et thermiquement stable. Le dépôt contrôlé a été réalisé grâce à l'installation de dispenseurs de rubidium dans le cryostat, orientés de façon à pouvoir couvrir la puce de rubidium métallique. La figure (II.20) illustre qualitativement la structure des champs électriques au voisinage de la puce avant et après le dépôt de rubidium. Les dispenseurs nous ont permis de déposer une couche de rubidium, estimée à environ 80 nm d'épaisseur, sur une partie importante de la surface de la puce.

Un spectre d'excitation laser fait juste après ce dépôt de rubidium dans un MOT à 500  $\mu\text{m}$  de la puce est présenté en figure (II.21). Les conditions d'excitation sont similaires à celles des spectres présentés en figure (II.19), mais la largeur de raie spectrale est de seulement  $\Delta\nu = 1,7 \text{ MHz}$ . Le dépôt de rubidium a donc eu un effet extrêmement bénéfique sur l'excitation d'atomes de Rydberg au voisinage de la puce.

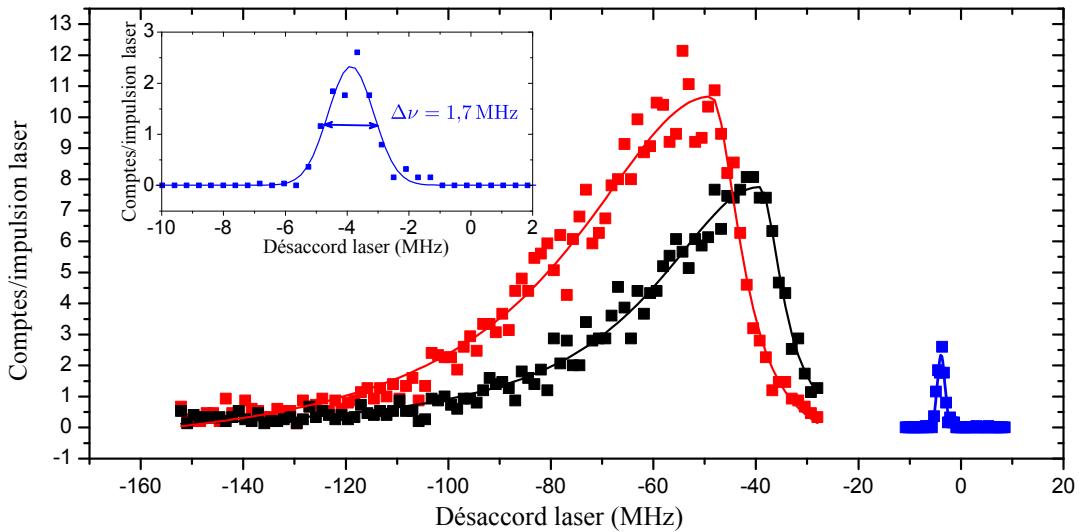
Des optimisations ultérieures des conditions d'excitation nous ont permis d'obtenir des raies spectrales d'une largeur de  $\Delta\nu \simeq 625 \text{ kHz}$ , que nous attribuons majoritairement à une fluctuation lente de la fréquence des lasers [21].

#### II.2.4 Contrôle du champ électrique perpendiculaire à la puce

Le dépôt saturé de rubidium sur la puce nous a permis de réduire considérablement les inhomogénéités de champ électrique. Nous souhaitons néanmoins pouvoir contrôler la valeur moyenne du champ à la position du nuage atomique, dans deux optiques. La première est la réduction de l'effet des inhomogénéités résiduelles. En effet, en raison de la forme quadratique de l'effet Stark, plus la valeur moyenne du champ électrique est élevée, plus la raie spectrale sera élargie par une même variation autour de la valeur



**Figure II.20** Schéma illustrant les dépôts de rubidium sur la puce et les champs électriques qui en résultent. Les dépôts de rubidium sont représentés en rouge et les traits gris fléchés représentent les lignes de champ électrique. Les surfaces représentées en jaune (puce et électrode d'ionisation) sont mise à la masse. L'ovale orange représente la position du nuage atomique (les échelles ne sont pas respectées). À gauche, dépôt non-contrôlé dû aux atomes piégés : le champ électrique est inhomogène et varie dans le temps. À droite, dépôt contrôlé réalisé grâce aux dispenseurs de rubidium (indiqués par les cercles rouges) : le champ électrique créé par le potentiel de contact rubidium-or est homogène et stable dans le temps.



**Figure II.21** Spectres d'excitations laser  $5S-60S$  d'atomes piégés dans un MOT, juste avant (noir et rouge) et juste après (bleu) le dépôt de rubidium sur la puce. L'insert reprend le spectre bleu à une échelle plus adaptée. L'ajustement gaussien donne une largeur de  $\Delta\nu = 1,7 \text{ MHz}$  : la largeur de raie a été considérablement réduite par le dépôt contrôlé de rubidium.

moyenne. Pour des valeurs de champ électrique comprises entre  $F - \Delta F$  et  $F + \Delta F$ ,

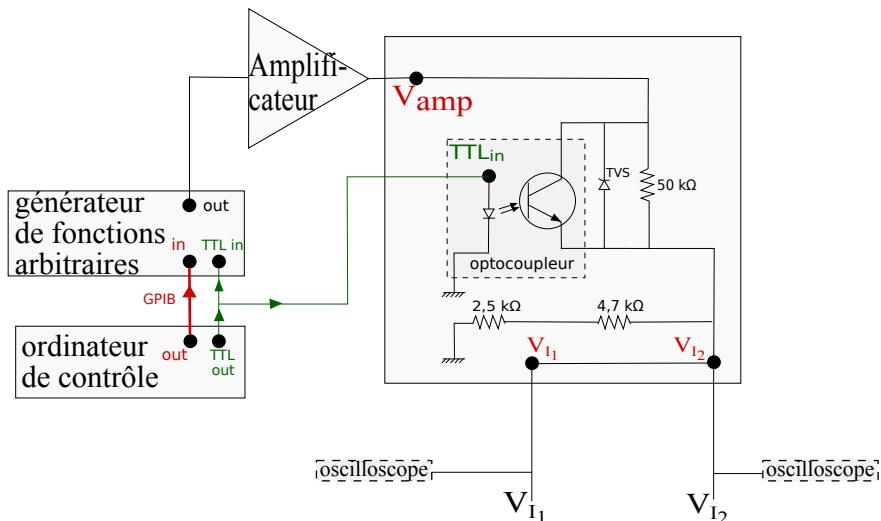
l'élargissement de la raie spectrale vaut

$$\begin{aligned}\nu(F - \Delta F) - \nu(F + \Delta F) &= A(F - \Delta F)^2 - A(F + \Delta F)^2 \\ &= A \cdot [(F - \Delta F)^2 - (F + \Delta F)^2] \\ &= -4A \cdot F \cdot \Delta F\end{aligned}\quad (\text{II.12})$$

La seconde optique d'un contrôle plus fin du champ électrique est de pouvoir déplacer en fréquence les transitions microonde entre niveaux de Rydberg voisins. Cet aspect du contrôle des champs électriques nous sera surtout utile lorsque nous nous intéresserons aux niveaux de Rydberg circulaires, dans les chapitres IV et V.

Le moyen le plus direct dont nous disposons pour le contrôle du champ électrique est l'application d'une tension sur les électrodes d'ionisation  $I_1$  et  $I_2$  représentées en figure (II.17). Il est raisonnable de supposer, étant donnée la grande surface de ces électrodes, que le champ créé entre celles-ci et la puce est homogène spatialement, au moins là où se situe le nuage atomique. Le contrôle de la tension appliquée à ces électrodes présente une exigence technique particulière : nous voulons contrôler le champ électrique vu par les atomes à l'échelle de la dizaine de mV/cm, tout en étant capable d'appliquer une tension de quelques centaines de Volts sur les mêmes électrodes afin d'ioniser et détecter les atomes de Rydberg.

Nous avons pour cela conçu un circuit électronique permettant de commuter rapidement la tension appliquée aux électrodes, entre une voie basse tension à bas bruit pendant l'excitation des atomes de Rydberg et une voie haute tension servant à leur détection. Ce circuit est schématisé en figure (II.22).



**Figure II.22** Premier circuit de contrôle de la tension des électrodes d'ionisation. Les tensions sont fournies par un générateur de fonctions arbitraires contrôlé par ordinateur, puis amplifiées par un amplificateur haute tension de gain  $\times 50$ , délivrant jusqu'à  $\pm 150$  V. Pendant l'excitation des atomes de Rydberg, l'optocoupleur est bloquant. Le pont diviseur de tension créé par la résistance de  $50\text{ k}\Omega$  d'une part et de  $2,5 + 4,7\text{ k}\Omega$  divise par un facteur 8 le bruit électronique au niveau des électrodes, au prix d'une réduction d'autant du signal. Pendant la phase de détection, l'optocoupleur est passant et le pont diviseur est ainsi court-circuité. La tension appliquée aux électrodes est alors directement la tension en sortie de l'amplificateur.

### II.2.5 Manipulation cohérente des états de Rydberg

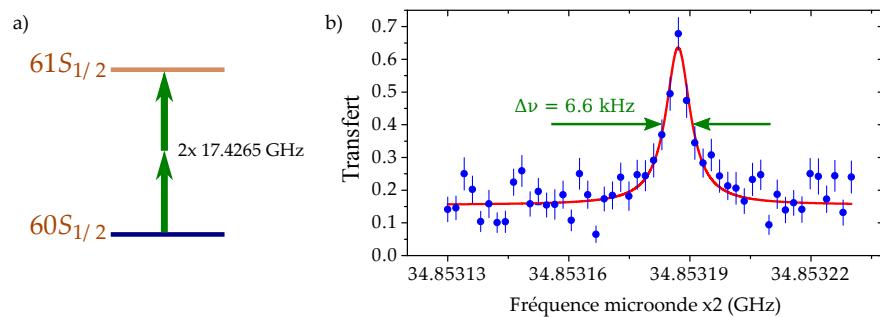
Nous avons jusqu'ici limité notre exposé à l'excitation laser d'atomes vers un niveau de Rydberg déterminé. Or nos expériences reposent sur la manipulation des atomes de Rydberg entre plusieurs états, en vue de deux objectifs. Le premier est la caractérisation des interactions entre niveaux de Rydberg et le second est le développement d'un système quantique pouvant servir de plateforme pour la simulation quantique.

Les différences d'énergie entre niveaux de Rydberg voisins, comme nous l'avons évoqué au chapitre I, sont dans le domaine des microondes millimétriques. Cela correspond grossièrement à des fréquences de transition de l'ordre de 10 à 100 GHz. La spectroscopie de ces transitions (« spectroscopie microonde ») est l'outil majeur dont nous disposons pour caractériser les atomes de Rydberg au-delà de la spectroscopie laser de la transition depuis le niveau fondamental. Son application pour l'étude du mouvement d'un nuage dense d'atomes de Rydberg sera discutée à la fin du chapitre III. Son application à l'étude des atomes de Rydberg circulaires et à leur manipulation cohérente sera discutée aux chapitres IV et V.

Ici, nous évoquerons la manipulation cohérente d'un « qubit de Rydberg » réalisé entre les états  $60S$  et  $61S$ , ainsi que l'utilisation de la spectroscopie de la transition  $60S \rightarrow 60P$  pour mesurer les champs électriques résiduels. Ces deux expériences sont décrites en détail dans la thèse de Carla Hermann Avigliano [28].

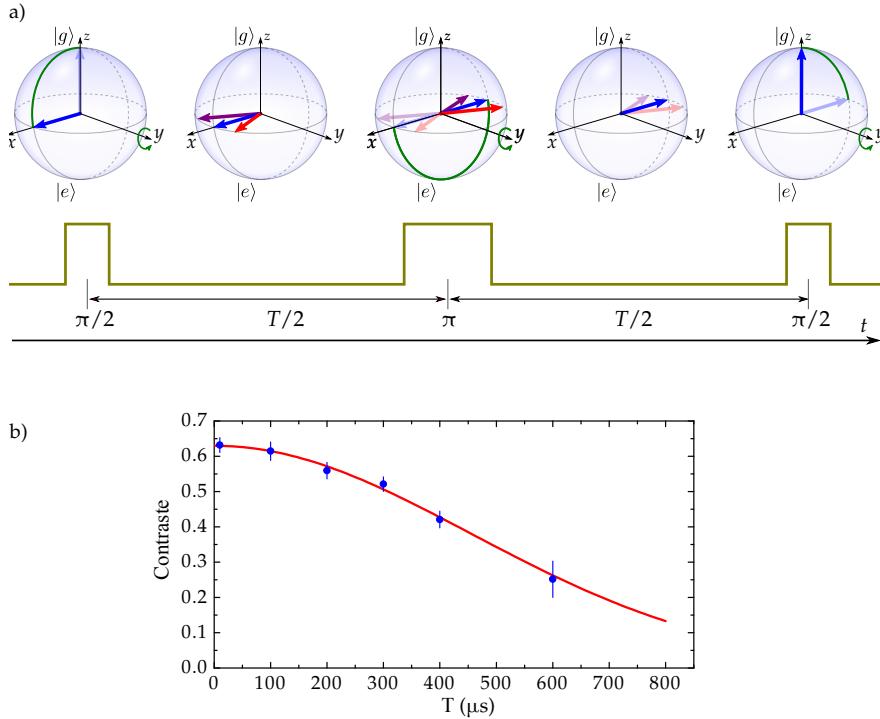
#### Un qubit de Rydberg d'une grande longévité

Au sein de notre dispositif, la cohérence d'un système quantique à deux niveaux réalisé entre deux niveaux de Rydberg est limitée en premier lieu par l'inhomogénéité du champ électrique résiduel. De bons candidats à la réalisation d'un tel qubit seront donc des niveaux dont la sensibilité au champ sera la plus faible possible ou, à défaut, la plus similaire possible. Les coefficients d'effet Stark quadratique synthétisés en table (I.2) nous éclairent dans notre choix : nous utiliserons les niveaux  $60S_{1/2}$  et  $61S_{1/2}$ . La quantité pertinente ici est le décalage en fréquence de la transition par l'effet Stark différentiel entre ces deux niveaux. Celui-ci vaut  $A_{60S_{1/2},61S_{1/2}} = -11 \text{ MHz}/(\text{V/cm})^2$ . La spectroscopie de la transition  $|g\rangle = |60S_{1/2}, m_j = 1/2\rangle \rightarrow |e\rangle = |61S_{1/2}, m_j = 1/2\rangle$  est présentée en figure (II.23). La largeur de raie de  $\Delta\nu = 6,6 \text{ kHz}$  est de bon augure



**Figure II.23** Spectroscopie de la transition  $60S$ - $61S$ . **a)** Diagramme de niveaux de la transition microonde à deux photons. **b)** Spectre micro-onde de la transition, pour une durée d'excitation de  $300 \mu\text{s}$ . La courbe rouge est un ajustement lorentzien.

pour la manipulation cohérente de ce qubit. Afin d'estimer son temps de cohérence de façon plus précise, nous avons effectué une spectroscopie Ramsey avec écho de spin entre les deux niveaux, schématisée en figure (II.24) La technique d'écho de spin permet de



**Figure II.24** Spectroscopie Ramsey avec écho de spin sur la transition 60S-61S. **a)** Principe de l'écho de spin représenté sur la sphère de Bloch.  $|g\rangle$  et  $|e\rangle$  représentent les états  $60\text{S}_{1/2}$  et  $61\text{S}_{1/2}$  respectivement. **b)** Contraste des franges de Ramsey avec écho de spin, en fonction de la durée de  $T$  de l'intervalle d'évolution. La courbe rouge est un ajustement gaussien.

se libérer des sources de décohérence stables dans le temps, telles que l'inhomogénéité spatiale du champ électrique. L'impulsion  $\pi$  intercalée à la moitié de l'évolution de la superposition d'état agit comme un renversement du temps. Les effets de déphasage de la superposition ne variant pas dans le temps sont ainsi compensés dans la deuxième moitié de son évolution. L'ajustement gaussien du contraste des franges de Ramsey en fonction du temps total d'évolution permet d'extraire un temps de cohérence à  $1/e$  de la superposition de  $T_2 = 631 \mu\text{s}$ . Ce temps de cohérence est trois fois supérieur à la durée de vie des niveaux de Rydberg, qui est de l'ordre de  $200 \mu\text{s}$ . Cela signifie que, même lorsque que la plupart des atomes de Rydberg ont été perdus par désexcitation radiative, ce qui ne l'ont pas été restent cohérents pendant une durée  $T_2$ .

