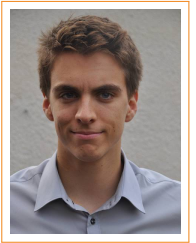


Sylvain de Léséleuc

Docteur en Physique

5 bis rue des Lyonnais
75005 Paris

☎ 06 40 53 51 82
✉ sylvain.dldk@gmail.com



Etudes

- 2015 - 2018 **Doctorat en Physique**, *Institut d'Optique, Université Paris-Saclay.*
- 2014 - 2015 **Master en Physique**, *ETH, Zürich.*
- 2010 - 2013 **Diplôme d'ingénieur**, *Ecole polytechnique, Palaiseau.*
- 2008 - 2010 **Classe Préparatoire (Mathématiques et Physique)**, *Lycée Faidherbe, Lille.*
- 2008 **Baccalauréat S (Mention TB)**, *Lycée Diderot, Carvin.*

Carrière

- 2019- **Post-doc**, *Institut d'Optique, groupe du Prof. Browaeys.*
- 2015-2018 **Doctorant**, *Institut d'Optique, groupe du Prof. Browaeys.*
- 2014-2015 **Assistant de recherche**, *Tokyo University, groupe du Prof. Furusawa.*
- 2014 **Assistant de recherche**, *ETH Zürich, groupe du Prof. Esslinger.*

Publications

2018

- 1 **S. de Léséleuc et al.**
Experimental realization of a symmetry protected topological phase of interacting bosons with Rydberg atoms.
[arXiv:1810.13286](https://arxiv.org/abs/1810.13286)
- 2 D. Barredo*, V. Lienhard*, **S. de Léséleuc***, T. Lahaye and A. Browaeys
Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom.
Nature **561**, 79
- 3 S. Weber, **S. de Léséleuc**, V. Lienhard, D. Barredo, T. Lahaye, A. Browaeys and H.P. Büchler
Topologically protected edge states in small Rydberg systems.
Quantum Sci. Technol. **3**, 044001
- 4 V. Lienhard*, **S. de Léséleuc***, D. Barredo, T. Lahaye, A. Browaeys, M. Schuler*, L.-P. Henry, A.M. Läuchli
Observing the space- and time-dependent growth of correlations in dynamically tuned synthetic Ising antiferromagnets.
Phys. Rev. X **8**, 021070
- 5 **S. de Léséleuc**, D. Barredo, V. Lienhard, A. Browaeys and T. Lahaye
Analysis of imperfections in the coherent optical excitation of single atoms to Rydberg states.
Phys. Rev. A **97**, 053803
- 6 **S. de Léséleuc***, S. Weber*, V. Lienhard, D. Barredo, H.P. Büchler, T. Lahaye, and A. Browaeys
Accurate mapping of multilevel Rydberg atoms on interacting spin-1/2 particles for the quantum simulation of Ising models.
Phys. Rev. Lett. **120**, 113602

2017

- 7 **S. de Léséleuc***, D. Barredo*, V. Lienhard*, A. Browaeys and T. Lahaye
Local optical control of the resonant dipole-dipole interaction between Rydberg atoms.
Phys. Rev. Lett. **119**, 053202
- 8 M. Marcuzzi, J. Minar, D. Barredo, **S. de Léséleuc**, H. Labuhn, T. Lahaye, A. Browaeys, E. Levi, and I. Lesanovsky
Facilitation dynamics and localization phenomena in Rydberg lattice gases with position disorder.
Phys. Rev. Lett. **118**, 063606

2016

- 9 D. Barredo*, **S. de Léséleuc***, V. Lienhard, T. Lahaye, and A. Browaeys
An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary 2d atomic arrays.
Science **354**, 1021
- 10 H. Labuhn*, D. Barredo*, S. Ravets, **S. de Léséleuc**, T. Macrì, T. Lahaye and A. Browaeys
Tunable two-dimensional arrays of single Rydberg atoms for realizing quantum Ising models.
Nature **534**, 667



Paris, le 1^{er} novembre 2018,

Rapport sur le manuscrit de thèse de Sylvain de Léséleuc

Le travail de thèse de Sylvain de Léséleuc a été effectué sous la direction de Thierry Lahaye, dans l'équipe pilotée par Antoine Browaeys au Laboratoire Charles Fabry. Ce travail est consacré à la mise en œuvre et à l'exploitation d'une nouvelle plateforme expérimentale pour la simulation quantique.

