

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



COLLÈGE
DE FRANCE
1530



Département
de Physique
École normale
supérieure

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS



PSL
RESEARCH UNIVERSITY PARIS



THÈSE DE DOCTORAT
DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

Spécialité : **PHYSIQUE QUANTIQUE**

Atomes de Rydberg en interaction : des nuages denses d'atomes de Rydberg à la simulation quantique avec des atomes circulaires

présentée par

Tigrane Cantat-Moltrecht

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

Soutenue le 11 janvier 2018 devant le jury composé de :

Dr. BRUNE Michel
Dr. KAISER Robin
Dr. SAYRIN Clément
Pr. TARRUELL Leticia
Pr. TIGNON Jérôme
Pr. WEIDEMÜLLER Matthias

Directeur de thèse
Rapporteur
Membre invité
Examinatrice
Examineur
Rapporteur

À Alexandra,

Table des matières

Table des figures	v
Liste des tableaux	vii
A Système de stabilisation en fréquence et de distribution des faisceaux laser	3
B Détails du fonctionnement de l'algorithme de simulation	7

Table des figures

A.1	Schéma de stabilisation en fréquence des lasers d'excitation Rydberg . .	3
A.2	Schéma de stabilisation en fréquence des lasers de piégeage et refroidissement	5
B.1	Schéma fonctionnel de l'algorithme de simulation	8

Liste des tableaux

Annexes

Système de stabilisation en fréquence et de distribution des faisceaux laser



à 780 nm est généré par un système Toptica DL Pro. Sa fréquence est stabilisée par un circuit Pound-Drever-Hall (PDH), sur un pic de transmission d'une cavité Fabry-Pérot. La stabilisation PDH nécessite de moduler la phase du faisceau envoyé dans la cavité, ce qui est réalisé grâce à un modulateur électro-optique (EOM), à une fréquence de 20 MHz. La longueur de cette cavité est elle-même stabilisée par absorption saturée, sur le pic intermédiaire (*crossover*) entre les transitions $F = 2 \rightarrow F' = 2$ et $F = 2 \rightarrow F' = 3$ du ^{87}Rb .

Le laser bleu à 480 nm, généré par un système Toptica TA-SHG 110, est obtenu par amplification puis doublage de fréquence de la lumière laser issue d'une diode à 960 nm. Le doublage de fréquence est opéré par un cristal non-linéaire de KNbO_3 inséré dans une cavité de doublage « papillon ». La fréquence de la diode à 960 nm est stabilisée sur la même cavité Fabry-Pérot que le laser « spectro ». La stabilisation de la diode à 960 nm sur la cavité Fabry-Pérot nécessite de moduler le courant passant dans la diode. Cette modulation est effectuée directement par l'électronique d'alimentation, à une fréquence de 10 MHz. La lumière à 480 nm, issue du doublage de la lumière à 960 nm subit ainsi une modulation à une fréquence de 20 MHz.

Les deux lasers d'excitation sont finalement déplacés en fréquence par des modulateurs acousto-optiques (AOM) et injectés dans des fibres optiques permettant de les envoyer vers l'expérience.

La figure (A.2) présente le schéma de stabilisation en fréquence et de distribution des faisceaux laser qui servent au piégeage et au refroidissement du ^{87}Rb dans l'état fondamental. Le laser « MOPA » à 780 nm est généré par un système Toptica TA 100. Sa fréquence est stabilisée par battement (*beatlock*) avec la référence de fréquence donnée par le laser « spectro ». La fréquence du MOPA est décalée de -160 MHz par rapport à celle du spectro. La lumière laser issue du MOPA est ensuite divisée afin de fournir les faisceaux de piégeage et de refroidissement pour le piège magnéto-optique 2D, qui fournit le jet atomique vertical permettant d'alimenter l'expérience ; les faisceaux de piégeage et de refroidissement pour le piège magnéto-optique 3D sur puce ; le faisceau de pompage optique, permettant de polariser le nuage atomique dans le sous-niveau Zeeman $m_F = +2$ afin de le charger dans le piège magnétique ; et les deux faisceaux sonde, utilisés pour l'imagerie par absorption.