### Mesure des champs électriques résiduels

La même technique de spectroscopie microonde nous a permis de mesurer les champs électriques résiduels. Pour cela, à l'inverse de l'expérience précédente, nous voulions une transition aussi sensible que possible à l'effet Stark. Nous avons donc choisi la transition  $60\text{S} \rightarrow 60\text{P}$ . Celle-ci se sépare par effet Zeeman entre les transitions  $60\text{S}_{1/2}, m_j = 1/2 \rightarrow$

$60P_{3/2}, m_j = -1/2$ , et  $60S_{1/2}, m_j = 1/2 \rightarrow 60P_{3/2}, m_j = +3/2$ . L'anistropie des niveaux  $P$  en présence d'un champ magnétique, ici celui qui sert à piéger les atomes, nous a permis d'estimer indépendamment le champ électrique résiduel perpendiculairement et parallèlement à la puce. Le champ résiduel perpendiculaire à la puce a été mesuré à 0,09 V/cm, cette valeur pouvant être compensée par l'application d'une tension sur les électrodes d'ionisation. Le champ parallèle à la puce a été mesuré à 0,09 V/cm à 150  $\mu\text{m}$  de la puce, décroissant jusqu'à une valeur comprise entre 0,05 et 0,06 V/cm pour des distances à la puce supérieures à 300  $\mu\text{m}$ . Ce champ résiduel parallèle à la puce ne pourra être compensé qu'après installation des électrodes RF.

Enfin, cette expérience nous a permis d'estimer les gradients résiduels du champ électrique au voisinage de la puce, à partir de la taille du nuage et de la largeur des raies spectrales de transition, principalement due à un élargissement Stark inhomogène, tel que présenté en II.2.3. Ces estimations ont été faites dans l'approximation d'un gradient de champ constant et principalement situé sur la composante  $F_x$ . La table II.2 synthétise ces mesures.

**Table II.2** Gradient de champ électrique au voisinage de la puce, à différentes distances.

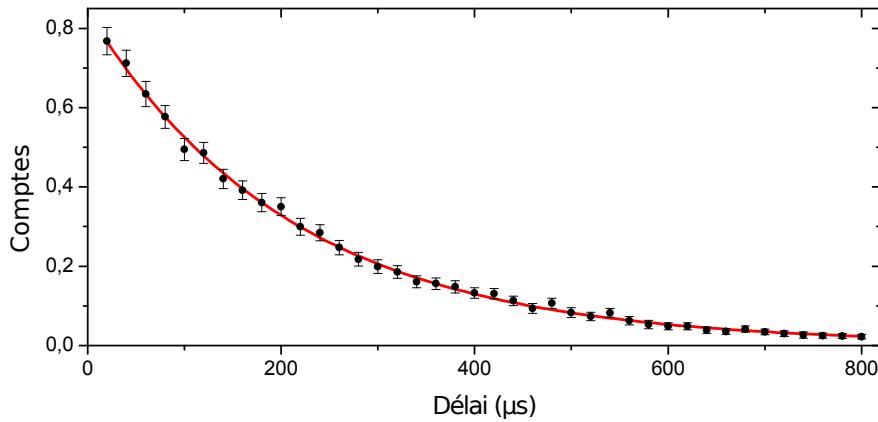
| Distance à la puce<br>$\mu\text{m}$ | $\partial F /\partial x$<br>(V/cm) <sup>2</sup> | $\partial F /\partial z$<br>(V/cm) <sup>2</sup> |
|-------------------------------------|---|---|
| 150                                 | 1,428   | 21,714  |
| 245                                 | 1,504   | 9,023   |
| 338                                 | 2,166   | 11,597  |
| 455                                 | 1,566   | 9,011   |
| 555                                 | 0,9   | 5,088   |
| 675                                 | 0,76  | 4,277   |

Nous pouvons en déduire que la distance à la puce à laquelle nous choisissons de placer les atomes de Rydberg aura une influence déterminante sur leur exposition à un effet Stark inhomogène.

### II.2.6 Temps de vie des atomes de Rydberg et température effective

Nous avons calculé, au chapitre I, la durée de vie du niveau  $60S$  à différentes températures. La figure II.25 montre une mesure expérimentale du nombre d'atomes de Rydberg détectés dans le nuage atomique, en fonction du délai entre l'excitation et la détection des atomes de Rydberg. L'ajustement exponentiel de cette mesure donne un temps de vie de  $\tau_{60S} = 210 \pm 4 \mu\text{s}$ , alors que le temps de vie théorique calculé à la température de l'hélium liquide vaut 239,8  $\mu\text{s}$  (cf table I.3). La différence de temps de vie peut s'expliquer par différents effets : les atomes sont exposés au rayonnement du corps noir à température ambiante et à la température de l'azote liquide, qui peut entrer par les hublots d'accès optique. De plus, la géométrie complexe des surfaces conductrices au voisinage des atomes (puce et électrodes) changent la densité de mode du rayonnement électromagnétique par rapport à celle du vide.

Afin de rendre compte simplement de ces effets, nous calculons une température effective. C'est la température pour laquelle le calcul du temps de vie théorique présenté



**Figure II.25** Nombre d'atomes de Rydberg dans le niveau 60S détectés, en fonction du délai entre l'impulsion laser d'excitation et la rampe d'ionisation servant à leur détection. L'ajustement exponentielle donne un temps de vie de  $210 \pm 4 \mu\text{s}$ .

au chapitre I donnerait la valeur de temps de vie mesurée. Cette température effective pour le niveau 60S dans notre cryostat est de 36 K.

## Conclusion

Nous avons, dans le présent chapitre, décrit le fonctionnement du dispositif expérimental sur lequel nous avons effectué nos travaux. Le dispositif cryogénique et la puce à atomes nous permettent de piéger et refroidir des nuages d'atomes de  $^{87}\text{Rb}$  jusqu'à la condensation de Bose-Einstein. Un second aspect du dispositif nous permet d'exciter, manipuler et détecter des atomes de Rydberg au sein de ces nuages d'atomes ultra-froids.

La difficulté particulière que présente la manipulation d'atomes de Rydberg près d'une surface, due à leur très grande sensibilité au champ électromagnétique, a été surmontée par le dépôt contrôlé d'une couche macroscopique de rubidium sur la surface de la puce atomique. Ce dépôt garantit en effet une bonne homogénéité des champs électriques résiduels, mise en évidence par l'étroitesse des raies de transition optique et par la longévité du qubit de Rydberg réalisé entre les niveaux 60S et 61S.

Nous disposons ainsi d'un dispositif performant et prometteur pour l'étude des interactions entre atomes de Rydberg.



## Chapitre III

# Interaction entre atomes de Rydberg sphériques et excitation de gaz dense

Les premières expériences que nous avons menées sur les interactions entre atomes de Rydberg ont eu lieu dans un nuage dense d'atomes froids au sein duquel sont excités de nombreux atomes vers l'état de Rydberg 60S. Cela permet de mettre en évidence deux aspects différents de l'interaction au sein d'un nuage de Rydberg froid : l'influence des interactions sur la dynamique d'excitation des atomes de Rydberg et le mouvement des atomes en interaction au sein du nuage.

Après un rappel de la forme de l'interaction dipolaire, nous en expliquerons les effets sur le mouvement des atomes de Rydberg dans le nuage et sur la dynamique d'excitation de ces mêmes atomes. Nous présenterons ensuite une expérience de spectroscopie optique mettant en évidence ces effets.

Le modèle numérique de simulation que nous avons développé nous permettra de confirmer notre compréhension de ces effets et leur importance. Enfin, nous présenterons une expérience de spectroscopie microonde permettant de sonder plus précisément les énergies d'interactions dans un nuage d'atomes de Rydberg, à différents moments de son expansion.

### III.1 Les effets de l'interaction dipolaire en nuage dense

#### III.1.1 Rappels sur l'interaction dipolaire

L'interaction dipolaire entre deux atomes de Rydberg dans le même état  $|a\rangle$  et séparés d'une distance  $r$  prend la forme suivante, établie en I.3.2 :

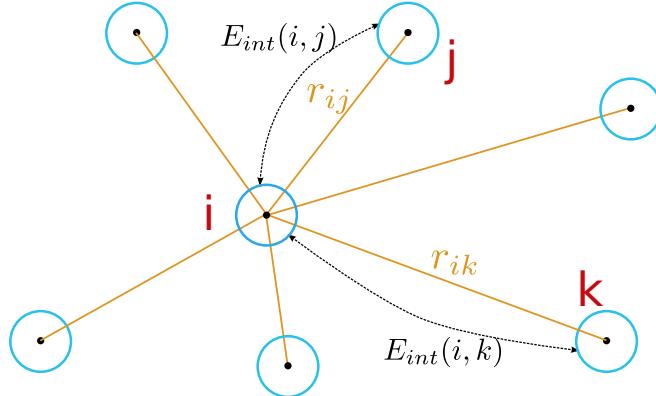
$$\hat{V}_{dd}(r) = \frac{hC_6}{r^6} \cdot |aa\rangle \langle aa| . \quad (\text{III.1})$$

Ce potentiel d'interaction agit donc comme un simple déplacement de l'énergie de la paire d'atomes par une quantité  $E_{int}(r) = hC_6/r^6$ . Nous travaillerons dans l'hypothèse que cette interaction de Van der Waals est additive pour un ensemble de  $N$  atomes. Ainsi, l'atome  $i$  subira la somme des interactions de paire avec les autres atomes  $j$  de

l'ensemble :

$$E_{int}(i) = \sum_{j \neq i} E_{int}(i, j) = \sum_{j \neq i} E_{int}(r_{ij}) = hC_6 \cdot \sum_{j \neq i} \frac{1}{r_{ij}^6}. \quad (\text{III.2})$$

Cette hypothèse d'additivité est valide dès lors que l'on se limite au second ordre du couplage dipôle-dipôle [29, 30]. La figure (III.1) représente un tel ensemble d'atomes en interaction.



**Figure III.1** Ensemble de  $N$  atomes de Rydberg en interaction Van der Waals. L'énergie d'interaction de chaque atome est la somme de ses énergies d'interaction de paire avec tous les autres.

### III.1.2 Mouvement des atomes au sein d'un gaz dense de Rydberg

Le premier effet des interactions dipolaires au sein d'un nuage d'atomes de Rydberg est un effet mécanique. Comme nous l'avons vu en I.3, l'interaction est répulsive entre atomes de Rydberg dans le même niveau  $|nS\rangle$ . Ainsi, deux atomes de Rydberg en interaction dipolaire subiront chacun une force répulsive, directement dérivée de leur énergie d'interaction,

$$F = -\frac{dE_{int}}{dr} = +\frac{6hC_6}{r^7}. \quad (\text{III.3})$$

Cela équivaut à un traitement classique de l'effet mécanique de l'interaction dipolaire, bien que le calcul de cette même interaction ne le soit pas. Cela nous est permis par la forme simple de l'interaction dipolaire entre deux atomes dans le même état de Rydberg, donnée par l'équation (III.1), qui consiste en un simple déplacement d'énergie du niveau de paire  $|aa\rangle$ .

Prenons l'exemple de deux atomes dans le niveau 60S, séparés d'une distance de  $5 \mu\text{m}$  : leur énergie d'interaction vaut  $hC_6/r^6 = h \cdot 137,6 \text{ GHz } \mu\text{m}^6/(5 \mu\text{m})^6 = 8,8 \text{ MHz}$ . Ils se repoussent donc avec une force valant  $6hC_6/r^7 = 6,97 \times 10^{-21} \text{ N}$ . Étant donnée la masse du rubidium, cette force répulsive correspond à une accélération valant  $F/m_{Rb87} = 4,83 \times 10^4 \text{ m s}^{-2}$ , soit 5000 fois plus que l'accélération de la gravité. Une intégration numérique grossière permet d'extraire un ordre de grandeur du déplacement des atomes : en  $20 \mu\text{s}$ , ils auront presque atteint leur vitesse relative maximale de

0,284 m s<sup>-1</sup> et en 10 µs seulement la distance qui les sépare aura augmenté de 1,75 µm. Leur énergie d'interaction aura par là chuté d'un facteur 5,77, ce qui constitue une modification considérable du système.

La généralisation à  $N$  atomes se fait en additionnant vectoriellement les forces répulsives dues à chaque interaction de paire :

$$\mathbf{F}(i) = \sum_{j \neq i} -\nabla E_{int}(i, j) = \sum_{j \neq i} \frac{6hC_6}{r_{ij}^7} \cdot \frac{-\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} = -6hC_6 \cdot \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^8}. \quad (\text{III.4})$$

Cette force répulsive décroît très vite avec la distance. On s'attend ainsi à ce que deux atomes de Rydberg en interaction s'accélèrent mutuellement pendant un temps court, se propageant ensuite balistiquement dans des directions opposées. C'est ce que confirme l'exemple de la paire |60S, 60S⟩ précédemment cité. Il est intéressant de noter qu'au sein d'un nuage d'atomes de Rydberg, les atomes du cœur sont repoussés par les interactions dipolaires de tous les côtés. Les atomes du bord du nuage seront alors expulsés en premier, puis petit à petit les atomes plus au centre pourront commencer à se déplacer. Le nuage subit ainsi une expansion hydrodynamique non triviale, que nous mesurerons expérimentalement et simulerons numériquement.

### III.1.3 Deux régimes d'excitation en interaction dipolaire forte

Les interactions dipolaires ont également une influence importante sur l'excitation d'un ensemble dense d'atomes de Rydberg. En effet, la présence d'un atome de Rydberg conditionne l'excitation ultérieure d'autres atomes de Rydberg dans son voisinage. Lorsque l'excitation est faite à résonance, cet effet est connu sous le nom de « blocage dipolaire ».

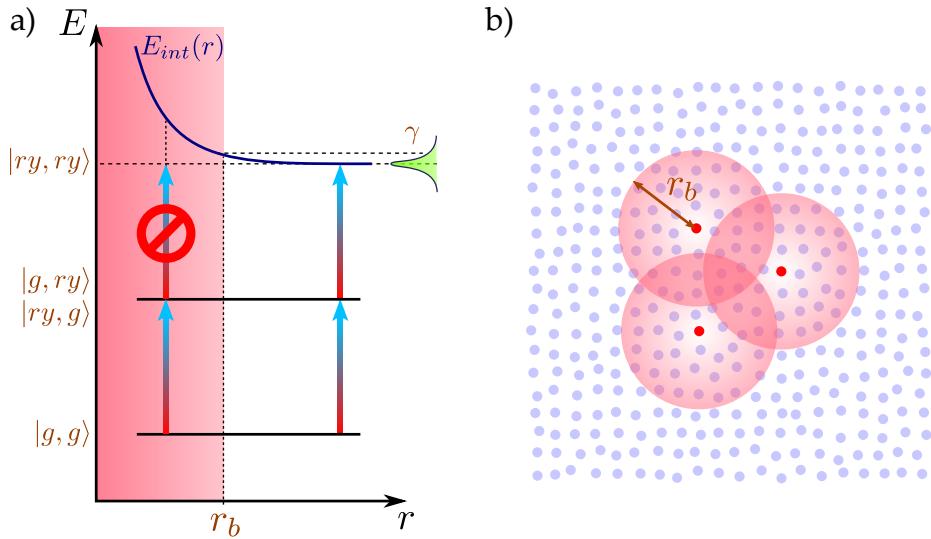
#### Blocage dipolaire et super-atomes

Le mécanisme du blocage dipolaire est illustré en figure (III.2 a)). Considérons deux atomes dans l'état fondamental |g⟩, séparés d'une distance  $r$ . L'état de la paire est alors |g, g⟩. Un laser est accordé à résonance pour exciter l'un quelconque de ces deux atomes vers le niveau de Rydberg |ry⟩. L'état de la paire devient ainsi |g, ry⟩. Si l'on souhaite exciter le second atome vers le niveau |ry⟩, alors il faut considérer l'énergie nécessaire à la transition |g, ry⟩ → |ry, ry⟩. Or ce dernier état de paire subit un déplacement d'énergie dû à l'interaction de Van der Waals

$$\Delta E_{|ry, ry\rangle}(r) = E_{|ry, ry\rangle}(r) - E_{|ry, ry\rangle}(\infty) = E_{int}(r). \quad (\text{III.5})$$

Le laser, qui était à résonance avec la transition |g, g⟩ → |g, ry⟩, n'est ainsi plus à résonance avec la transition |g, ry⟩ → |ry, ry⟩. L'excitation du second atome vers un niveau de Rydberg s'en trouve bloquée.