Le manuscrit s'articule en trois parties. Il s'agit dans un premier temps de former un réseau régulier d'atomes piégés dans des pinces optiques ; ce réseau qui peut être uni, bi ou tridimensionnel est construit à partir d'un assemblage irrégulier et aléatoire de sites contenant zéro ou une particule. L'arrangement régulier est obtenu en bougeant rapidement les pinces optiques, d'une manière qui rappelle le jeu de taquin. Dans un deuxième temps, une excitation lumineuse permet de porter les atomes dans un état de Rydberg. Un élément-clé intervient alors : le « blocage de Rydberg » résultant de l'interaction de Van der Waals, qui empêche d'exciter simultanément deux atomes si leur distance est inférieure à un certain seuil. Le résultat final de l'excitation peut alors être vu comme une bonne approximation de l'état fondamental de certains hamiltoniens de particules en interaction, l'hamiltonien d'Ising par exemple. Dans un troisième temps, l'utilisation du couplage dipolaire résonant entre atomes de Rydberg permet d'étendre la classe d'hamiltoniens pouvant être simulés ; Sylvain de Léséleuc s'intéresse ici à l'implémentation du modèle en réseau de Su-Schrieffer-Heeger (SSH). Au niveau de la particule unique (ou d'un gaz de fermions sans interaction), ce réseau unidimensionnel est un exemple emblématique de la notion de bande topologique, avec des états de bord facilement identifiables. Dans son manuscrit, Sylvain de Léséleuc étudie à la fois ce régime bien connu de la particule unique et le régime beaucoup plus subtil d'un remplissage moitié du réseau.

Avant de détailler un peu plus le contenu de cette thèse, je voudrais dès maintenant souligner son caractère exceptionnel, à la fois par le nombre de résultats obtenus et par les perspectives spectaculaires qu'elle ouvre. À lui seul, l'assemblage atome par atome d'un réseau régulier à 1D, 2D et 3D (Science 2016, Nature 2018) est un résultat majeur ; il permet de réaliser en une fraction de seconde un état qui n'était auparavant accessible (pour un gaz d'atomes) que par l'intermédiaire d'un isolant de Mott (ou un isolant de bande pour les fermions), beaucoup plus longs à produire. L'utilisation du blocage de Rydberg pour simuler le modèle d'Ising à deux dimensions est elle aussi remarquable. Des expériences précurseuses avaient été réalisées en 2015 à

Munich dans le groupe de C. Gross et I. Bloch, portant sur quelques (2 à 4) excitations de Rydberg. Ici, l'expérience est faite avec un système de $7 \times 7 = 49$ sites, conduisant à 25 excitations en moyenne pour l'état de Néel antiferromagnétique (Nature 2016, PRL 2018, PRX2018). Cela permet d'étudier précisément les fonctions de corrélation à deux corps, une étape indispensable pour caractériser les défauts résiduels du simulateur et le valider. La dernière partie du travail sur le modèle SSH est peut-être encore plus prometteuse dans la mesure où elle ouvre la voie aux phases topologiques de la matière en présence d'interactions. De nombreuses études ont été menées ces dernières années sur le lien topologie-physique grâce à des assemblées d'atomes froids ou de polaritons de cavité. Néanmoins la vaste majorité de ces expériences était limitée au cas sans interaction. Dans l'expérience présentée au dernier chapitre de cette thèse et non encore publiée, on voit apparaître une situation où les interactions jouent un rôle crucial en renforçant la robustesse topologique de l'état, qui subsiste même quand la symétrie (chirale) nécessaire dans le cas de la particule unique est brisée.

