

# Introduction

Une approche sommaire de la marche du savoir en sciences physiques se présente comme suit : nous observons le monde qui nous entoure et tentons d'en dégager des lois générales. À partir de ces lois, nous prédisons de nouveaux phénomènes que nous cherchons à observer, dans la nature ou dans un laboratoire. Observer ces phénomènes permet de raffiner les lois générales, de les confirmer ou de les infirmer. Au fur et à mesure qu'avance notre compréhension du monde, les lois que nous formulons sont de plus en plus complexes. À un certain point, les outils mathématiques développés et utilisés pour formuler ces lois deviennent abstraits, déconnectés de notre perception sensorielle du monde. Quelle « réalité » attribuer alors aux objets, aux grandeurs, aux fonctions qui représentent le monde ?

Cette question, qui se pose dès les premières traces de l'investigation scientifique auxquelles l'histoire nous donne accès, prend une tournure dramatique avec la naissance de la théorie quantique au début du XX<sup>ième</sup> siècle. Les débats font rage à propos de la dualité onde-particule, de la superposition d'états, de l'intrication quantique et de la réalité de la fonction d'onde. Toutes les avancées de la science physique depuis lors ont confirmé la validité de la théorie quantique, depuis les fentes d'Young et les expériences de Stern et Gerlach jusqu'à l'utilisation de la précision des horloges atomiques pour le positionnement GPS, en passant par les expériences d'Aspect et le développement de la lumière laser. Bien que les questions fondamentales de réalité des objets physiques et d'ontologie du monde quantique ne soient pas tranchées, la communauté internationale des physiciens s'accorde depuis plusieurs décennies sur le fait que l'on peut utiliser sans réserve la théorie quantique pour faire des prédictions phénoménologiques sur le monde microscopique. Ces prédictions phénoménologiques sont toutes, *in fine*, exprimées dans le cadre formel de la physique classique, le seul dans lequel nous puissions mesurer des grandeurs, extraire des informations d'un système sous observation.

Les atomes de Rydberg, qui ont un électron de valence très éloigné du noyau, sont en quelque sorte des « super-atomes ». Leur taille et leur sensibilité au rayonnement électromagnétique en font des outils de choix pour observer et sonder le monde quantique, avec des dimensions et grandeurs qui tendent à s'approcher de celles du monde

de la physique classique. En particulier, les atomes de Rydberg ont permis de réaliser dans le laboratoire des expériences de pensée que l'on croyait à jamais restreintes au monde de la spéculation intellectuelle. De tels *Gedankenexperimente* ont pu être mis œuvre, comme la manipulation d'états quantiques fondamentaux à un seul atome et un seul photon [1], l'observation directe de la quantification du champ électromagnétique dans une cavité [2], le suivi en temps réel de la décohérence d'états non-classiques [3, 4], la détection non-destructive de photons [5, 6], l'observation de sauts quantiques [7, 8] ou encore la reconstruction de la fonction de Wigner d'états non-classiques du champ [9].

Une autre particularité des atomes de Rydberg réside dans l'interaction entre eux, en tant que grands dipôles électriques. Alors qu'il faut approcher deux atomes dans l'état fondamental à des distances de l'ordre de quelques nanomètres pour qu'ils interagissent, deux atomes de Rydberg interagissent à des distances de l'ordre de quelques micromètres. Les interactions entre atomes de Rydberg sont déjà détectables, dans des gaz d'atomes chauds, par l'élargissement des spectres de transition optique entre l'état fondamental et les niveaux de Rydberg [10, 11]. Le domaine des atomes froids et ses impressionnantes avancées techniques visant à piéger et refroidir des nuages atomiques [12–16] ouvre la voie à l'étude des interactions entre atomes de Rydberg dans des ensembles denses et froids. Dans un cas limite idéal, le régime de « gaz gelé » [17, 18], les atomes sont immobiles et les interactions au sein d'un ensemble d'atomes de Rydberg ont lieu avec des positions atomiques fixes.

L'objet d'étude premier du présent manuscrit est l'effet de ces interactions sur l'excitation et la dynamique d'un nuage dense d'atomes de Rydberg, dans le régime du « gaz gelé ». L'excitation résonante d'atomes de Rydberg au sein d'un gaz atomique ultra-froid subit le processus de « blocage dipolaire » [19] : l'interaction dipolaire décale la résonance des états qui contiendraient des niveaux de Rydberg spatialement proches et ces états ne sont donc pas accessibles par excitation laser. L'excitation d'un premier atome de Rydberg bloque ainsi l'excitation d'autres atomes de Rydberg dans son voisinage. L'exploitation de ce phénomène a été proposée pour réaliser des portes quantiques destinées à l'information quantique [19–21], ou encore pour réaliser une source déterministe d'atomes uniques [22].