La transition n'est pas infiniment fine spectralement et l'effet de blocage dipolaire sera limité par sa largeur spectrale, dominée en pratique par la largeur du laser. On peut en effet considérer que le laser est résonant avec la transition dès lors que le désaccord entre eux est inférieur à la demi-largeur spectrale  $\gamma/2$  de la raie d'excitation. Nous définirons ainsi le « rayon de blocage »  $r_b$  comme étant la distance en-deçà de laquelle



**Figure III.2** Illustration du mécanisme de blocage dipolaire. **a)** Diagramme d'énergie des niveaux de paire à zéro, un ou deux atomes excités, en fonction de la distance interatomique  $r$ .  $|g\rangle$  est le niveau fondamental et  $|ry\rangle$  le niveau de Rydberg considéré. Aux courtes distances, l'interaction dipolaire déplace l'excitation du deuxième atome vers le niveau de Rydberg hors de résonance avec le laser ayant excité le premier atome.  $\gamma$  représente la largeur spectrale de la raie d'excitation à un atome,  $E_{int}$  l'énergie d'interaction entre deux atomes de Rydberg et  $r_b$  le « rayon de blocage ». **b)** Généralisation à un ensemble d'atomes. Les points bleus sont des atomes dans l'état fondamental et les points rouges sont des atomes de Rydberg. Le mécanisme de blocage empêche l'excitation de deux atomes de Rydberg dans un même sphère de rayon  $r_b$ , représentée par les disques rouges.

le désaccord est supérieur à la demi-largeur spectrale :

$$\Delta E_{int}(r_b) = \gamma/2 \quad (\text{III.6})$$

Dans le cas qui nous intéresse, l'interaction dipolaire a une forme de Van der Waals en  $1/r^6$ , permettant de réécrire l'équation (III.6) sous la forme

$$\frac{C_6}{r^6} = \gamma/2, \text{ soit } r_b = \sqrt[6]{\frac{C_6}{\gamma/2}} \quad (\text{III.7})$$

Le mécanisme de blocage est donc effectif à l'intérieur d'un « volume de blocage » autour de chaque atome de Rydberg déjà excité. Ce volume de blocage est une sphère de rayon  $r_b$ , représentée en figure (III.2 b)).

Revenons au cas de deux atomes : il existe deux états de paire à une excitation, qui sont  $|g, ry\rangle$  et  $|ry, g\rangle$ . Ces deux états sont dégénérés et le laser couple le niveau fondamental  $|g, g\rangle$  indifféremment à  $|g, ry\rangle$  et à  $|ry, g\rangle$ , avec même une fréquence de Rabi  $\Omega$ . La combinaison symétrique  $|D\rangle = (|g, ry\rangle + |ry, g\rangle)/\sqrt{2}$ , appelée état collectif de Dicke des deux atomes, est alors couplée à l'état fondamental avec une fréquence de Rabi augmentée  $\Omega\sqrt{2}$ . Ce facteur d'accroissement a été mis en évidence expérimentalement par le groupe de A. Browaeys et P. Grangier [31], en observant deux atomes piégés dans des pinces optiques.

L'idée se généralise au cas à  $N$  atomes en utilisant encore une fois le modèle de Dicke. Dans un rayon de blocage contenant  $N_b$  atomes, l'état du système oscille entre l'état fondamental et l'état de Dicke à une excitation, toute excitation supplémentaire étant interdite par blocage dipolaire. Cette oscillation se fait cette fois avec une fréquence de Rabi  $\Omega\sqrt{N_b}$ . Un modèle simple de ce phénomène consiste à voir l'ensemble de ces  $N_b$  atomes comme un unique « super-atome » ayant un moment de transition dipolaire  $\sqrt{N_b}$  plus grand que celui d'un atome isolé. Ce modèle de super-atome a été exploité avec succès pour expliquer des observations expérimentales par les groupes d'I. Bloch [32] et de H. Ott [33].

### Excitation facilitée et agrégats de Rydberg

Dans le régime de blocage dipolaire, l'interaction entre atomes de Rydberg désaccorde toute excitation supplémentaire au voisinage d'un premier atome de Rydberg. On peut alors imaginer décaler la fréquence du laser d'excitation de façon à compenser ce désaccord et ainsi retrouver une condition de résonance.

Reprendons le cas de deux atomes présenté ci-dessus en figure (III.2). Considérons cette fois un laser désaccordé de  $\Delta$  par rapport à la transition  $|g, g\rangle \rightarrow |g, ry\rangle$ . Le premier atome pourra toujours être excité hors résonance par le laser désaccordé. Le second atome sera ensuite excité, à résonance, si la condition

$$\Delta = E_{int}(r)/h = \frac{C_6}{r^6} \quad (\text{III.8})$$

est satisfaite. À un désaccord laser  $\Delta$  fixé correspond ainsi un « rayon de facilitation », défini par

$$r_f = \sqrt[6]{\frac{C_6}{\Delta}}. \quad (\text{III.9})$$

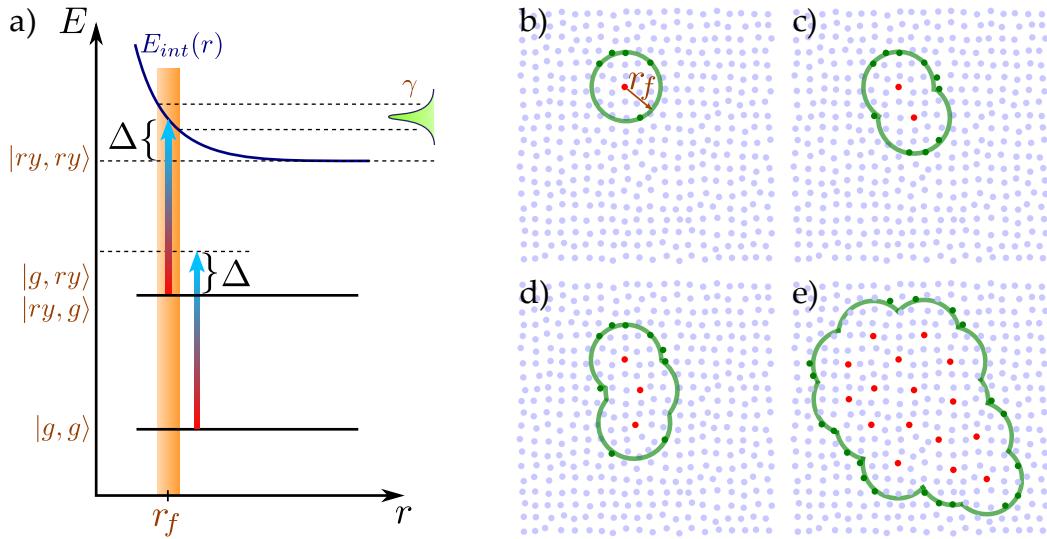
En raison de la largeur spectrale  $\gamma$  du laser, l'excitation du second atome de Rydberg est donc « facilitée » par la présence du premier, dès lors qu'ils sont séparés d'une distance  $r_f \pm \delta r_f$ , où  $\delta r_f = \frac{1}{2} \left( \sqrt[6]{C_6/(\Delta - \gamma/2)} - \sqrt[6]{C_6/(\Delta + \gamma/2)} \right)$ , soit  $\delta r_f \simeq r_f \gamma / (3\Delta)$  au premier ordre en  $\gamma/\Delta$ . La figure (III.3 a) )représente ce mécanisme d'« excitation facilitée » .

Au sein d'un ensemble d'atomes, chacun a une probabilité égale d'être le premier atome excité, hors résonance, vers un niveau de Rydberg. Dès lors que ce premier atome de Rydberg est excité, l'excitation est facilitée pour les atomes qui sont à une distance  $r_f$  de celui-ci, vérifiant par-là la condition (III.9). L'excitation facilitée continue ainsi de proche en proche, tant qu'il existe un atome  $i$  satisfaisant

$$\Delta = \sum_{j \neq i} \frac{C_6}{r_{ij}}, \quad (\text{III.10})$$

où la somme est faite sur tous les atomes de Rydberg  $j$  déjà excités, situés chacun à distance  $r_{ij}$  de l'atome  $i$ .

Le phénomène de blocage dipolaire est remplacé ici par la formation rapide d'un « agrégat de Rydberg » fortement corrélé, autour du premier atome de Rydberg, la



**Figure III.3** Mécanisme de d'excitation facilitée. a) Diagramme d'énergie des niveaux de paire à zéro, une ou deux atomes excités, en fonction de la distance interatomique  $r$ . Le premier atome de Rydberg est excité hors résonance. Le désaccord  $\Delta$  du laser permet de compenser l'interaction dipolaire à la distance  $r_f$  et d'exciter à résonance le second atome. b) - e) Évolution dans le temps d'un agrégat de Rydberg. Les points bleus représentent l'ensemble de départ d'atomes dans l'état fondamental et les points rouges représentent les atomes de Rydberg. Les bandes vertes représentent les régions « facilitées » définies par l'équation (III.10) où de nouveaux atomes de Rydberg peuvent être excités à résonance.

« graine » de cet agrégat. Les distances relatives entre atomes de Rydberg sont déterminées par l'équation (III.10) et donc contrôlées par le désaccord  $\Delta$  du laser d'excitation. La figure (III.3 b)-e)) représente cette excitation séquentielle facilitée d'un agrégat de Rydberg.

## III.2 Observation expérimentale des interactions

Afin de mettre en évidence les effets des interactions dipolaires, nous avons mené deux expériences complémentaires. En premier lieu, la spectroscopie optique du nuage permet de s'intéresser à l'excitation sous blocage dipolaire fort et à l'excitation facilitée à désaccord positif. Ensuite, la spectroscopie microonde du nuage, à différents délais après l'excitation laser, permet de sonder la distribution des énergies d'interaction au sein du nuage au cours de son expansion. Ces expériences sont discutées en détail dans la thèse de Raul Celistrino Teixeira [21].

### III.2.1 Spectroscopie optique du nuage : différents régimes d'excitation

#### Conditions de l'expérience

L'expérience de spectroscopie optique visse à observer l'excitation des atomes de Rydberg sous l'influence des interactions dipolaires, dans les régimes de blocage et d'excitation facilitée. Cela nécessite, entre autres, un nuage d'atomes dans l'état fondamental

suffisamment dense afin que la condition de facilitation (III.10) puisse être satisfaite. Cependant, une forte densité d'atomes dans l'état fondamental risque d'interférer avec l'excitation de Rydberg, indépendamment des interactions dipolaires. En effet, l'électron de Rydberg, qui est presque libre, est sensible à cette densité atomique. En première approximation, l'interaction entre l'électron de Rydberg et les atomes dans l'état fondamental prend la forme d'un déplacement d'énergie  $V_e$  proportionnel à la densité atomique moyenne  $\bar{\rho}$  [34] :

$$V_e = \frac{2\pi\hbar^2 a_s}{m_e} \bar{\rho}, \quad (\text{III.11})$$

où  $a_s$  est la longueur de diffusion caractérisant la force de l'interaction. Le groupe de T. Pfau a mis en évidence cette interaction et obtenu une longueur de diffusion pour le  $^{87}\text{Rb}$  valant  $a_s = -16,1 a_0$ , indépendante du nombre quantique principal  $n$  [34]. Dans un condensat de Bose-Einstein avec une densité atomique typique de  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , l'énergie d'interaction est de l'ordre de  $V_e/h = -1 \text{ MHz}$ . Dans ce cas, nous serions en présence de deux interactions antagoniste de même ordre de grandeur : l'interaction dipôle-dipôle répulsive, qui augmente l'énergie des niveaux de Rydberg et l'interaction de l'électron de Rydberg avec les atomes dans l'état fondamental, qui abaisse l'énergie des niveaux de Rydberg. Cela aurait pour effet de réduire le rayon de blocage, qui dépend directement de la largeur spectrale de l'excitation sans interaction dipolaire.

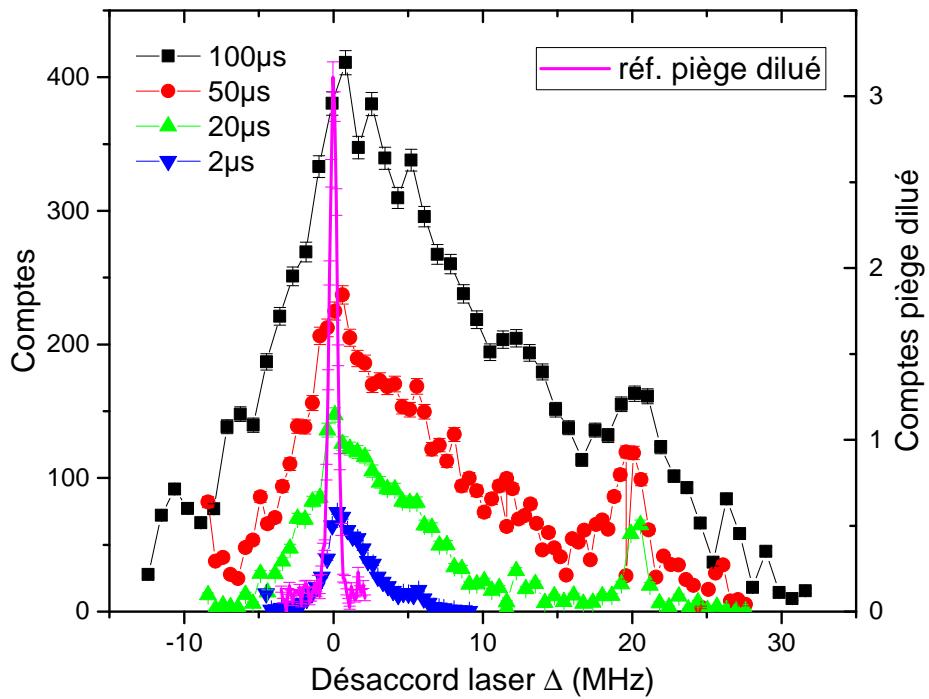
Il nous a fallu trouver une densité atomique permettant l'observation de l'excitation facilitée et du blocage dipolaire, tout en limitant l'effet d'interaction de l'électron de Rydberg avec les atomes dans l'état fondamental. La spectroscopie optique de l'excitation de Rydberg a été faite dans un nuage thermique froid et non dans un condensat de Bose Einstein. Ce nuage comporte  $12\,000 \pm 1000$  atomes, piégés magnétiquement à environ  $210 \mu\text{m}$  de la puce atomique. Le piège prend une forme très allongée dans la direction  $x$ , et les atomes sont refroidis à une température de  $500 \pm 150 \text{ nK}$ . Le profil de densité atomique est alors gaussien dans les trois directions, avec des rayons à  $e^{-1/2}$  valant respectivement  $(\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z) = (23,2; 4,5; 4,2) \mu\text{m}$ . La densité au centre vaut ici  $n_0 = 1,7 \pm 0,15 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Cela limite l'interaction de l'électron de Rydberg avec les atomes dans l'état fondamental à une énergie  $V_e = -168 \text{ kHz}$ , très inférieure à la largeur spectrale d'excitation à un atome, estimée \* à  $2\gamma = 626 \text{ kHz}$ . La contribution de cette interaction pourra ainsi être négligée dans la suite de notre discussion.

## Résultats expérimentaux

Les spectres d'excitation du niveau de Rydberg 60S depuis le niveau fondamental 5S, obtenus pour différentes durées d'impulsion laser, sont représentés en figure (III.4). Le graphe représente aussi un spectre d'excitation dans un nuage dilué et à faible taux d'excitation, servant de spectre de référence sans interactions. Un élargissement vers les hautes fréquences apparaît très clairement dès les faibles temps d'excitation. Cet élargissement est caractéristique de l'excitation facilitée par interactions : une fois le premier atome de Rydberg excité, un agrégat se forme rapidement autour et permet

---

\*. Cette valeur est extraite de l'ajustement gaussien d'un spectre d'excitation optique dans un piège dilué et à faible excitation, donc sans interactions dipolaires. Ce spectre est présenté comme référence en figure (III.4).