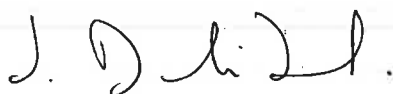
Je passe maintenant brièvement en revue les différents chapitres du manuscrit. Après une introduction bien documentée sur le lien entre les modèles de spins et les réseaux d'atomes de Rydberg, le chapitre 2 est consacré à la réalisation de réseaux réguliers tridimensionnels. Sylvain de Léséleuc y décrit le montage holographique permettant de créer les pinces optiques et présente les principaux paramètres caractérisant l'état d'équilibre d'un atome au foyer d'une pince, ainsi que les diagnostics possibles. Le chapitre 3 décrit la technique d'assemblage du réseau, avec une pince mobile permettant de transférer un atome d'un site à un autre. Sylvain de Léséleuc y présente notamment l'algorithme de transfert et ses limitations.

Les chapitres 4, 5 et 6 sont consacrés à la réalisation du modèle d'Ising avec des atomes de Rydberg. Chaque atome joue le rôle d'un spin $\frac{1}{2}$, avec les deux états $|-\rangle$ et $|+\rangle$ correspondant à l'atome dans l'état interne fondamental et dans l'état de Rydberg. L'interaction entre deux atomes voisins n'est significative que si ces atomes sont tous deux dans l'état de Rydberg. Au chapitre 4, Sylvain de Léséleuc présente les résultats expérimentaux obtenus dans le cas où cette interaction (antiferromagnétique) n'est significative qu'entre proches voisins. Les chapitres 5 et 6 sont consacrés à un approfondissement des techniques utilisées et à une étude détaillée des sources de bruit dans ces expériences. Il s'agit d'une étape importante pour valider de manière quantitative le principe même d'un simulateur quantique. Cette description est effectuée avec beaucoup de rigueur et de nombreuses expériences annexes sont menées pour caractériser complètement les processus d'amortissement, les erreurs de détection, ou encore le rôle des champs électriques et magnétiques.

Les chapitres 7 et 8 sont consacrés à l'implémentation du modèle de spin xy dans ces réseaux d'atomes de Rydberg. Cette fois, le principe est de transférer tous les atomes du réseau vers un état de Rydberg noté R , puis de faire basculer de manière sélective un (ou plusieurs) atome vers un autre état de Rydberg R' . L'interaction dipole-dipole

résonante entre l'atome R' et un voisin R induit alors des transitions de $R' + R$ vers $R + R'$, ce qui est précisément l'ingrédient requis pour le modèle xy . Au chapitre 7, Sylvain de Léséleuc décrit des expériences très convaincantes mettant en évidence ce couplage entre deux atomes, y compris l'observation de sa dépendance angulaire, bien approchée par la loi simple en $1 - 3 \cos^2 \theta$. Le chapitre 8 est entièrement consacré aux résultats non encore publiés obtenus pour le modèle unidimensionnel SSH. Sylvain de Léséleuc commence par décrire des expériences simples et élégantes, menées avec une seule excitation. Il observe de manière très claire les états de bord dans le cas topologique et confirme leur localisation exponentielle. Il étudie également la dynamique d'une excitation le long de la chaîne et la manière dont elle se délocalise selon que la chaîne est topologique ou non. La dernière partie de ce chapitre, point d'orgue du travail de thèse, est consacrée à l'entrée dans le régime d'interaction forte (gaz de bosons avec une répulsion de cœur dur). Sylvain de Léséleuc utilise pour cela une chaîne à "remplissage moitié", obtenue quand environ 50% des atomes ont basculés de R vers R' . Comme indiqué plus haut, un résultat majeur – suggéré sur le plan théorique par H.P. Büchler – est la robustesse accrue d'une phase topologique en présence de ces interactions. Enfin, le dernier chapitre résume les résultats acquis et dégage plusieurs voies de progression pour cette nouvelle plateforme expérimentale, à la fois sur le plan technique et sur le plan de la classe d'hamiltoniens que l'on peut simuler.