L'excitation désaccordée d'atomes de Rydberg au sein d'un gaz atomique ultra-froid subit un processus d'« excitation facilitée » : à une certaine distance d'un atome de Rydberg déjà excité, l'interaction dipolaire est égale au désaccord du laser et rend résonante l'excitation d'un deuxième atome de Rydberg. Ces calculs numériques sur de petits nuages, ou des simulations Monte Carlo de l'excitation dans de grands nuages, confirment ce phénomène de facilitation [23–26]. Celui-ci entraîne l'excitation d'agrégats d'atomes de Rydberg spatialement corrélés qui ont été observés expérimentalement [27, 28].

Au-delà de leur effet sur l'excitation d'un ensemble d'atomes de Rydberg, les interactions dipolaires produisent aussi un effet mécanique qui peut être important. En effet, les énergies d'interaction dipolaire au sein d'un ensemble en forte interaction peuvent être bien plus élevées que les énergies cinétiques initiales d'un gaz d'atomes froids. Le mouvement relatif entre les atomes de Rydberg induit par ces interactions vient ainsi remettre en question le domaine de validité de l'approximation du gaz gelé.

Nous avons mené des expériences visant à mettre en évidence le blocage dipolaire,

l'excitation facilitée et le mouvement relatif au sein d'un ensemble d'atomes de Rydberg, en excitant des atomes de Rydberg à partir d'un nuage ultra-froid d'atomes de rubidium 87, piégés magnétiquement devant une puce atomique et refroidis près de la dégénérescence quantique [29, 30]. Les subtilités de l'excitation d'atomes de Rydberg près d'une puce sont exposées dans la thèse de Carla Hermann Avigliano [31]. Les expériences concernant l'influence des interactions sur l'excitation et la dynamique d'un nuage dense d'atomes de Rydberg sont présentées dans la thèse de Raul Celistrino Teixeira [32].

Afin d'éclairer les expériences mentionnées ci-dessus, nous avons souhaité développer un modèle numérique, fondé sur les techniques de simulation Monte Carlo, permettant de prédire l'excitation et la dynamique d'un nuage dense et froid d'atomes de Rydberg. L'accord qualitatif de ce modèle simple avec les données expérimentales nous a poussés à envisager la conception d'une plateforme de simulation quantique à partir d'atomes de Rydberg.

L'idée de la simulation quantique, proposée par R. Feynman en 1982 [33], est d'utiliser un système quantique expérimentalement contrôlable et accessible, noté  $A$ , comme modèle, comme simulateur, d'un système quantique expérimentalement difficile à contrôler et à mesurer, noté  $B$ . Il s'agit alors d'imposer le hamiltonien du système  $B$  au système  $A$ , de laisser ce dernier évoluer puis de mesurer ses propriétés, analogues à celles qu'aurait le système  $B$  après la même évolution.

L'intérêt de la simulation quantique se trouve dans l'étude de problèmes quantiques complexes. Les problèmes mettant en jeu  $N$  corps en interaction en sont l'exemple parfait. L'état d'un ensemble de  $N$  spins  $1/2$  évolue au sein d'un espace de Hilbert de dimension  $2^N$ . Calculer, même numériquement, l'évolution temporelle d'un tel système demande alors la réalisation d'opérations lourdes, telles que l'exponentiation, sur des matrices de  $2^N \times 2^N$  éléments. Dès lors que l'on dépasse un certain nombre  $N$  de corps, de tels calculs ne sont plus à la portée des ordinateurs existant, même les plus puissants. Le seuil de  $N = 40$  spins  $1/2$  est communément admis [34–37] comme limite au-delà de laquelle les méthodes numériques classiques ne fonctionnent plus. Utiliser un simulateur quantique permettrait d'outrepasser ces limites et de résoudre ainsi des problèmes de matière condensée mettant en jeu un grand nombre de particules quantiques en interactions, comme les chaînes et réseaux de spins, ou comme les comportements de gaz d'électrons dans des solides.

Un simulateur quantique idéal présente les caractéristiques suivantes : il est sous contrôle expérimental total, l'on peut faire varier les paramètres décisifs de son hamiltonien et mesurer toutes ses observables. De nombreux systèmes quantiques ont été proposés comme briques élémentaires d'un simulateur quantique, tels que les ions piégés [38, 39], les atomes froids en réseau [40–43], les circuits de qubits supra-conducteurs [44], les polaritons en cavité [45], les réseaux de photons [46, 47], les molécules polaires [48], les boîtes quantiques [49–51] et d'autres encore.

Notre idée de simulateur, les Rydberg circulaires et le piégeage des atomes de Rydberg

Problématisation ?

Annonce du plan