Tous ces faisceaux sont décalés en fréquence par des AOM puis transportés par fibre optique jusqu'à l'expérience. Une seule fibre est utilisée pour les faisceaux « 3D-MOT » : elle alimente, près de l'expérience, un diviseur de faisceau (*cluster*) qui permet d'obtenir les quatre faisceaux nécessaires au piégeage magnéto-optique des atomes sur la puce.

Enfin, le laser « repompeur » à 780 nm est généré par un système Toptica DL Pro. Sa fréquence est stabilisée par absorption saturée sur la transition $F = 1 \rightarrow F' = 2$ du ^{87}Rb . Après décalage en fréquence par un AOM, une partie de ce faisceau est transporté par fibre optique à proximité de l'expérience, où il est superposé aux faisceaux du 3D-MOT au sein du *cluster*. La deuxième partie du faisceau repompeur est superposée aux faisceaux du 2D-MOT avant injection dans leurs fibres optiques respectives.

Tous les coupleurs de fibre optique sont précédés d'obturateurs mécaniques (*shutters*), afin de s'assurer de pouvoir « éteindre » complètement chacun des faisceaux qui atteignent l'expérience. Ces obturateurs ne sont pas représentés sur les figures.

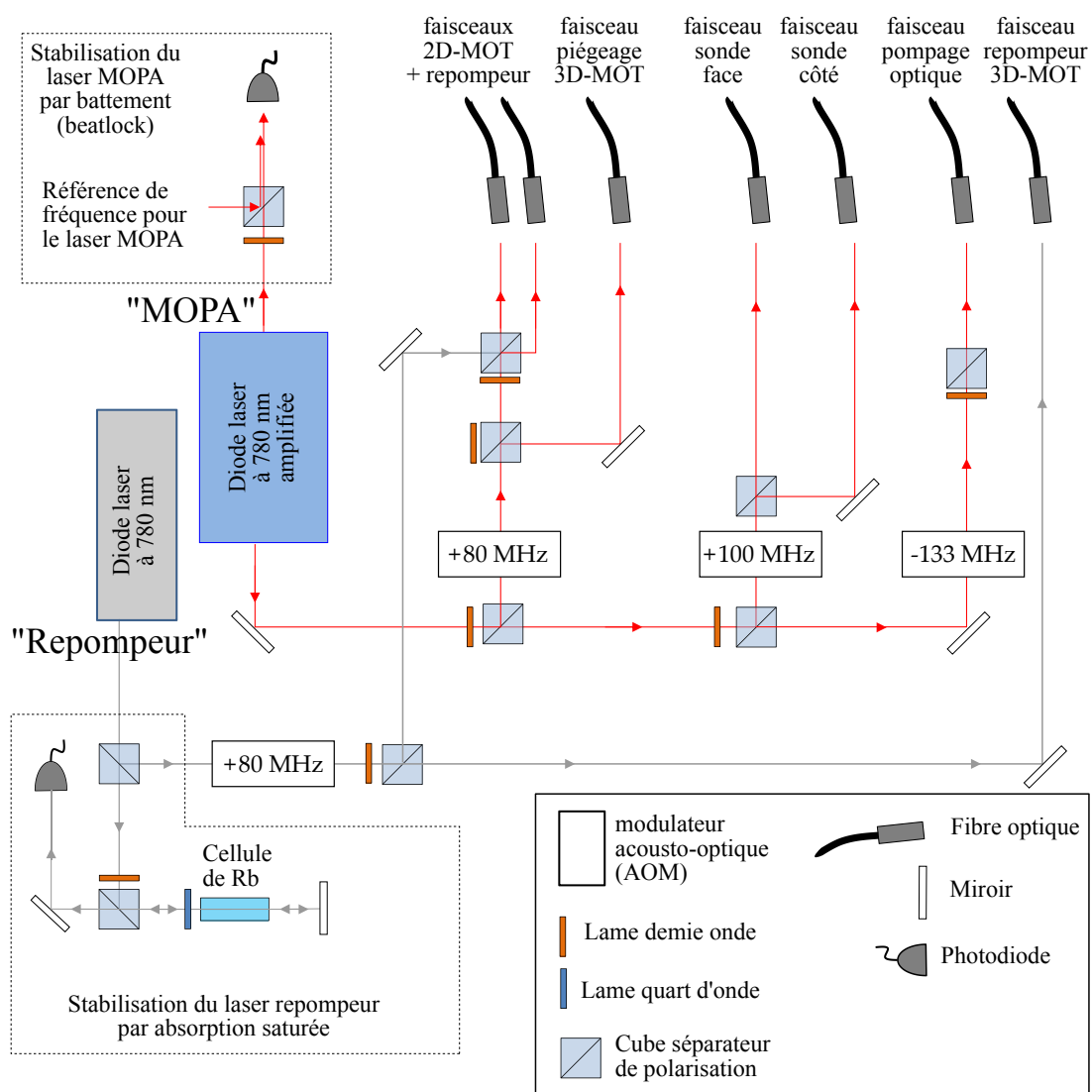


Figure A.2 Schéma de stabilisation en fréquence des lasers de piégeage et refroidissement des atomes dans l'état fondamental.

Annexe B

Détails du fonctionnement de l'algorithme de simulation

La figure (B.1) représente le fonctionnement détaillé de l'algorithme de simulation présenté au chapitre ??.