Comme écrit plus haut, ce travail de thèse constitue une étape très importante dans le développement de simulateurs quantiques à base d'atomes froids. Le manuscrit, d'une qualité matérielle irréprochable, est extrêmement bien documenté et écrit avec un souci pédagogique permanent. Il permet d'apprécier l'évolution des idées dans ce domaine et de réaliser l'importance des verrous qui ont été levés lors de ce travail de doctorat, avec la possibilité de disposer désormais de réseaux réguliers de plusieurs dizaines d'atomes, adressables site par site et produits avec une cadence élevée (plusieurs Hz). Sylvain de Léséleuc a rédigé son manuscrit d'une manière qui permet de bien évaluer ses propres contributions (qui sont nombreuses et essentielles!) au sein d'une équipe extrêmement productive. Au total, le candidat est co-auteur de 9 publications, dont 3 en premier auteur et 3 en deuxième auteur, dans les revues les plus prestigieuses (2 Nature, 1 Science, 3 PRL, 1 PRX). Nous sommes ici face à un travail de tout premier plan au niveau international, et il ne fait bien sûr aucun doute que le candidat mérite d'être autorisé à soutenir cette thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences.



Jean Dalibard
Professeur au Collège de France



Thierry Giamarchi

Professor, DQMP Director

24, quai Ernest-Ansermet, CH – 1211 Geneva 4
Tel. +41 (0) 22 379 63 63
DQMP secr. +41 (0) 22 379 65 11
Group secr. +41 (0) 22 379 62 24
thierry.giamarchi@unige.ch
<http://dqmp.unige.ch/giamarchi>

11 novembre 2018

Rapport sur la thèse de Mr Sylvain de Léséleuc :

“Quantum simulation of spin models with assembled arrays of Rydberg atoms”

La thèse de Mr de Léséleuc porte sur le développement et l'utilisation en tant que simulateur quantique d'un système constitué d'atomes de Rydberg piégés. Un tel système peut servir à réaliser un système quantique de spins $1/2$ couplés. De telles simulations quantiques sont pertinentes pour déterminer les propriétés tant statiques que dynamiques (quench, etc.) de systèmes fortement corrélés pour lesquelles des solutions analytiques ou numériques sont loin d'être évidentes. Au delà de l'aspect méthodologique la thèse étudie la physique de systèmes réalisés avec un tel simulateur, en particulier pour étudier leurs propriétés topologiques.

Le développement de simulateurs quantiques est un domaine extrêmement actif de l'optique quantique et des systèmes corrélés. Obtenir un simulateur quantique qui est une excellente réalisation d'un modèle théorique donné avec une excellente souplesse dans le choix des paramètres ainsi qu'un excellent contrôle et reproductibilité, est loin d'être évident. La thèse de Mr de Léséleuc qui développe un simulateur remarquable à base d'atomes de Rydberg et démontre sa puissance en étudiant des problèmes physiques intéressants s'attaque donc à un sujet important et très actif tant au niveau des atomes froids que des systèmes corrélés et ouvre des liens avec des problèmes en matière condensée.

Le manuscrit de thèse est divisé en trois grandes parties. De plus une introduction motive et présente le plan et la problématique de la thèse. Une conclusion résume les travaux de la thèse et présente des perspectives. Un appendice précise certains points techniques.

La première partie (Chapitres 2 et 3) discute le simulateur lui-même. Après avoir rappelé le principe de base, cette partie décrit l'algorithme utilisé pour créer le potentiel de piégeage des atomes de Rydberg permettant d'obtenir une grande variété de réseaux tant bi-dimensionnels que tri-dimensionnels. La solution proposée est élégante et efficace. Le chapitre décrit ensuite comment déplacer de façon efficace les atomes pour les amener dans les positions souhaitées. Ceci permet d'obtenir un remplissage quasi-parfait du réseau. Une étude des performances (scalabilité, etc.) et des limites du simulateur est ensuite donnée, ainsi que la comparaison avec des systèmes similaires ou concurrents. Cette partie est bien structurée et, au delà des avancées de recherche originale présentées dans ces chapitres, constitue également une introduction claire à la physique de tels simulateurs.

