

Rapport d'activité

Hélène Perrin

Laboratoire de physique des lasers, UMR 7538

Villetaneuse

Directrice : Anne Amy-Klein depuis janvier 2019

Précédent directeur : Olivier Gorceix

décembre 2017 – fin 2023

Table des matières

1	Curriculum vitae	3
2	Recherche scientifique	4
2.1	Introduction	4
2.2	Résultats expérimentaux sur l'expérience Rubidium	6
2.2.1	Potentiels adiabatiques	6
2.2.2	Anneau à atomes	7
2.2.3	Rotation rapide dans un piège anharmonique	11
2.2.4	Rotation modérée : fonte du réseau de vortex	13
2.2.5	Bulle en microgravité	14
2.2.6	Améliorations apportées à l'expérience Rubidium	16
2.3	Expérience Sodium : un gaz 1D sur une puce à atomes	17
2.3.1	Montage expérimental	18
2.3.2	Obtention d'un condensat de Bose-Einstein	19
2.3.3	Résonance moléculaire	20
2.4	Activité théorique	21
2.4.1	Bosons corrélés dans un anneau	21
2.4.2	Dissipation d'un courant dans un anneau en présence de barrière	21
2.4.3	Ondes de choc dans un gaz quantique	23
2.4.4	Au-delà des chocs : vers le régime turbulent	24
2.5	Principales collaborations	25
2.6	Place de ma recherche dans celle de mon unité	26
2.7	Production scientifique 2018-2023	27
3	Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique	31
3.1	Encadrement de thèses et post-docs	31
3.1.1	Thèses	31
3.1.2	Post-docs	33
3.2	Enseignement, formation, diffusion de la culture scientifique	33
3.3	Diffusion scientifique	34
3.4	Communication auprès du grand public	35
3.5	Expertise, évaluation	36
4	Transfert technologique, relations industrielles et valorisation	37
5	Encadrement, animation et administration de la recherche	38

1 Curriculum vitae

Hélène PERRIN

Tél : 01 49 40 33 93 ou 33 71
Fax : 01 49 40 32 00
helene.perrin @ univ-paris13.fr

51 ans
veuve
trois enfants

depuis 2022 Directrice du DIM QuantIP

depuis avr. 2019 Directrice adjointe du LPL

depuis oct. 2017 Directrice de Recherche CNRS affectée au Laboratoire de physique des lasers (UMR 7538, Université Paris 13) dans l'équipe Condensats de Bose-Einstein (BEC).

depuis 2012 Responsable de l'équipe BEC.

depuis 2009 Co-direction de l'équipe BEC avec Vincent Lorent.

2008 Habilitation à diriger des recherches, soutenue le 4 décembre 2008, devant le jury composé de Michèle Leduc (présidente), Christopher Foot, Rudolf Grimm et Christoph Westbrook (rapporteurs), Christian Chardonnet et Vincent Lorent.

2002 -2017 : Chargée de Recherche 1^{re} classe.

1999 -2002 : Chargée de Recherche 2^e classe.

1998 -1999 : Post-doc au Service de Physique de l'Etat Condensé du CEA (Saclay), dans l'équipe de Christian Glattli. *Mesures de bruit dans les gaz d'électrons bidimensionnels.*

1995 -1998 : Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, soutenue le 26 juin 1998 avec la mention Très Honorable avec les félicitations du jury, *Refroidissement d'atomes de césium dans un piège dipolaire très désaccordé.* Travail effectué sous la direction de Christophe Salomon au laboratoire Kastler Brossel, École normale supérieure, Paris. Allocataire monitrice polytechnicienne à l'Université Pierre et Marie Curie.

1994-1995 : DEA de Physique Quantique (mention Bien). Stage de DEA : *Observation d'atomes de césium confinés dans un piège opto-électrique* (Christophe Salomon).

1991 -1994 : Scolarité à l'École polytechnique (Palaiseau). Stage de fin d'étude : *Étude théorique d'un miroir à atomes et étude expérimentale des grandes densités dans un piège magnéto-optique*, sous la direction de Jean Dalibard.

1989 -1991 : Math. sup. et spé. (M') au lycée Louis-le-Grand, Paris.