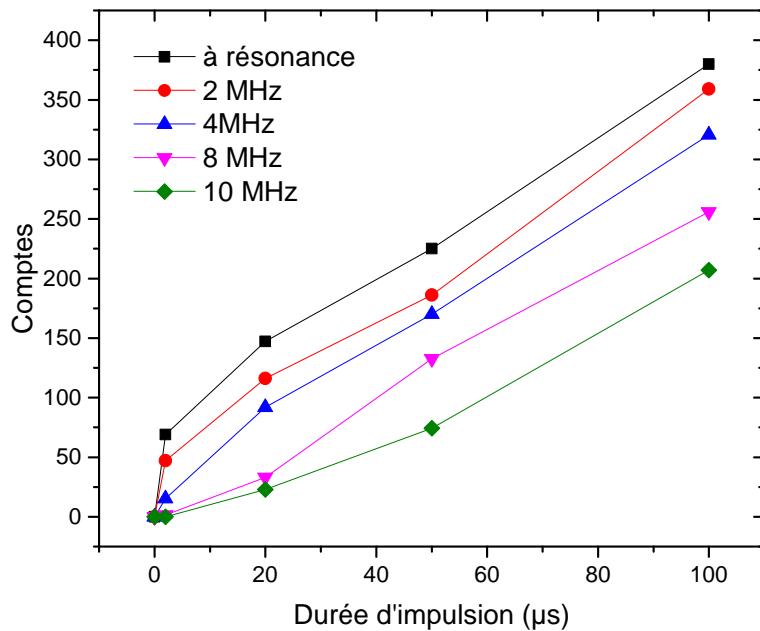


**Figure III.4** Spectres optiques d'excitation en régime d'interaction dipolaire forte. L'excitation est réalisée à différentes durées d'impulsion laser : 2, 20, 50 et 100  $\mu$ s. La courbe magenta est un spectre de référence sans interaction, représenté avec une échelle différente (échelle de droite). Les pics d'excitation autour de  $\Delta = 20$  MHz sont dûs à la modulation en fréquence du laser, nécessaire à sa stabilisation par un dispositif Pound-Drever-Hall.

d'amplifier largement l'excitation à désaccord positif. Plus le désaccord est élevé cependant, plus longtemps se fera attendre cette première excitation, ce qui explique l'élargissement de plus en plus prononcé aux temps d'impulsion longs.

Cela se voit très bien sur les graphes de la figure (III.5), qui représente l'évolution du nombre d'atomes de Rydberg excité en fonction de la durée d'impulsion laser, pour différents désaccords. On y remarque effectivement qu'à grand désaccord, le nombre d'atome de Rydberg présente un effet de seuil correspondant à l'excitation non résonante de la « graine ».

Le comportement à résonance montre une croissance rapide du nombre d'atomes excités dans les premiers instants, puis une augmentation plus lente. En effet, le centre nuage est saturé de super-atomes en régime de blocage fort dès les premières microsecondes. Ensuite, de nouveaux atomes de Rydberg sont excités dans les ailes peu denses du nuage. Celles-ci contiennent beaucoup moins d'atomes dans l'état fondamental d'une part, et le laser bleu y est moins intense d'autre part. Ces deux facteurs contribuent à ralentir fortement la dynamique d'excitation dans ces régions-là. Enfin, le mouvement d'expansion du nuage de Rydberg dû aux interactions éloigne les super-atomes les uns des autres au centre du nuage, où de nouvelles excitations deviennent possibles après quelques dizaines de microsecondes. Cela explique pourquoi le nombre d'atomes de Rydberg continue d'augmenter, contrairement aux prédictions de l'approximation du « gaz gelé ».



**Figure III.5** Saturation de l'excitation optique en régime d'interaction dipolaire forte. Évolution du nombre d'atomes de Rydberg en fonction de la durée d'impulsion laser, pour différents désaccords : 0, 2, 4, 8 et 10 MHz. Les données sont extraites des spectres de la figure (III.4).

### III.2.2 Spectroscopie microonde : une sonde pour l'énergie d'interaction

Afin de mieux comprendre le mouvement au sein du nuage de Rydberg, nous avons réalisé la spectroscopie de la transition  $60S \rightarrow 57S$  dans différentes conditions. Nous présentons ici le principe de cet outil de spectroscopie microonde comme sonde des énergies d'interaction dans le nuage, et les expériences que nous avons menées.

#### Principe de la spectroscopie microonde et choix de la transition

Comme nous l'avons vu au chapitre I, les différents niveaux de Rydberg sont affectés différemment par les interactions dipolaires. En particulier, dans le régime de Van der Waals, cela se traduit par des coefficients de Van der Waals  $C_6$  différents. Ainsi, le niveau  $nS$  et le niveau  $n'S$  verront leur énergie déplacée de quantités différentes pour une même distance inter-atomique. En conséquences, les fréquences de transition entre niveaux de Rydberg seront décalées. Sonder ces décalages de fréquence, c'est-à-dire faire la spectroscopie de telles transitions, nous renseignera sur la distribution des énergies d'interaction au sein du nuage. Idéalement, un seul atome du nuage sera transféré vers un autre niveau de Rydberg, et la fréquence de cette transition nous renseignera sur l'énergie d'interaction de cet atome avec tous ses voisins.

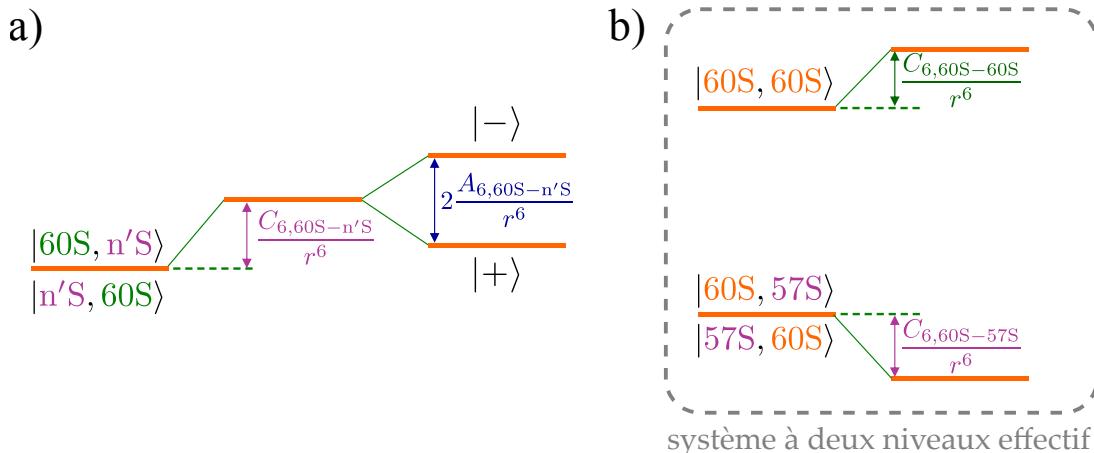
Cela requiert cependant un choix attentif du niveau vers lequel seront transférés les atomes de Rydberg. En premier lieu, les niveaux  $P$  sont à éviter. La branche attractive de l'interaction  $nS - n'P$  mène à une ionisation de Penning des atomes de Rydberg : l'atome dans le niveau  $nS$  et l'atome dans le niveau  $n'P$  s'attirent l'un l'autre, et s'ionisent mutuellement lorsqu'ils sont trop proches. Nous restreindrons donc notre

choix aux niveaux  $n'S$  voisins du  $60S$ , accessibles par des transitions à deux photons.

Pour une paire d'atomes séparés de  $r$ , l'interaction  $60S - n'S$  prend la forme de l'équation (I.33) :

$$V_{eff}/h = \frac{\langle 60S - n'S |}{\langle n'S - 60S |} \begin{pmatrix} C_{6,60S-n'S} & A_{6,60S-n'S} \\ A_{6,60S-n'S} & C_{6,60S-n'S} \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{r^6}, \quad (\text{III.12})$$

où  $C_6$  et  $A_6$  sont les coefficients de Van der Waals pour l'interaction directe et pour l'interaction d'échange respectivement. Les états  $|60S - n'S\rangle$  et  $|n'S - 60S\rangle$  sont dégénérés et séparés en leurs combinaisons symétrique et antisymétrique,  $(|60S - n'S\rangle \pm |n'S - 60S\rangle)/\sqrt{2}$ . Ces deux états propres sont déplacés d'une énergie  $h \cdot (C_{6,60S-n'S} \pm A_{6,60S-n'S})/r^6$ . Cette structure de niveaux est représentée en figure (III.6 a)). La levée



**Figure III.6** Structure de niveau  $60S-nS$  sous interaction dipolaire **a)** La paire  $60S - nS$  est déplacée en énergie par le terme d'interaction directe  $C_{6,60S-nS}/r^6$  et ses deux états dégénérés sont séparés par l'interaction d'échange, avec un écart d'énergie de  $2A_{6,60S-nS}/r^6$ . **b)** Diagramme d'énergie d'une paire dans les niveaux  $60S - 60S$  et  $60S - 57S$ . Le terme d'échange  $A_{6,60S-57S}$  étant quasi-nul, la dégénérescence des niveaux de paire  $|60S, 57S\rangle$  et  $|57S, 60S\rangle$  n'est pas levée et la paire se comporte comme un système à deux niveaux. La transition entre ces deux niveaux est déplacée par les interactions dipolaires.

de dégénérescence des niveaux de paire engendre des spectres à deux raies de transition, séparées en fréquence de  $2A_{6,60S-nS}/r^6$ . Si l'on y ajoute un troisième atome de Rydberg, il y a alors trois paires en interaction, ce qui complexifie d'autant plus la structure de niveaux et le spectre de la transition. En fin de compte, au sein d'un ensemble de  $N$  atomes de Rydberg dans le niveau  $60S$ , une excitation du niveau  $n'S$  sera délocalisée sur des états propres à  $N$  atomes. Ces états propres sont des combinaisons linéaires de la base séparable  $\{|i\rangle = |60S\rangle_1 \otimes \dots \otimes |n'S\rangle_i \otimes \dots \otimes |60S\rangle_N$ , très dépendantes de la configuration du nuage. Plus la base des états propres à une excitation est différente de la base des  $|i\rangle$ , plus le spectre d'excitation devient difficile à relier aux énergies d'interaction.

Le niveau  $n'S$  idéal serait donc celui pour lequel les états propres à une excitation sont ceux où l'excitation est localisée sur un atome. Pour cela, le terme d'échange  $A_6$ , responsable de la délocalisation de l'excitation, doit être le plus petit possible,

c'est-à-dire très petit devant  $C_6$ . La table (III.1) répertorie les coefficients de Van der Waals  $C_{6,60S-n'S}$  et  $A_{6,60S-n'S}$  pour les niveaux  $n'S$  proches du 60S. On y trouve les

**Table III.1** Coefficients de Van der Waals pour différents niveaux  $60S - n'S$

|         | $C_{6,60S-n'S}$<br>(GHz $\mu\text{m}^6$ ) | $A_{6,60S-n'S}$<br>(GHz $\mu\text{m}^6$ ) |
|---------|---|---|
| 60S-63S | -89,26                                    | 0,61                                      |
| 60S-62S | -411,36                                   | 14,96                                     |
| 60S-61S | 292,25                                    | 248,60                                    |
| 60S-60S | 137,62                                    |   |
| 60S-59S | 245,13                                    | 209,55                                    |
| 60S-58S | -209,26                                   | 7,77                                      |
| 60S-57S | -43,67                                    | 0,30                                      |

niveaux 63S et 57S, qui présentent des termes d'échanges avec le 60S petits devant les termes d'interaction directe ( $C_6/A_6 \sim 150$ ). Étant donné le caractère attractif de l'interaction directe pour les paires 60S – 57S et 60S – 63S, il est préférable de choisir la plus petite de ces interactions afin de limiter le processus d'ionisation de Penning que nous décrivions pour les paires  $nS - n'P$ .

Nous choisirons donc, pour faire la spectroscopie microonde du nuage de Rydberg, la transition 60S – 57. Nous disposerons ainsi d'un diagramme de niveaux simple, représenté pour deux atomes en figure (III.6 b)), fournissant un système effectif à deux niveaux. Lorsque les deux atomes n'interagissent pas, la transition à deux photons du niveau de paire  $|60S, 60S\rangle$  vers les niveaux de paire dégénérés  $|57S, 60S\rangle$  et  $|60S, 57S\rangle$  se fait à une fréquence  $\nu_0 = 2 \times 58,229 \text{ GHz}$ . En présence d'interactions, la transition est déplacée d'une quantité

$$\Delta\nu(r) = \frac{C_{6,60S60S} - C_{6,60S-57S}}{r^6} = \eta \frac{C_{6,60S60S}}{r^6}, \quad (\text{III.13})$$

avec  $\eta = 1,317$ .

La généralisation à un ensemble de  $N$  atomes de Rydberg se fait dans l'hypothèse d'additivité des interactions de Van der Waals. Ils sont initialement tous dans l'état 60S, et l'on suppose que l'impulsion microonde de spectroscopie ne crée qu'une seule excitation 57S. Grâce à la faiblesse du terme d'échange  $A_{6,60S57S}$ , nous pouvons supposer que cette excitation sera localisée sur un atome de l'ensemble, l'atome  $i$ , cependant que tous les autres resteront dans l'état 60S. L'énergie d'interaction de l'atome  $i$  avant excitation est, comme à l'équation (III.2), de

$$E_{int}(i, 60S) = hC_{6,60S60S} \sum_{j \neq i} \frac{1}{r_{ij}^6}. \quad (\text{III.14})$$

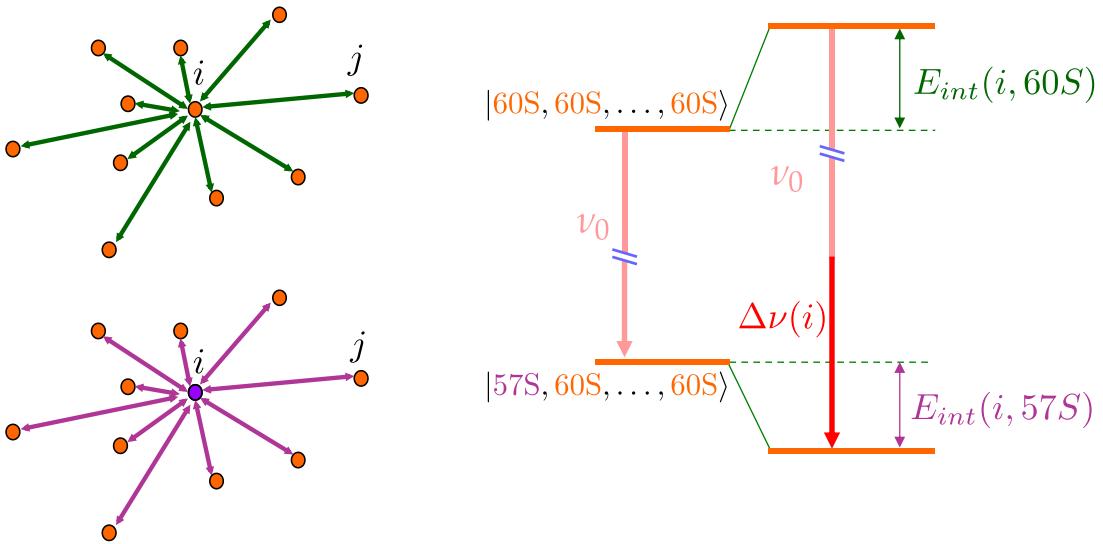
Lorsque l'atome  $i$  est transféré dans l'état 57S, son énergie d'interaction devient

$$E_{int}(i, 57S) = hC_{6,60S57S} \sum_{j \neq i} \frac{1}{r_{ij}^6}. \quad (\text{III.15})$$