La deuxième partie (Chapitres 4,5 et 6) discute essentiellement la physique d'un tel simulateur dans la limite Ising. Cette partie explique en particulier comment utiliser de façon efficace les

interactions de van der Waals pour réaliser des modèles d'Ising avec des interactions à portée variable et les étudier, soit après un quench soit après une évolution aussi adiabatique que possible vers l'état fondamental. Une étude, tant expérimentale que numérique des effets de décohérence sur les corrélations d'un tel système est détaillée. Afin de comprendre de façon plus fine les effets de décohérence une étude d'oscillation de Rabi est effectuée. La façon d'exciter le système avec une excitation à deux photons est analysée en détails et chaque point limitant (émission spontanée de l'état intermédiaire, bruit des lasers, faux positifs et négatifs, etc.) détaillé pour analyser son impact sur les corrélations. Un très bon accord entre les études théoriques et l'observation expérimentale est mise en évidence. Des pistes pour améliorer encore les performances du simulateur sont ensuite proposées. Finalement cette partie analyse l'effet des autres états de Rydberg, en plus du fondamental et de l'état excité principal, sur les performances du simulateur. Là encore l'étude expérimentale est comparée à des analyses théoriques pour le cas de deux atomes. La façon d'utiliser efficacement l'angle entre atomes par rapport à l'axe de quantification est discutée. Cette partie décrit donc des améliorations sensibles pour pouvoir utiliser un tel système en tant que simulateur quantique de spins d'Ising $1/2$.


La troisième partie (Chapitres 7 et 8) décrit la façon d'étendre le simulateur à l'analyse de spins dans la limite XY en utilisant le couplage dipolaire. Ceci passe tout d'abord par le contrôle de deux états de Rydberg excités différents. Cette partie décrit comment créer un tel système et effectuer le contrôle de façon efficace. Plusieurs possibilités sont analysées expérimentalement en détail. Pour le moment le simulateur est limité pour des raisons pratiques à la limite XY ou la limite Ising mais la possibilité d'avoir l'ensemble des trois couplages spin-spin est également analysée quantitativement. Finalement le simulateur XY est utilisé pour étudier les propriétés topologiques du modèle Su-Schrieffer-Heeger. Plusieurs systèmes avec des états de bord, ou avec une phase topologiquement triviale sont réalisés et les excitations et corrélations analysées en détail. La dynamique d'une particule unique est étudiée ainsi que des systèmes many-body avec un remplissage fini de la bande. Bien que les spins $1/2$ soient assimilables à des bosons de coeur dur, et donc à une dimension à des fermions (libres) sans spin pour des interactions premier voisins, la plus longue portée des interactions dans ce système conduit à un problème non trivial.

Finalement la Conclusion non seulement résume les principaux points de la thèse mais donne également des pistes pour le futur et les améliorations d'un tel simulateur.

Comme il est évident en lisant le résumé ci dessus cette thèse est un travail de recherche d'un excellent niveau. L'étude est très solide et menée avec intelligence et soin. Elle témoigne non seulement d'une maîtrise technique remarquable, tant au niveau expérimental, où les techniques mises en jeu sont clairement complexes, mais également au niveau des concepts et de l'analyse théorique. Le développement d'un tel simulateur, ainsi que les études physiques associées constituent un effort de recherche remarquable tant par sa qualité que par son volume (9 publication avec le candidat en co-auteur sont mentionnées)

Le manuscrit proprement dit est bien structuré et présente de façon très précise les concepts et techniques qui sont utilisés dans la thèse. Il y a quelques défauts mineurs qui sont la conséquence de la quantité du matériel qui constitue la thèse ainsi que le nombre et la difficulté des techniques que Mr de Léséleuc a su mettre en oeuvre pour obtenir les excellents résultats mentionnés ci-dessus. Le manuscrit est en conséquence très dense et parfois un peu difficile à lire malgré l'effort clairement apporté à la rédaction.

Tout ceci n'est qu'un défaut très mineur qui ne doit pas faire oublier qu'il s'agit d'un travail de qualité remarquable tant par la qualité, l'ampleur et la quantité des résultats obtenus, et qui donc mérite pleinement d'être soutenu.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Giamarchi', with a stylized flourish above the name.