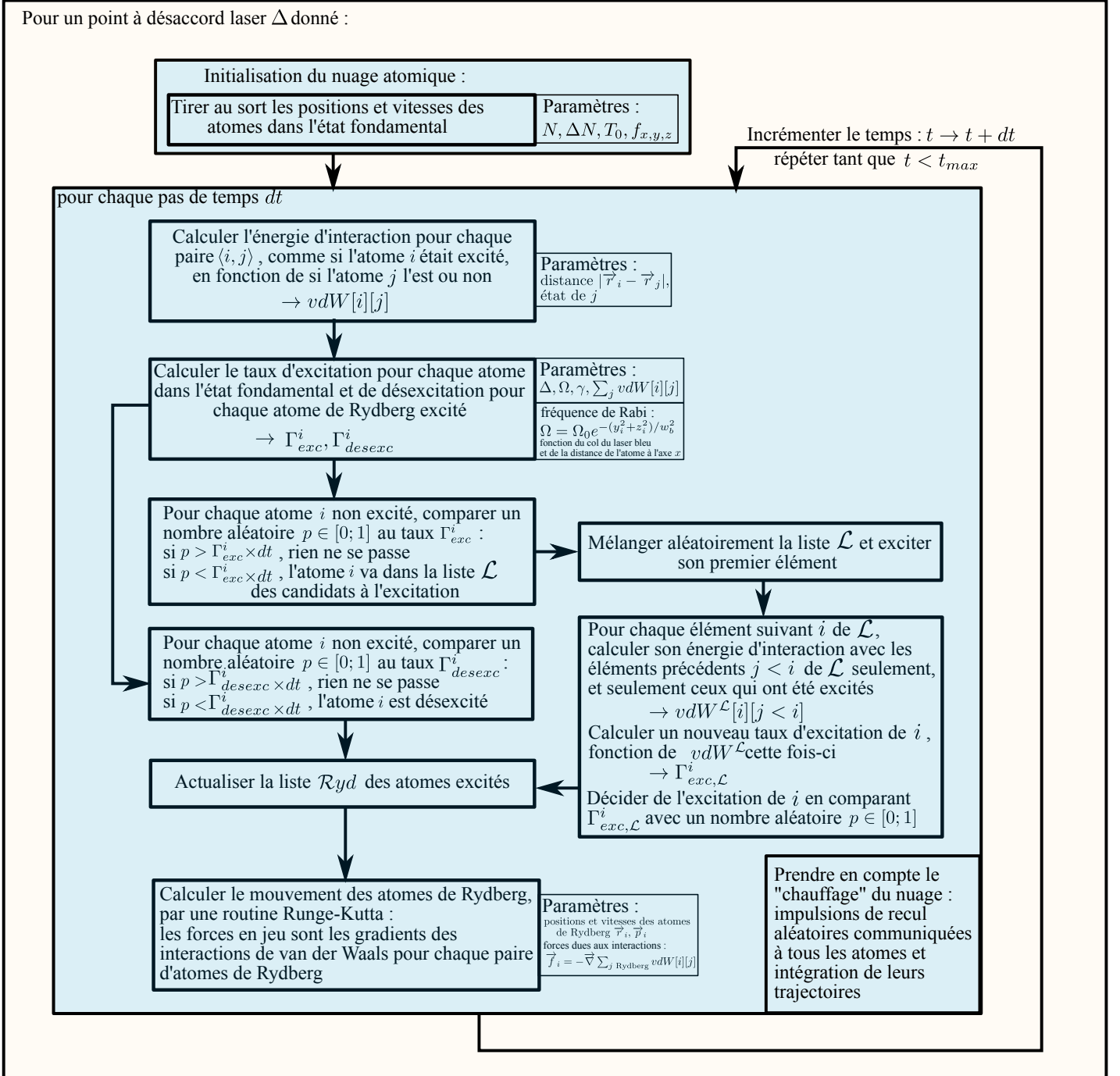


Figure B.1 Schéma fonctionnel de l'algorithme de simulation. Cette routine est répétée le nombre d'itérations souhaité, pour différents désaccords laser Δ , afin d'obtenir les spectres simulés. À chaque fois que le temps t correspond à une durée d'impulsion laser qui nous intéresse, le nombre d'atomes de Rydberg à cet instant est écrit dans un fichier de sortie.

Interacting Rydberg Atoms : from Dense Clouds of Rydberg Atoms to Quantum Simulation with Circular Atoms

Abstract: Interacting many-body quantum systems are at the heart of contemporary research in quantum physics. The understanding of such systems is crucial to the development of condensed-matter physics. Many research efforts aim at building a "quantum simulator" : a platform which allows to model a hard-to-access quantum system with a more controllable one.

Ensembles of Rydberg atoms, thanks to their strong dipolar interactions, make for an excellent system to study many-body quantum physics. We present here a study of the excitation of a dense cloud of interacting Rydberg atoms. This study was conducted on an experimental setup mixing on-chip cold atoms techniques with Rydberg atoms manipulation techniques.

The result of this study leads us to make a full-fledged proposal for the realisation of a quantum simulator, based on trapped circular Rydberg atoms. The proposed simulator is particularly promising due to its flexibility and to the long simulation times for which it would allow.

We conclude this manuscript with a detailed description of the first experimental step towards building such a simulator : the on-chip excitation of circular Rydberg atoms.

Keywords: Rydberg atoms, cold atoms, quantum simulation, dipolar interactions, circular atoms, atomic chip, dipole blockade, microwave spectroscopy