Le déplacement en fréquence de la transition  $60S - 57S$  de l'atome  $i$ , dû aux interactions dipolaires, vaut donc

$$\Delta\nu(i) = \frac{1}{h}(E_{int}(i, 60S) - E_{int}(i, 57S)) = \eta \frac{E_{int}(i, 60S)}{h}. \quad (\text{III.16})$$

Ce système à  $N$  atomes est représenté en figure (III.7). On peut ainsi sonder la distri-



**Figure III.7** Structure de niveaux d'un nuage de  $60S$  contenant une excitation  $57S$ . La faiblesse du terme d'échange dans l'interaction  $60S - 57S$  permet que cette excitation soit localisée sur un atome  $i$ . La transition microonde permettant de transférer l'atome  $i$  est décalée en fréquence d'une quantité  $\Delta\nu(i)$  par les interactions dipolaires.

bution des énergies d'interaction au sein du nuage. En effet, la probabilité qu'un atome  $i$  voie sa fréquence de transition déplacée de  $\Delta\nu(i) = \Delta\nu$  est égale à la probabilité que son énergie d'interaction ait été de  $E_{int}(i, 60S) = h\Delta\nu/\eta$  :

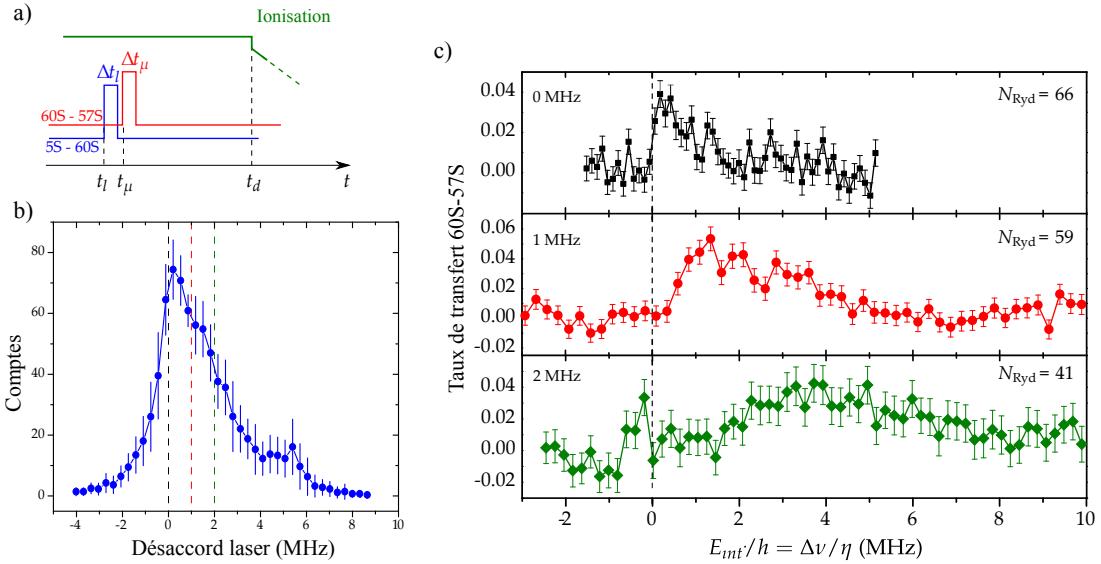
$$P(\Delta\nu(i) = \Delta\nu) = P\left(\eta \frac{E_{int}(i, 60S)}{h} = \Delta\nu\right) = P\left(E_{int}(i, 60S) = \frac{h\Delta\nu}{\eta} = E_{int}\right). \quad (\text{III.17})$$

Du spectre microonde de la transition, qui représente la distribution  $P(\Delta\nu)$ , on déduit directement la distribution  $P(E_{int})$  des énergies d'interaction dans le nuage par la transformation  $\Delta\nu = \eta E_{int}/h$ .

### Spectres des énergies d'interaction

Cet outil de spectroscopie microonde nous a servi à sonder les énergies d'interaction au sein de différents nuages de Rydberg. À partir d'une excitation laser d'une durée de  $2\text{ }\mu\text{s}$ , telle que décrite en III.2.1, nous sélectionnons différents désaccords. Nous sondons ainsi un nuage excité à résonance, un nuage excité avec un désaccord  $\Delta = 1\text{ MHz}$  et un nuage excité avec un désaccord  $\Delta = 2\text{ MHz}$ . Une impulsion microonde  $\pi$  sur la transition  $57S - 60S$  est envoyée immédiatement après l'impulsion laser d'excita-

tion. La fréquence de cette impulsion est balayée de façon à obtenir la distribution  $P(h\Delta\nu/\eta)$  des énergies d'interaction. Nous en obtiendrons la distribution des énergies d'interaction dans trois cas : sous blocage dipolaire fort ( $\Delta = 0$ ), sous excitation facilitée ( $\Delta = 2$  MHz), et dans un régime intermédiaire ( $\Delta = 1$  MHz). La séquence expérimentale et les spectres obtenus sont représentés en figure (III.8). La fraction



**Figure III.8** Spectroscopie microonde du nuage avant expansion. **a)** Séquence expérimentale de la spectroscopie : une impulsion laser envoyée à l'instant  $t_l$  et d'une durée de  $\Delta t_l$  est suivie d'une impulsion microonde, envoyée à l'instant  $t_\mu$  et durant  $\Delta t_\mu$ . La détection est effectuée par une rampe d'ionisation déclenchée à l'instant  $t_d$ . **b)** Spectre laser de la transition  $5S - 60S$ . Les lignes pointillées marquent les désaccord choisis de 0, 1 et 2 MHz. **c)** Spectres microonde de la transition  $60S - 57S$  pour différents désaccords laser  $\Delta = 0, 1, 2$  MHz.

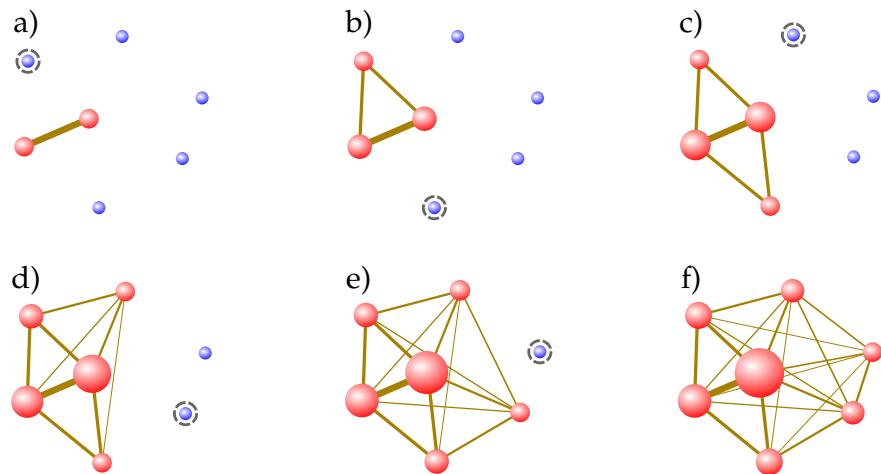
atomique transférée vers le niveau  $57S$  est tracée comme fonction de l'énergie d'interaction, c'est-à-dire du déplacement en fréquence de la transition renormalisé  $\Delta\nu/\eta$ . Le faible nombre d'excitations vers le  $57S$  (toujours  $< 3$ ) permet de confirmer l'hypothèse d'atome unique qui justifie la méthode de spectroscopie par l'équation (III.16). On peut redouter une ionisation de Penning entre les atomes dans le niveau  $57S$  et les atomes dans le niveau  $60S$  en raison de l'attractivité de leur interaction. Cependant, cette interaction est suffisamment faible pour estimer que les atomes sont détectés avant que cela ne se produise<sup>†</sup>.

En figure (III.8 c)), l'axe des abscisses donne directement l'énergie d'interaction  $E_{int}$  des atomes. Or, d'après l'équation (III.14), le plus proche voisin d'un atome ayant une énergie d'interaction  $E_{int}$  ne peut être à une distance de celui-ci inférieure à  $r_E(E_{int}) = (hC_{6,60S-60S}/E_{int})^{1/6}$ . À désaccord laser nul  $\Delta = 0$ , le spectre microonde est déplacé d'environ la largeur laser  $\gamma/2$ , ce qui tend à confirmer le fait que le nuage est saturé de super-atomes. En effet dans ce cas, chaque atome de Rydberg a au moins un voisin à une distance d'un rayon de blocage  $r_b$  et donc avec une interaction d'énergie  $E_{int}(r_b) = \gamma/2$ . Chaque voisin supplémentaire augmente l'énergie d'interaction d'au maximum  $\gamma/2$ ,

<sup>†</sup>. Nous pouvons confirmer cela à l'étude des signaux d'ionisation, qui montrent l'absence d'ions préexistants à la rampe de détection.

expliquant la queue du spectre jusqu'à 2 MHz pour les atomes ayant le plus de voisins. Enfin, l'absence de signal au-delà de  $E_{int} = 2$  MHz indique l'absence de paires atomiques séparées de moins de  $r_E(2$  MHz) = 6,4 μm, en raison du blocage dipolaire.

Aux désaccords laser positifs  $\Delta > 0$ , le mécanisme de facilitation excite le nuage de Rydberg avec, pour chaque nouvel atome, une énergie d'interaction égale à  $\Delta$ . Cela décale le spectre vers les hautes énergies, en excitant des atomes de Rydberg de plus en plus proches les uns des autres à mesure qu'augmente le désaccord  $\Delta$ . Le désaccord positif du laser produit ainsi un agrégat de Rydberg. Au cœur de cet agrégat, chaque atome de Rydberg a plusieurs voisins, qui contribuent tous à augmenter son énergie d'interaction. De même que dans le cas  $\Delta = 0$  du blocage dipolaire fort, les queues à haute fréquence des spectres sont attribuées à ces atomes du centre du nuage. La figure (III.9) représente la formation d'un tel agrégat de Rydberg et l'accumulation de l'énergie d'interaction qui s'en suit.

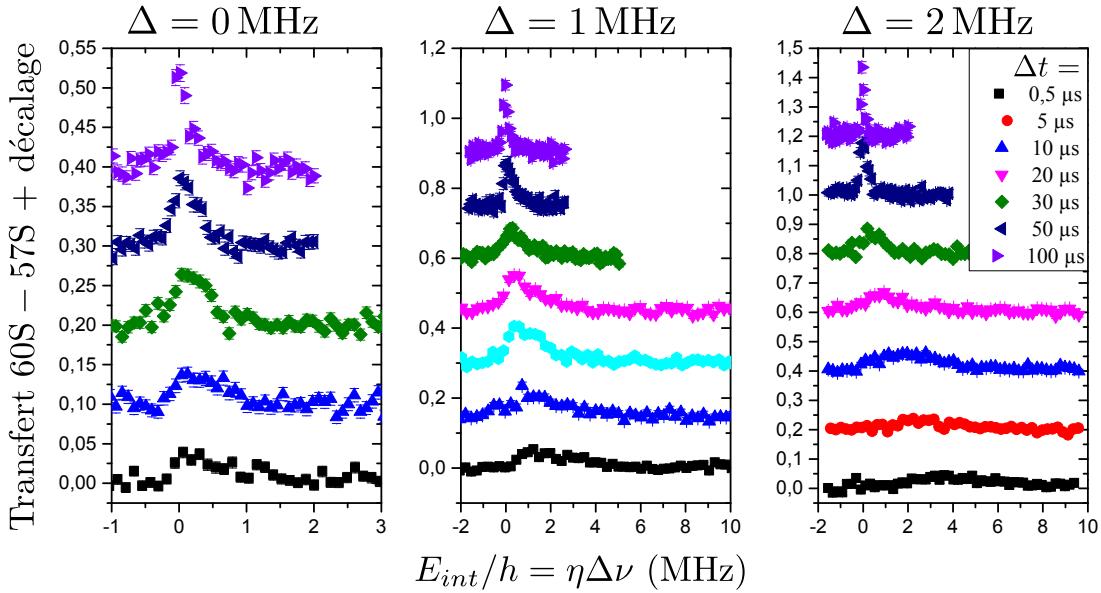


**Figure III.9** Formation d'un agrégat de Rydberg et accumulation de l'énergie d'interaction, de a) à e). Les sphères bleues représentent des atomes dans l'état fondamental et les sphères rouges des atomes de Rydberg. Les cercles pointillés autour des sphères bleues signalent quel atome sera excité à l'étape suivante. L'épaisseur de la ligne joignant deux atomes de Rydberg représente la force de l'interaction entre ces deux atomes. La taille de chaque sphère rouge représente l'énergie d'interaction totale de l'atome de Rydberg correspondant.

### Évolution au cours du temps : explosion du nuage

Après excitation, le nuage de Rydberg explose sous l'effet des interactions dipolaires répulsives entre atomes de Rydberg dans le niveau 60S. La spectroscopie microonde nous permet, de la même façon que précédemment, de mesurer les énergies d'interaction dans le nuage au cours de cette explosion. Il suffit pour cela d'introduire un délai variable  $\Delta t$  entre l'excitation laser et l'impulsion microonde de sonde.

Les spectres ainsi obtenus sont représentés en figure III.10, pour des désaccords laser de  $\Delta = 0, 1$  et  $2$  MHz. À mesure que le temps avance, les distributions d'énergie d'interaction s'affinent et tendent vers celle d'un nuage dilué sans interaction. Cette énergie d'interaction est convertie en énergie cinétique au cours de l'explosion du nuage de Rydberg. La figure (III.11) représente l'énergie moyenne d'un nuage au cours du



**Figure III.10** Spectres microonde de la transition  $60S - 57S$  au cours de l'évolution d'un nuage de Rydberg excité par un laser désaccordé à  $\Delta = 0$  (gauche), 1 (centre) et 2 MHz (droite). L'origine des axes verticaux de chacun des spectres est décalée et l'échelle des abscisses et des ordonnées de chacun des graphes est différente, par souci de visibilité.

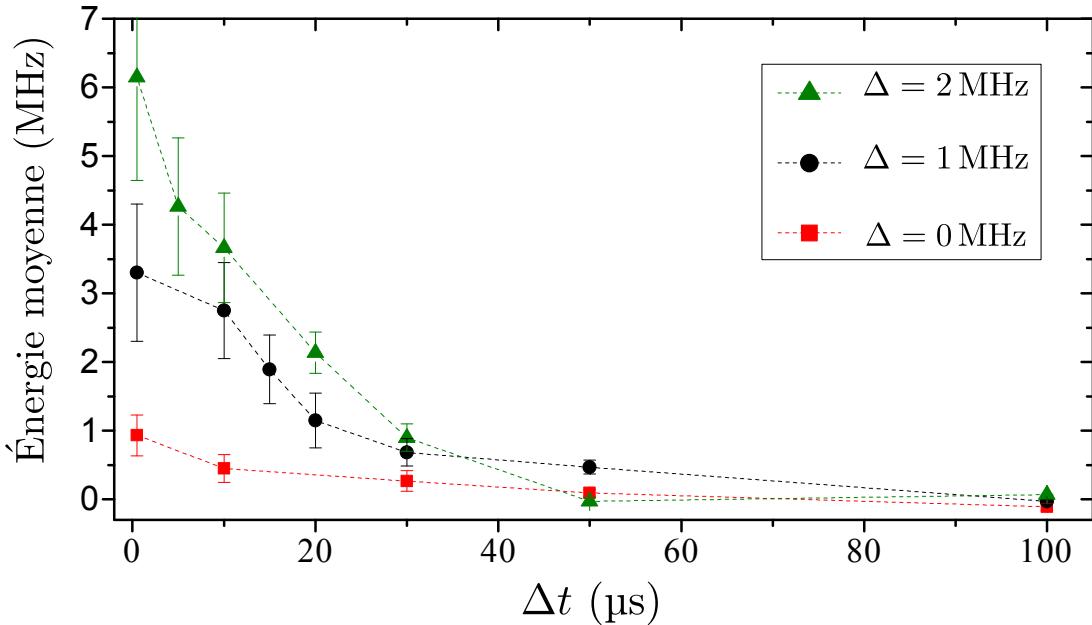
temps, pour les trois mêmes désaccords laser. L'énergie moyenne initiale est de l'ordre de 1 MHz à 10 MHz dans les trois cas. En comparaison, l'énergie cinétique des atomes dans le niveau fondamental, refroidis à 500 nK est de l'ordre de 10 kHz, donc négligeable. L'évolution des spectres microonde peut être entièrement attribuée à l'explosion du nuage de Rydberg en interaction.