1989 : Baccalauréat série C, mention Très Bien.

2 Recherche scientifique

2.1 Introduction

Le domaine du refroidissement et du piégeage d'atomes¹ a connu une progression extraordinaire depuis l'obtention en 1995 du premier condensat de Bose-Einstein d'un gaz d'atomes dilué, récompensée par le prix Nobel 2001. Chaque année ou presque, une avancée majeure est obtenue par la communauté. On a pu successivement observer des interférences entre condensats, obtenir un faisceau atomique très cohérent analogue à un laser, observer la formation de tourbillons quantiques (vortex), observer la transition superfluide-isolant de Mott dans un réseau optique... Les résonances de Feshbach de la longueur de diffusion permettent de contrôler les interactions entre atomes, de produire des molécules froides, de fermions ou de bosons, et d'observer la transition BCS dans les gaz de fermions froids. Les propriétés de ces gaz quantiques en dimension réduite (1D ou 2D) sont explorées depuis quelques années. Citons par exemple l'observation d'un gaz de Tonks-Girardeau² en dimension 1, dans lequel les bosons se comportent comme des fermions. En 2006, l'équipe de Jean Dalibard a observé la transition de Kosterlitz-Thouless³ dans des gaz piégés en dimension 2. L'équation d'état d'un gaz 2D a été mesurée par les équipes de Cheng Chin (Chicago) et de Jean Dalibard⁴, et le saut de densité superfluide à la transition par Zoran Hadzibabic⁵. Le degré de contrôle des gaz quantiques à l'heure actuelle est tel qu'il devient raisonnable de les utiliser comme simulateurs quantiques⁶, de la manière proposée par Richard Feynman en 1982⁷. Les développements les plus récents concernent la possibilité d'ajouter des champs de jauge⁸, ce qui mime la situation d'électrons en présence d'un champ magnétique.

Au laboratoire de physique des lasers, nous menons des expériences sur la dynamique superfluide des gaz quantiques (en général des condensats de Bose-Einstein puisque nous travaillons avec des bosons). Nous nous intéressons également au régime des basses dimensions (1D, 2D). Je dirige depuis 2012 l'équipe BEC, qui est composée de cinq permanents, auxquels s'ajoutent selon les années deux ou trois étudiants en thèse, et plus rarement un post-doc. Les membres permanents sont Laurent Longchambon et Romain Dubessy (maîtres de conférence), Aurélien Perrin (CR1 CNRS), Thomas Badr (IR CNRS) et moi-même. Notre équipe a été membre du DIM SIRTEQ (Sciences et Ingénierie en Région Île de France pour les Technologies Quantiques), un réseau financé par la Région que j'ai contribué à fonder en 2016 et qui a été actif de 2017 à fin 2021, puis depuis 2022 du DIM QuanTiP sur la même thématique, que je coordonne.

Dans ce rapport, je passerai en revue les principaux résultats obtenus depuis décembre 2017 sur les deux montages expérimentaux de l'équipe ainsi que nos avancées théoriques. D'une part, sur l'expérience utilisant l'atome de rubidium opérationnelle depuis 2011, nous

1. Voir le livre que j'ai coordonné avec Robin Kaiser et Michèle Leduc, *Atomes, ions, molécules ultra-froids et les technologies quantiques*, EDP Sciences (2020).

2. T. Kinoshita *et al.*, *Science* **305**, 1125 (2004); B. Paredes *et al.*, *Nature* **429**, 277 (2004).

3. Z. Hadzibabic, P. Krüger, M. Cheneau, B. Battelier et J. Dalibard, *Nature* **441**, 1118 (2006).

4. C.-L. Hung *et al.*, *Nature* **470**, 236-239 (2011); T. Yefsah *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 130401 (2011).