Atomes de Rydberg en interaction : des nuages denses d'atomes de Rydberg à la simulation quantique avec des atomes circulaires

Résumé : Les systèmes quantiques à N corps en interaction sont au cœur des problèmes actuels de la recherche en physique quantique. La compréhension de tels systèmes est un enjeu crucial pour le développement des connaissances en physique de la matière condensée. De nombreux efforts de recherche visent à la construction d'un « simulateur quantique » : une plateforme permettant de modéliser, grâce à un système quantique bien contrôlé, un système quantique dont l'accès expérimental est difficile.

Les fortes interactions dipolaires entre atomes de Rydberg représentent un objet d'étude choix pour ce type de problème. Nous présentons dans le présent manuscrit une étude des conditions d'excitation d'un nuage dense d'atomes de Rydberg en interaction, permise par le dispositif expérimental dont nous disposons, qui mêle les techniques de piégeage et de refroidissement d'atomes sur puce avec les techniques de manipulation des niveaux de Rydberg.

Les résultats de cette étude nous permettent de formuler une proposition expérimentale complète de développement d'un simulateur quantique fondé sur le piégeage d'atomes de Rydberg circulaires. Le simulateur que nous proposons est très prometteur, grâce à sa flexibilité et aux longs temps de simulation qu'il permettrait.

Nous terminons ce manuscrit par la description détaillée de la première étape sur le chemin vers ce simulateur : l'excitation d'atomes de Rydberg circulaires sur puce.

Mots-clés : atomes de Rydberg, atomes froids, simulation quantique, interaction dipolaire, atomes circulaires, puce atomique, blocage dipolaire, spectroscopie microonde