Le mouvement des atomes de Rydberg devient important dès lors qu'il modifie sensiblement la distribution des énergies d'interaction, donc les spectres microonde mesurés. Ainsi nous pouvons affirmer qu'après un délai aussi court que  $\Delta t \sim 5$  à  $10 \mu s$ , le mouvement a modifié la configuration énergétique du nuage, y compris lorsque celui-ci a été excité à résonance. L'approximation du « gaz gelé » ne peut donc être considérée comme valide au delà de quelques microsecondes dans un nuage dense d'atomes de Rydberg.

### III.3 Premier modèle numérique et accord qualitatif

Afin d'affiner notre compréhension de ces phénomènes dus aux interactions, nous avons développé un modèle numérique de nos expériences. L'intégration numérique de l'équation de Schrödinger dépendante du temps pour un nuage de 12 000 atomes corrélés étant irréaliste, nous avons établi un modèle Monte Carlo.

Le calcul numérique est effectué en deux phases distinctes : la première simule la dynamique d'excitation du nuage de Rydberg à partir des atomes dans l'état fondamental. Une fois l'excitation terminée, l'explosion du nuage de Rydberg est calculée comme un problème classique à  $N$  corps, par une routine d'intégration de Runge-Kutta d'ordre 4.



**Figure III.11** Énergie moyenne d’interaction (énergie totale rapportée au nombre d’atomes) de nuages de Rydberg excités à différents désaccords laser, en fonction du temps après excitation  $\Delta t$ . Les données sont calculées à partir des spectres de la figure (III.10).

Nous en donnons ici une description fonctionnelle de l’algorithme et comparons ses résultats aux résultats expérimentaux.

### III.3.1 Au cœur du modèle numérique

Le modèle initial de l’excitation que nous avons mis en œuvre fonctionne de la manière suivante :

- i. Un nuage de  $N$  atomes dans l’état fondamental est tirée au sort selon une distribution gaussienne, dont les paramètres sont l’extension spatiale du piège selon chaque direction,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ .
- ii. Le profil gaussien de l’intensité laser est spécifié, paramétrés par les cols des faisceaux bleus et rouges.
- iii. Le profil de la raie d’excitation à un atome est donné, correspondant au spectre « référence piège dilué » de la figure (III.4).
- iv. À chaque itération, un atome  $i$  de l’état fondamental est tiré au sort. Son énergie d’interaction totale  $E_{int}(i)$  avec les atomes de Rydberg déjà présents est calculée comme s’il était excité. La probabilité d’excitation  $p(i)$  de l’atome est calculée d’après le profil de raie laser, en fonction de l’intensité et du désaccord  $\Delta$  du laser et de l’énergie d’interaction  $E_{int}(i)$ .
- v. La probabilité  $p(i)$  est comparée à un nombre aléatoire  $t$  entre 0 et 1. Si  $p(i) > t$ , la simulation passe à l’itération suivante. Si  $p(i) \leq t$ , alors l’atome  $i$  est excité au niveau de Rydberg et ajouté à la liste de ceux-ci.

Dans ce modèle, l’excitation d’un atome se fait sous la forme d’un « saut » de l’état fondamental à l’état de Rydberg. Cela exclut de fait tout processus cohérent au cours

duquel une superposition d'état aurait lieu. L'algorithme ici présenté ne peut d'ailleurs rendre compte que d'une excitation séquentielle des atomes de Rydberg les uns après les autres. De plus, le nuage d'atomes de Rydberg est considéré comme gelé lors de l'excitation. Bien que cette hypothèse puisse être raisonnable pour une durée d'impulsion laser de  $2\mu\text{s}$ , les résultats expérimentaux nous apprennent qu'elle ne le sera plus pour des durées d'excitation supérieures à  $10\mu\text{s}$ .

Enfin, notons que ce modèle ne comporte aucune échelle de temps durant l'excitation. Un critère sera donc nécessaire pour déterminer la fin du calcul. Pour simuler les spectres d'énergie d'interaction et leur évolution dans le temps, le désaccord laser  $\Delta$  et la durée d'impulsion sont fixés. Les spectres laser expérimentaux nous renseignent alors sur le nombre  $N_{Ryd}$  d'atomes de Rydberg que contient le nuage au terme de l'excitation. C'est ce nombre  $N_{Ryd}$  qui sert de critère à l'arrêt du calcul : une fois celui-ci atteint, l'excitation est terminée et le calcul de l'explosion du nuage commence.

Le calcul de l'expansion du nuage se déroule de la manière suivante :

- i. Les données de départ sont les positions et quantités de mouvement des atomes de Rydberg excités à l'étape précédente de la simulations. À partir de ces positions, les énergies d'interaction sont calculées pour chaque paire d'atomes de Rydberg.
- ii. Ces énergies d'interaction sont dérivées d'après l'équation (III.3), puis sommées pour chaque atome d'après l'équation (III.4). La force mécanique appliquée à chaque atome de Rydberg par le reste du nuage est ainsi obtenue.
- iii. Un routine Runge-Kutta d'ordre 4 permet de calculer les positions et quantités de mouvement des atomes de Rydberg après un pas de temps  $dt$ .
- iv. l'algorithme retourne à l'étape i et réitère le calcul avec les positions et quantités de mouvement actualisées.

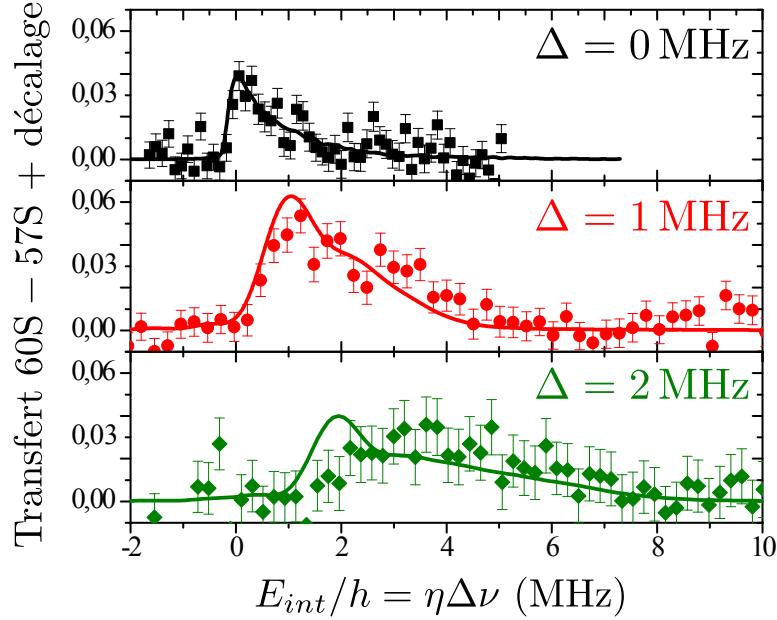
Lorsque le temps total d'évolution est atteint, les énergies d'interaction totales de chaque atomes sont calculées et compilées sous forme d'un spectre que l'on pourra comparer aux spectres microonde de la figure (III.10). Le temps de vie des atomes de Rydberg est pris en compte au cours de ce calcul, en permettant la désexcitation de chaque atome avec un taux de probabilité  $e^{-t/\tau}$ , où  $t$  est le temps écoulé depuis l'excitation, et  $\tau = 210\mu\text{s}$  le temps de vie du niveau 60S mesuré expérimentalement (cf II.2.6). Enfin, les spectres expérimentaux sont limités par transformée de Fourier en raison de la durée finie de l'impulsion microonde de sonde. Les spectres simulés seront donc convolus avec la transformée de Fourier de l'impulsion microonde, et pourront être confrontés aux spectres expérimentaux.

### III.3.2 Comparaison aux spectres microonde expérimentaux

Étant donnée que le modèle présenté ci-dessus ne tient pas compte du mouvement des atomes de Rydberg durant l'excitation, sa validité est *a priori* restreinte aux durées d'impulsion laser courtes. De même, choisir comme critère d'arrêt le nombre d'atomes de Rydberg final empêche d'utiliser ce modèle pour simuler les spectres d'excitation optique présentés en III.2.1. Nous nous limiterons pour le moment à comparer les simulations aux spectres microonde présentés en III.2.2.

La première étape de cette comparaison consiste à vérifier l'accord entre les spectres simulés et les distributions d'énergie d'interaction immédiatement après excitation, qui sont présentées en figure (III.8). La figure (III.12) présente ces mêmes spectres comparés

aux simulations. Malgré la simplicité du modèle numérique, l'accord avec l'expérience



**Figure III.12** Comparaison des simulations aux spectres microonde immédiatement après excitation laser. Les spectres expérimentaux sont ceux de la figure III.8. Les lignes pleines sont les résultats de la simulation.

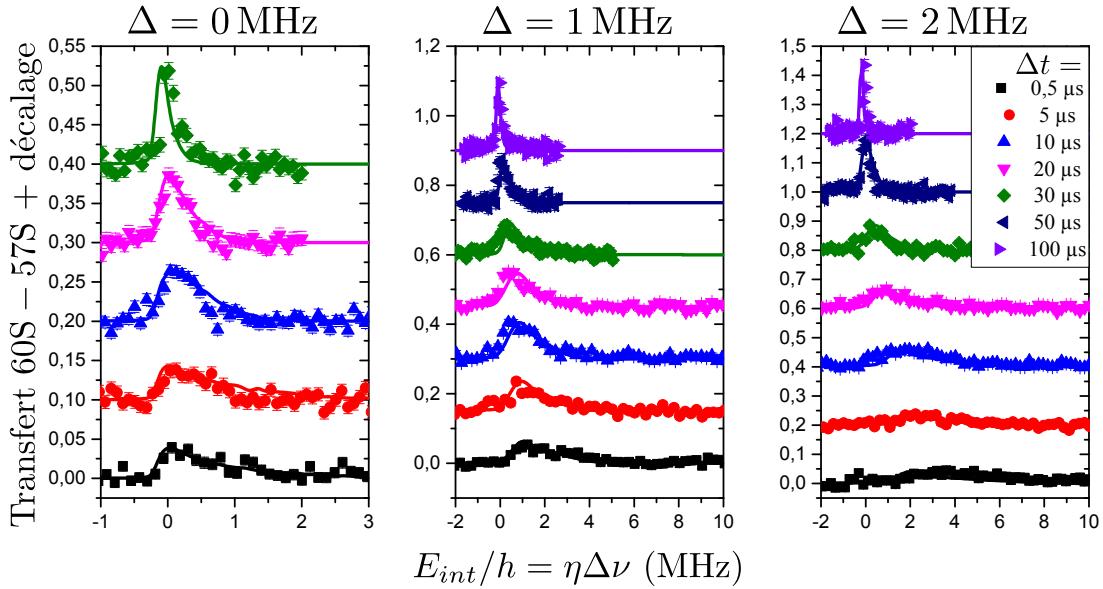
est raisonnable à ce stade. Cela nous encourage à pousser plus loin la comparaison, en confrontant les simulations aux spectres microonde enregistrés au cours de l'explosion du nuage.

La figure (III.13) présente ces spectres, pour trois désaccords laser différents, comparés avec les simulations. L'accord est ici aussi bon, confirmant la pertinence de notre modèle simple pour simuler l'explosion d'un nuage de Rydberg sous interaction.

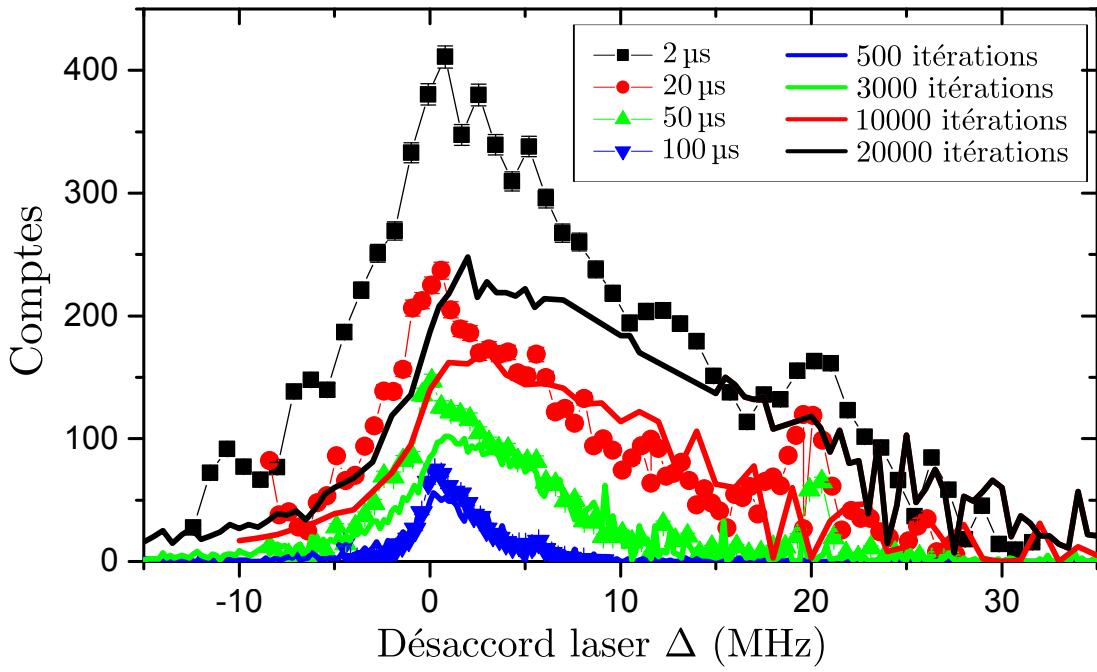
### III.3.3 La limite du modèle : l'absence de temps

Comme nous l'avons évoqué en III.3.1, ce modèle n'incorpore pas d'échelle de temps pour le processus d'excitation. Cela pose la question de comment simuler les spectres d'excitation laser. En effet, on ne peut se permettre de fixer un nombre final d'atomes de Rydberg ici, car la simulation n'aurait plus de sens. Nous avons tenté pour remédier à cela de faire correspondre un nombre d'itérations à la durée d'excitation. Une approche naïve de cette correspondance supposerait une relation linéaire, où le nombre d'atomes dont on teste la probabilité d'excitation serait proportionnel à la durée de l'impulsion laser. Cette hypothèse permet d'intégrer le mouvement des atomes de Rydberg au cours même de l'excitation, ce qui est essentiel pour des durées d'impulsion supérieures à 5 ou 10 μs. Pour cela, après chaque tirage au sort d'un atome, le mouvement du nuage de Rydberg est calculé sur la durée correspondant à une itération.

Les nombres d'itérations correspondant à chaque durée d'impulsion ont été choisis pour reproduire au mieux la queue à haute énergie des spectres, qui est due à une excitation facilitée à désaccord laser important. La figure III.14 présente les résultats des simulations ainsi menées, superposés aux résultats expérimentaux.



**Figure III.13** Comparaison des simulations aux spectres microonde lors de l’explosion du nuage, pour trois désaccords laser d’excitation  $\Delta = 0, 1, 2$  MHz. Les spectres expérimentaux sont ceux de la figure III.10. Les lignes pleines sont les résultats de la simulation. L’origine des axes verticaux de chacun des spectres est décalée et l’échelle des abscisses et des ordonnées de chacun des graphes est différente, par souci de visibilité.



**Figure III.14** Comparaison des spectres optiques aux simulations, pour différentes durées d’impulsion laser : 2, 20, 50 et 100  $\mu$ s. Les spectres expérimentaux sont ceux de la figure III.4. Les lignes pleines sont les résultats de la simulation.