Thierry Giamarchi

PROCES VERBAL DE SOUTENANCE DE DOCTORAT

à déposer dans les 3 jours ouvrés après la soutenance au service de scolarité de l'établissement de préparation du doctorat daté et signé

Monsieur Sylvain Pierre Charles DE LESELEUC DE KEROUARA

ECOLE DOCTORALE : Ondes et Matière

ETABLISSEMENT DE PREPARATION DU DOCTORAT: Institut d'optique Graduate School

Titre de la thèse : Simulation quantique de modèles de spins dans des matrices d'atomes de Rydberg

Spécialité de doctorat : physique quantique

Date de soutenance : 10 décembre 2018 Heure : 14h00 Lieu : Amphithéâtre Institut d'Optique Graduate School 2 avenue Augustin Fresnel 91120 Palaiseau

Décision du Jury

- Admission
 Ajournement


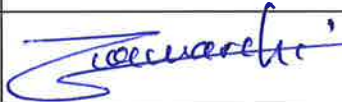

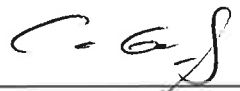
Avis du Jury sur la reproduction de la thèse

- Thèse dont le dépôt légal peut être finalisé après des modifications mineures*
 Corrections majeures demandées par le jury

Si des corrections sont demandées, membre du Jury désigné par le président pour vérifier les corrections : Nom, prénom, titre et fonction dans le jury :

Dans ce cas, le président du jury, complète, date et signe le formulaire de vérification des corrections majeures apportées à la thèse et le remet au membre du jury chargé de la vérification.

* Des modifications mineures seront toujours nécessaires au moins pour préciser le nom du président du Jury sur la page de couverture en vue du 2eme dépôt légal de la thèse.

Civilité, Nom et Prénom	Titre	Fonction dans le Jury	Signature
M. Thierry LAHAYE	CR1	Directeur de thèse	selon l'arrêté du 25 Mai 2016, le directeur de thèse participe au Jury mais ne prend pas part à la décision
M. Jean DALIBARD	Professeur	Rapporteur <input type="checkbox"/> Président	
M. Thierry GIAMARCHI	Professeur	Rapporteur <input type="checkbox"/> Président	
Mme Jacqueline BLOCH	Directeur de Recherche	Examineur <input checked="" type="checkbox"/> Président	
M. Christian GROSS	Professeur	Examineur <input type="checkbox"/> Président	

RAPPORT DE SOUTENANCE DE DOCTORAT

à déposer si possible trois jours ouvrés après la soutenance et au plus tard un mois après la soutenance au service de scolarité de l'établissement de préparation de la thèse, daté et signé

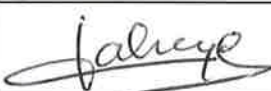

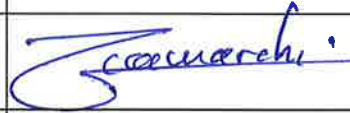

Monsieur Sylvain Pierre Charles DE LESELEUC DE KEROUARA

ECOLE DOCTORALE : Ondes et Matière

ETABLISSEMENT DE PREPARATION DU DOCTORAT: Institut d'optique Graduate School

During his PhD defense, Sylvain de Léséleuc gave an elegant and particularly pedagogical presentation of his experimental work on "Quantum Simulation of spin models with assembled arrays of Rydberg atoms". He selected a relevant selection of topics among the wealth of important scientific results he obtained, in a particularly competitive research field. The defense showed a remarkable balance between detailed description of decisive technical improvement Sylvain de Léséleuc developed for the experimental set-up, and deepest insight into complex many-body physics.

The jury was very impressed by the quality of the answers Sylvain de Léséleuc provided to the variety of questions asked during the discussion. He demonstrated full mastering of all aspects of the work, from technical details to the most fundamental aspects of the physics. The jury highly appreciated the dynamism and scientific maturity of a particularly promising young scientist.

Civilité, Nom et Prénom	Titre	Fonction dans le Jury	Signature
M. Thierry LAHAYE	CR1	Directeur de thèse	
M. Jean DALIBARD	Professeur	Rapporteur <input type="checkbox"/> Président	
M. Thierry GIAMARCHI	Professeur	Rapporteur <input type="checkbox"/> Président	
Mme Jacqueline BLOCH	Directeur de Recherche	Examineur <input checked="" type="checkbox"/> Président	
M. Christian GROSS	Professeur	Examineur <input type="checkbox"/> Président	