## III.4 Raffinement du modèle de la dynamique d'excitation

### III.4.1 Simulations

modèle d'équation de taux  
résultats de simulations comparés aux manips

### III.4.2 Les limites du modèle

photons thermiques et apparition de niveaux  $p$   
LIRE T. PORTO

## Conclusion

il faut prendre en compte le mouvement, mais aussi les transferts thermiques vers les niveaux  $p$

## Chapitre IV

# Les atomes de Rydberg circulaires en interaction : vers un simulateur quantique

Reprendre le PRX



# Chapitre V

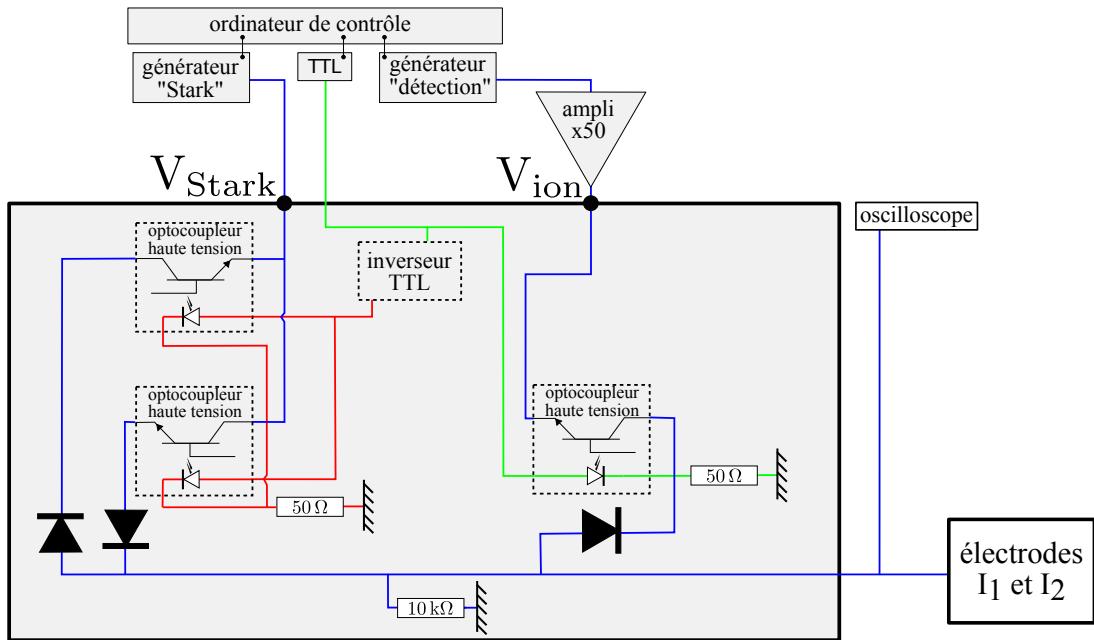
## Des atomes de Rydberg circulaires sur puce

### V.1 Modifications du dispositif expérimental

#### V.1.1 Contrôle du champ perpendiculaire à la puce

Toutes les expériences que nous décrirons dans la suite de cette thèse ayant trait au niveau 60S ont été réalisées à l'aide de ce circuit. Une particularité de son fonctionnement réside dans le fait que la phase d'excitation des atomes de Rydberg se fait à tension constante, et que le contrôle dynamique de la tension n'est permis que lors de la phase de détection, qui nécessite une rampe de tension comme évoqué en II.2.2. Cette limitation sera corrigée plus tard par l'introduction d'un second circuit de contrôle, représenté en figure (V.1) et son fonctionnement est détaillé ci-après. Ce second circuit, qui permet l'application de deux rampes de tensions indépendantes pour l'excitation et la détection, a été utilisé dans toutes les expériences que nous décrirons ayant trait au niveau circulaire 50C.

Dans ce second circuit de contrôle de tension, l'ordinateur de contrôle permet de programmer une rampe arbitraire sur chacun des générateurs. La tension fournie par le générateur « détection » est amplifiée 50 fois et devient «  $V_{ion}$  ».  $V_{ion}$  est introduite dans la voie haute tension du circuit de contrôle. La tension fournie par le générateur « Stark » n'est pas amplifiée et est appelée «  $V_{Stark}$  ».  $V_{Stark}$  est introduite dans la voie basse tension du circuit de contrôle. Pendant la phase d'excitation, le signal TTL est éteint. L'optocoupleur de la voie haute tension est alors bloquant, et les deux optocoupleurs de la voie basse tension sont passants. L'optocoupleur du haut sert à faire passer les tension négatives et celui du bas les tensions positives. Chacun est isolé par une diode à sa sortie, adaptée au sens de circulation du courant dans chaque voie. La tension  $V_{Stark}$  est alors directement appliquée aux électrodes. Pendant la phase de détection, le signal TTL est allumé. Les optocoupleurs de la voie basse tension deviennent bloquants et celui de la voie haute tension devient passant. La tension  $V_{ion}$  est alors directement appliquée aux électrodes. Les tensions en fin de rampe de détection peuvent aller de  $-150\text{ V}$  pour les niveaux voisins du 60S, et jusqu'à  $-500\text{ V}$  pour les niveaux voisins du 50C. Nous avons donc conçu ce circuit de contrôle en conséquence, en utilisant des optocoupleurs MOC8204M capables de bloquer des tensions élevées.



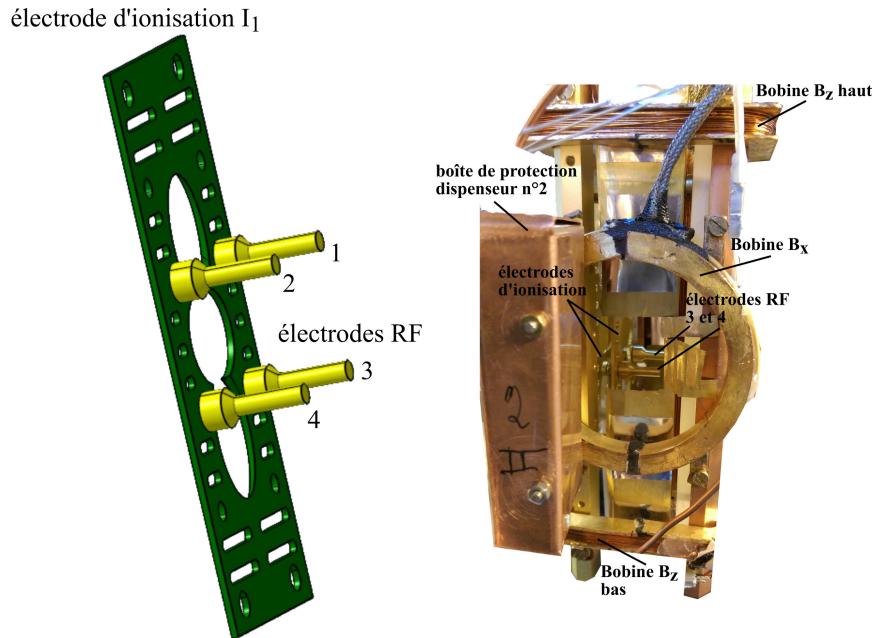
**Figure V.1** Second circuit de contrôle de la tension des électrodes d'ionisation. Les tensions sont fournies par deux générateurs de fonctions arbitraires indépendants et appliquées directement aux électrodes par deux voies séparées (voie basse tension à gauche et voie haute tension à droite).

### V.1.2 Contrôle du champ parallèle à la puce

Les dispositifs de contrôle des champs électriques que nous venons de présenter ont une lacune majeure : ils ne permettent de varier le champ électrique que perpendiculairement à la puce, soit dans la direction  $y$ . Lorsque nous avons commencé à travailler dans l'optique d'obtenir des atomes de Rydberg circulaires, nous avons souhaité pouvoir contrôler le champ électrique parallèlement à la puce. Cela a deux conséquences. En premier lieu, nous serons en mesure de compenser les champs résiduels dans les directions  $x$  et  $z$ . En second lieu, cela permettra d'appliquer un champ électrique radio-fréquence polarisé, nécessaire à la circularisation des niveaux de Rydberg, qui sera discutée au chapitre V.

Notre dispositif de contrôle du champ parallèle à la puce consiste en quatre électrodes cylindriques (« électrodes RF »), disposées en carré autour de la zone de piégeage des atomes. En appliquant des tensions arbitraires sur ces électrodes, nous pourrons compenser les champs résiduels dans les directions  $x$  et  $z$ , et espérer compenser même les gradients de champ dans ces directions. En leur appliquant des tensions oscillant à une fréquence de 230 MHz avec des phases bien optimisées, nous pourrons générer un champ électrique radio-fréquence arbitrairement polarisé au niveau des atomes.

La figure V.2 montre la disposition de ces électrodes au cœur du dispositif expérimental.



**Figure V.2** Électrodes « RF » de circularisation et de contrôle du champ parallèle à la puce. À gauche, schéma représentant les électrodes RF, fixées sur l'électrode d'ionisation  $I_1$ , et numérotées de 1 à 4. À droite, photographie du cœur de l'expérience. On y voit la « boîte » de protection de l'un des dispenseurs de rubidium, les bobines de biais  $B_z$  et l'une des bobines de biais  $B_x$ , les deux électrodes d'ionisation, et les deux électrodes RF du bas (3 et 4).

### Description technique du dispositif

Chaque électrode RF est un cylindre de 6 mm de diamètre et de 12 mm de long, en cuivre doré. Les quatre cylindres sont disposés perpendiculairement à la puce en un carré de 30 mm de côté. Afin de fixer les cylindres au sein du dispositif, nous avons percé des trous dans l'électrode d'ionisation  $I_1$ . Chaque électrode est fixée par une tige filetée traversant l'un de ces trous et maintenue par un écrou. Or les électrodes RF doivent être isolées de l'électrode  $I_1$ . Les écrous de fixation sont ainsi isolés de  $I_1$  par des rondelles en nylon. Les tiges filetées sont quant à elles isolées par des espaces en céramique MACOR, logés dans la base élargie et évidée de chaque cylindre et traversant l'électrode  $I_1$ . Le recouvrement de ces pièces diélectriques par les électrodes elles-mêmes est crucial, afin de limiter au maximum l'exposition des atomes à des surfaces non-conductrices susceptibles d'emmagasiner des charges électriques et de créer ainsi des champs parasites. La longueur des cylindres en cuivre et l'épaisseur des espaces en céramique sont calculés pour que le bout de chaque cylindre arrive à une distance d'environ 2 mm de la surface de la puce.

La tension appliquée à chacune des électrodes RF est amenée *via* des câbles coaxiaux, permettant de propager des signaux radio-fréquence aussi bien que des tensions constantes. Ces câbles coaxiaux semi-rigides fins traversent le cryostat, sont thermalisés à 4,2 K au fond de la jupe hélium. À l'approche du cœur de l'expérience, ils sont terminées par des connecteurs SMA, auxquels viennent se brancher des câbles plus courts et plus épais. Cette deuxième section de câblage a deux intérêts. Premièrement,

la connexion des câbles aux cosses qui sont en contact avec les électrodes est facilitée par l'épaisseur et la solidité de ces deuxièmes câbles. Ces cosses sont intercalées entre l'écrou de fixation de chaque électrode et un second écrou de blocage, qui garantit le contact électrique avec la tige filetée et ainsi avec l'électrode. Deuxièmement, cela nous permet, au prix d'une simple déconnexion de connecteurs SMA, de démonter ou ajuster indépendamment les câbles coaxiaux semi-rigides et le porte-puce assorti de ses électrodes.

Les tensions constantes appliquées aux électrodes sont fournies par une source analogique contrôlée par ordinateur, dont les sorties sont filtrées par un circuit RC de temps caractéristique  $\tau = 1 \mu\text{s}$ . Cela permet de réduire le bruit électrique de cette source à une amplitude inférieure à  $5 \text{ mV}_{\text{pp}}$ .

### Simulation du champ créé par les électrodes RF

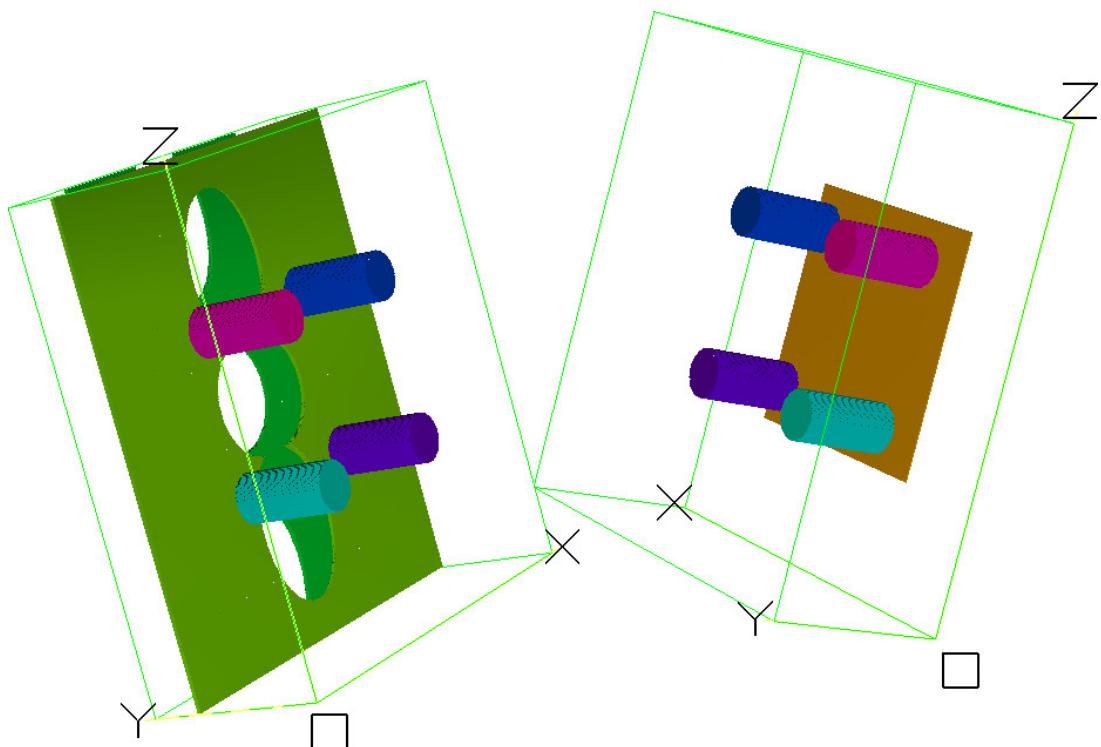
Il était important, afin de bien concevoir la géométrie de ces électrodes RF, de savoir quel serait l'effet des tensions appliquées dessus en termes de champ électrique au niveau des atomes. L'estimation du champ créé ne peut pas se faire simplement par les approximations de conducteurs infinis pour lesquels il suffirait de diviser la différence de potentiel entre eux par la distance les séparant. En effet, la géométrie des électrodes est assez éloignée de ce genre de modèle et limite ainsi déjà la validité qu'aurait une telle approximation. De plus, la région où nous souhaitons créer du champ électrique est très proche de la puce, entre 0,5 et 2 mm de celle-ci. C'est-à-dire que d'une part cette région est située en dehors du volume délimité par les quatre électrodes, et d'autre part que la présence proche d'une surface conductrice considérée comme infinie (la puce) perturbera grandement les lignes de champ dans cette région.

Afin d'estimer le champ créé par les électrodes, nous avons utilisé le logiciel SIMION, destiné au calcul de potentiels et champs électriques et de trajectoires de particules chargées dans des structures arbitraires. Les éléments que nous y avons programmés sont les suivants : la surface de la puce, les électrodes RF et les électrodes d'ionisation. Cette structure simplifiée est représentée en figure (V.3).

Nous présentons ci-dessous un exemple de simulation où l'on impose les potentiels suivants : 10 V aux deux électrodes RF du haut (1 et 2), -10 V aux deux électrodes RF du bas (3 et 4), et 0 V à la puce et aux électrodes d'ionisation. On espère alors appliquer un champ électrique vertical dirigé vers le bas au niveau des atomes.

La figure (V.4) présente le résultat de la simulation. Les deux graphes à grande échelle (en haut), permettent de confirmer que le champ créé est largement selon  $z$ . En effet, la composante  $F_z$  varie de 3 V/cm à -5 V/cm lorsque la composante  $F_x$  varie de -0,08 V/cm à 0,08 V/cm. L'on retrouve le comportement idéal des conducteurs infinis dans la zone au centre des électrodes RF, autour du point ( $y = 8 \text{ mm}, z = 0$ ) : le champ  $y$  est homogène avec des valeurs de  $F_z = -5 \text{ V/cm}$  et  $F_x = 0$ . Malheureusement, nous piégeons habituellement les atomes bien plus près de la puce, à des distances comprises entre  $y = 0,3 \text{ mm}$  et  $y = 1,5 \text{ mm}$ . Il est donc important de vérifier que, dans nos régions habituelles de piégeage, notre dispositif sera suffisamment performant. Les deux graphes à petite échelle (en bas), nous confirment cela : nous serons capables de créer un champ de l'ordre de  $F_z = -0,5 \text{ V/cm}$  à  $-1,5 \text{ V/cm}$ , avec une composante  $F_x$  quasi-nulle, de l'ordre du mV/cm.

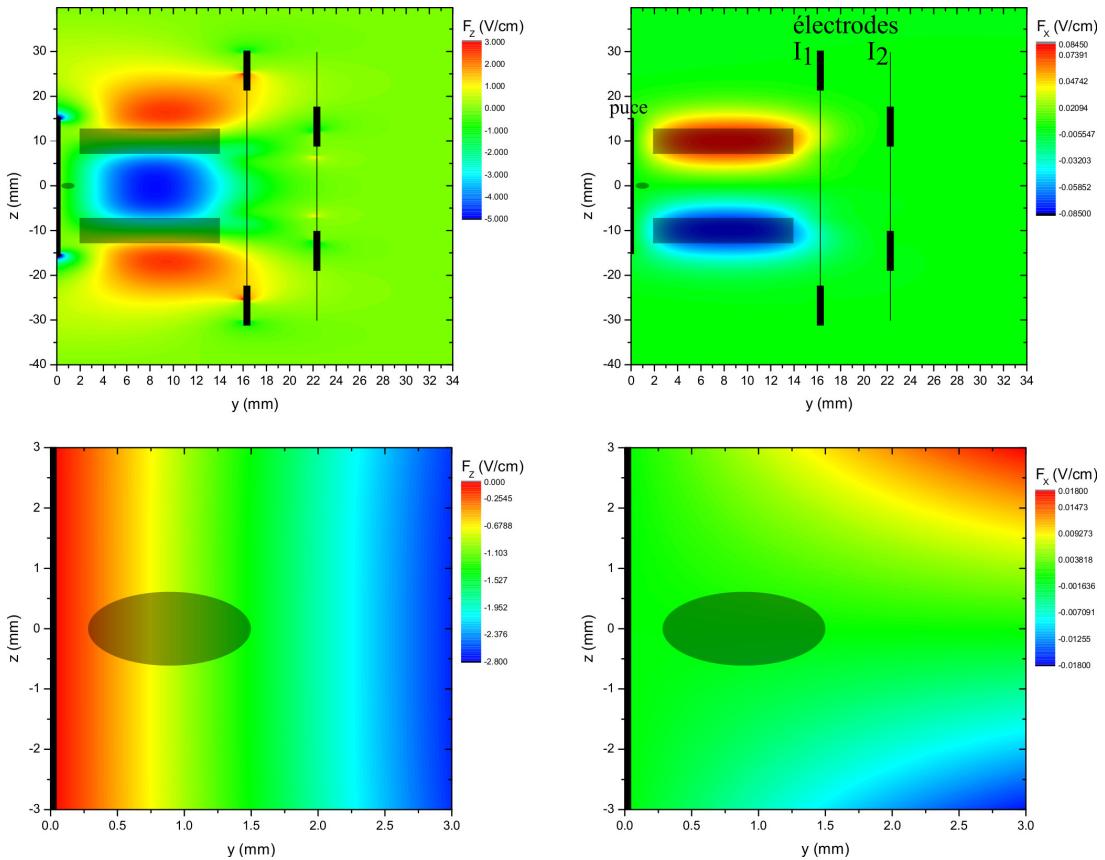
La symétrie de la structure en  $x$  et en  $z$  est un argument suffisant pour affirmer que



**Figure V.3** Électrodes « RF » et leur environnement tels que programmés dans nos simulations SIMION. Les quatre électrodes RF sont représentées, dans l’ordre de leur numérotation, en bleu foncé (1), rose (2), violet (3) et bleu turquoise (4). La puce est représentée par une surface jaune, et les électrodes d’ionisation en vert clair ( $I_1$ ) et vert foncé ( $I_2$ ). Les axes indiqués par les lettres  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  sont les axes que nous utilisons habituellement, bien que l’origine  $O$  du repère ne soit pas la même. Par souci de clarté visuelle, la figure de gauche représente les électrodes RF et d’ionisation sans la puce, et la figure de droite représente les électrodes RF et la puce, sans les électrodes d’ionisation.

nous pourrons tout aussi bien créer un champ opposé à celui-ci, c'est-à-dire avec une composant  $F_z$  positive, ou encore un champ très largement orienté selon  $x$ . Nous avons néanmoins occulté dans notre description un effet indésirable : les électrodes RF créent également un champ selon  $y$  dans la région qui les sépare de la puce. Les atomes étant piégés dans cette région, délimitée par  $0 < y \leq 2$  mm, ils subiront un champ  $F_y$  dû à ces électrodes. Dans les mêmes conditions de tensions appliquées, le champ  $F_y$  varie selon  $z$ , dans un intervalle compris entre  $-0,4$  V/cm en  $z = 0,4$  mm et  $0,4$  V/cm en  $z = -0,5$  mm. Fort heureusement le champ  $F_y$  reste suffisamment homogène à l'échelle de taille des nuages atomiques de diamètre  $\Delta z < 300$  µm, une taille qui est atteinte dès le stade de mélasse optique. De plus, nous pouvons compenser sa valeur moyenne grâce aux électrodes d’ionisation, comme nous l'avons expliqué en II.2.4.

Enfin, la simulation confirme que nous pourrons appliquer un champ radio-fréquence tournant dans le plan ( $xOz$ ) perpendiculaire à la puce, en vue de la circularisation des atomes de Rydberg sous un champ statique selon  $y$ . En effet, une différence de potentiel entre les électrodes du haut (1 et 2) et celles du bas (3 et 4) crée un champ  $F_z$  quasi-pur et une différence de potentiel entre les électrodes de gauche (1 et 3) et celles de droite (2 et 4) crée un champ  $F_x$  quasi-pur. Le détail des champs tournants pour la



**Figure V.4** Champ électrique créé par les électrodes RF, dans le plan ( $yOz$ ),  $x = 0$ . Les échelles de longueur en  $y$  et en  $z$  sont différentes. À gauche la composante  $F_z$ , à droite la composante  $F_x$ . En haut, une grande région est représentée, sur laquelle sont marquées la puce et les électrodes d'ionisation (les traits épais sont les endroits où ces électrodes sont dans le plan ( $x = 0$ ) et les traits fins sont la projection des électrodes entières sur ce plan). Les projections des électrodes RF sur le plan ( $x = 0$ ) sont représentées en filigrane gris (rectangles), de même que la zone de piégeage des atomes (petit ovale proche de la puce). En bas, une région beaucoup plus petite est représentée, englobant la région typique de piégeage des atomes, représentée en filigrane gris. À des fins de lisibilité, les échelles de couleur sont différentes sur chacun des graphes.

circularisation sera discuté au chapitre V.

Nous disposons ainsi d'un outil de contrôle du champ électrique dans toutes les directions, grâce aux électrodes d'ionisation et aux électrodes RF.

## V.2 Comment exciter des atomes de Rydberg circulaires

### V.2.1 Les niveaux atomiques du fondamental au Rydberg circulaire schéma de niveaux et Stark maps

#### V.2.2 Spectroscopie 5s-50d

en champ nul et en champ non-nul -> choix de  $m_j$

### V.2.3 Spectroscopie 50d-50f

en champ nul et en champ non-nul -> choix de  $m_l$  et problème d'élargissement Stark

#### Le passage adiabatique

présenter le principe du passage adiabatique (cf Jay, Brian, Eva) et le dispositif radiofréquence tel qu'il est chez nous

## V.3 Comment caractériser les atomes de Rydberg circulaires

### V.3.1 Spectroscopie microonde vers les niveaux voisins

50c-51c et optimisation de la RF

50c-49c ?

### V.3.2 Temps de vie

temps de vie théorique, temps de vie mesuré, température effective

### V.3.3 Temps de cohérence

franges de Ramsey

## V.4 Éjectable : Première évidence du piégeage des atomes circulaires

### V.4.1 Dispositif laser de piégeage

description de l'optique de mise en forme  
et caractérisation du faisceau de piégeage

### V.4.2 Comment observer le piégeage des atomes circulaires

problème du temps de vie qui empêche d'observer l'absence de chute libre  
comment observer un piégeage de niveaux qui ne vivent pas longtemps ? propositions envisagées  
premiers signaux s'ils existent



# Conclusion



## Annexes



## Annexe A

### Système de lock



# References

- [1] P. GOY, J.-M. RAIMOND, M. GROSS et S. HAROCHE, « Observation of Cavity-Enhanced Single Atom Spontaneous Emission », Phys. Rev. Lett. **50**, 1903 (1983).
- [2] T. F. GALLAGHER, *Rydberg Atoms* (Cambridge University Press, Cambridge, 1994).
- [3] P. J. MOHR, D. B. NEWELL et B. N. TAYLOR, « CODATA recommended values of the fundamental physical constants : 2014 », Rev. Mod. Phys. **88**, 035009 (2016).
- [4] C. COHEN-TANNOUDJI, B. DIU et F. LALOË, *Mécanique Quantique*, t. 1 (Hermann, Paris, France, 1977).
- [5] C. COHEN-TANNOUDJI, B. DIU et F. LALOË, *Mécanique Quantique*, t. 2 (Hermann, Paris, France, 1977).
- [6] W. LI, I. MOURACHKO, M. W. NOEL et T. F. GALLAGHER, « Millimeter-wave spectroscopy of cold Rb Rydberg atoms in a magneto-optical trap : Quantum defects of the ns, np, and nd series », Phys. Rev. A **67**, 052502 (2003).
- [7] J. HAN, Y. JAMIL, D. V. L. NORUM, P. J. TANNER et T. F. GALLAGHER, « Rb nf quantum defects from millimeter-wave spectroscopy of cold Rb<sup>85</sup> Rydberg atoms », Phys. Rev. A **74**, 054502 (2006).
- [8] M. MACK, F. KARLEWSKI, H. HATTERMANN, S. HÖCKH, F. JESSEN, D. CANO et J. FORTÁGH, « Measurement of absolute transition frequencies of <sup>87</sup>Rb to nS and nD Rydberg states by means of electromagnetically induced transparency », Phys. Rev. A **83**, 052515 (2011).
- [9] C. FABRE, S. HAROCHE et P. GOY, « Millimeter Spectroscopy in Sodium Rydberg states :Quantum Defects, Fine Structure and PolarisabilityMeasurements », **18**, 229 (1978).
- [10] P. GOY, J.-M. RAIMOND, G. VITRANT et S. HAROCHE, « Millimeter-Wave Spectroscopy in Cesium Rydberg states.Quantum Defects, Fine- and Hyperfine Structure Measurements », **26**, 2733 (1982).
- [11] D. MESCHEDE, « Centimeter-Wave Spectroscopy of Highly Excited Rubidium Atoms », J. opt. Soc. Am. B **4**, 413 (1987).
- [12] W. C. MARTIN, « Series formulas for the spectrum of atomic sodium (Na i) », J. Opt. Soc. Am. **70**, 784 (1980).
- [13] T. F. GALLAGHER et W. E. COOKE, « Interactions of Blackbody Radiation with Atoms », Phys. Rev. Lett. **42**, 835 (1979).

- [14] E. BELORIZKY et W. GORECKI, *Introduction à la mécanique statistique* (Presses universitaires de Grenoble, BIBLMH, 1992).
- [15] H. A. BETHE et E. E. SALPETER, *Quantum mechanics of one-and two-electron atoms* (Springer Science & Business Media, 2012).
- [16] J. D. JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 2<sup>e</sup> éd. (Wiley, New York, 1975).
- [17] S. RAVETS, H. LABUHN, D. BARREDO, L. BEGUIN, T. LAHAYE et A. BRO-WAEYS, « Coherent dipole-dipole coupling between two single Rydberg atoms at an electrically-tuned Förster resonance », *Nat. Phys.* **10**, 914 (2014).
- [18] T. NIRRENGARTEN, « Piégeage magnétique d'atomes de Rubidium au voisinage d'une surface supraconductrice », thèse de doct. (Université Paris VI, 2007).
- [19] C. ROUX, « Condensation de Bose-Einstein sur une puce à atomes supraconductrice », thèse de doct. (Université Paris VI, 2008).
- [20] A. EMMERT, « Puce à atomes supraconductrice : Atomes froids dans un environnement cryogénique et excitation d'atomes de Rydberg », thèse de doct. (Université Paris VI, 2009).
- [21] R. CELISTRINO TEIXEIRA, « Effets mécaniques de l'interaction dipolaire des atomes de Rydberg sondés par spectroscopie microonde », thèse de doct. (Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, sept. 2014).
- [22] W. MEISSNER et R. OCHSENFELD, « Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit », German, *Naturwissenschaften* **21**, 787 (1933).
- [23] A. EMMERT, A. LUPAŞCU, G. NOGUES, M. BRUNE, J.-M. RAIMOND et S. HAROCHE, « Measurement of the trapping lifetime close to a cold metallic surface on a cryogenic atom-chip », *The European Physical Journal D* **51**, 173 (2009).
- [24] D. A. STECK, *Rubidium 87 D line data*, 2001.
- [25] G. REINAUDI, T. LAHAYE, Z. WANG et D. GUÉRY-ODELIN, « Strong saturation absorption imaging of dense clouds of ultracold atoms », *Opt. Lett.* **32**, 3143 (2007).
- [26] C. F. OCKELOEN, A. F. TAUSCHINSKY, R. J. C. SPREEUW et S. WHITLOCK, « Detection of small atom numbers through image processing », *Phys. Rev. A* **82**, 061606 (2010).
- [27] G. GRYNBERG, A. ASPECT et C. FABRE, *Introduction to quantum optics : from the semi-classical approach to quantized light* (Cambridge university press, 2010).
- [28] C. HERMANN-AVIGLIANO, « Towards deterministic preparation of single Rydberg atoms and applications to quantum information processing », thèse de doct. (Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, nov. 2014).
- [29] R. C. TEIXEIRA, C. HERMANN-AVIGLIANO, T. L. NGUYEN, T. CANTAT-MOLTRECHT, J. M. RAIMOND, S. HAROCHE, S. GLEYZES et M. BRUNE, « Microwaves Probe Dipole Blockade and van der Waals Forces in a Cold Rydberg Gas », *Phys. Rev. Lett.* **115**, 013001 (2015).
- [30] B. M. AXILROD et E. TELLER, « Interaction of the van der Waals Type Between Three Atoms », *The Journal of Chemical Physics* **11**, 299 (1943).

- [31] A. GAETAN, Y. MIROSHNYCHENKO, T. WILK, A. CHOTIA, M. VITEAU, D. COMPARAT, P. PILLET, A. BROWAEYS et P. GRANGIER, « Observation of collective excitation of two individual atoms in the Rydberg blockade regime », *Nat Phys* **5**, 115 (2009).
- [32] J. ZEIHER, P. SCHAUSS, S. HILD, T. MACRÌ, I. BLOCH et C. GROSS, « Microscopic Characterization of Scalable Coherent Rydberg Superatoms », *Phys. Rev. X* **5**, 031015 (2015).
- [33] T. M. WEBER, M. HÖNING, T. NIEDERPRÜM, T. MANTHEY, O. THOMAS, V. GUARRERA, M. FLEISCHHAUER, G. BARONTINI et H. OTT, « Mesoscopic Rydberg-blockaded ensembles in the superatom regime and beyond », *Nat Phys* **11**, 157 (2015).
- [34] J. B. BALEWSKI, A. T. KRUPP, A. GAJ, D. PETER, H. P. BUCHLER, R. LOW, S. HOFFERBERTH et T. PFAU, « Coupling a single electron to a Bose-Einstein condensate », *Nature* **502**, 664 (2013).





## **English title**

---

**Abstract:** English abstract

**Keywords:** English keywords

## **titre en français**

---

**Résumé :** résumé en français

**Mots-clés :** mots clé en français