5. P. Christodoulou *et al.*, *Nature* **594**, 191 (2021).

6. I. Bloch, J. Dalibard, et S. Nascimbène, *Nature Physics* **8**, 267 (2012).

7. R. P. Feynman, *Int. J. Th. Phys.* **21**, 467 (1982).

8. J. Dalibard, F. Gerbier, G. Juzeliūnas et P. Öhberg, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1523 (2011).

avons tiré parti de la maîtrise des potentiels adiabatiques pour atomes habillés par des champs radiofréquences, développée au cours des thèses de Karina Merloti et Camilla De Rossi, pour étudier la dynamique des gaz de Bose essentiellement dans deux géométries : un piège annulaire⁹ (objectif de l'ANR SuperRing) et un piège en forme de bulle qui permet de mettre les atomes en rotation à très grande vitesse¹⁰. Les résultats obtenus ont fait l'objet de deux thèses sous ma direction, celle de Mathieu de Goër de Herve qui a largement défriché ces sujets (2015-2018) et celle de Yanliang Guo qui a systématisé la prise de données pour des résultats quantitatifs (2017-2020). Avinash Kumar, qui a effectué un séjour postdoctoral dans l'équipe d'octobre 2016 à juillet 2018, a participé à ces résultats tout en étudiant une méthode alternative de mise en rotation des atomes par impression de phase¹¹. Une méthode de compensation de la gravité pour peupler davantage la surface de la bulle a été testée en collaboration avec l'équipe de Vanderlei Bagnato à la fin de la thèse de Yanliang. David Rey, qui a pris la suite en 2019, a participé à ce travail mettant en évidence l'obtention d'un anneau par un mécanisme dû à l'énergie de l'état fondamental (ou énergie de point zéro) du confinement transverse¹². En dehors de cette contribution, la thèse de David a surtout été dédiée des améliorations en instrumentation. Les thèses de Rishabh Sharma (débutée en 2021) et de Matthieu Cassus (débutée en 2023) sont consacrées à la dynamique très hors équilibre, dans la lignée des expériences de rotation rapide.

D'autre part, sur l'expérience développée par Aurélien Perrin dont l'objectif est l'étude des excitations et de la dynamique d'un gaz de sodium unidimensionnel confiné par des champs magnétiques, RF et micro-ondes produits par une puce à atomes, nous avons optimisé le transport des atomes dans un piège magnétique depuis l'enceinte du piège magnéto-optique (MOT) jusqu'à l'enceinte à vide finale¹³. En parallèle, la monture de la puce a été dessinée et assemblée par Thomas Badr. Jusqu'à 2020 mon implication dans cette expérience était limitée. J'ai dirigé la thèse de Joseph Seaward (2017-2020), qui a participé à l'acquisition de données, la conception du système d'imagerie, et le montage des enceintes à vide, et suivi de près la phase de rédaction de sa thèse. Depuis 2020, avec l'arrivée de Manon Ballu en thèse, mon implication est plus marquée, à la fois dans l'encadrement et le suivi scientifique et technique de l'expérience. Un nouvel étudiant, Bastien Mirmand, a rejoint l'équipe sur ce projet à la rentrée 2023.

Enfin, je présenterai mes travaux de théorie, réalisés au départ dans le cadre de l'ANR SuperRing avec Romain Dubessy et Anna Minguzzi du LPMCM. Certains d'entre eux impliquent également Maxim Olshanii, de l'Université du Massachusetts à Boston, un collaborateur de longue date. Nous avons étudié la dynamique d'un gaz unidimensionnel annulaire¹⁴, ce qui nous a amené à traiter également d'ondes de choc dans les superfluides¹⁵. Plus récemment, nous avons lancé avec Anna Minguzzi un travail théorique et numérique étudiant les excitations produites dans un gaz 1D lorsqu'il est soumis à une forte perturbation, avec prolifération de solitons.

9. M. de Goër de Herve et al., *J. Phys. B* **54**, 125302 (2021). Voir aussi le chapitre III de L. Amico et al., *AVS Quantum Sci.* **3**, 039201 (2021).

10. Y. Guo et al., *Phys. Rev. Lett.* **124**, 025301 (2020). Voir le Synopsis associé dans *Physics*.

11. A. Kumar et al., *Phys. Rev. A* **97**, 043615 (2018).

12. Y. Guo et al., *New J. Phys.* **24**, 093040 (2022).

13. T. Badr et al., *Appl. Phys. B* **125**, 102 (2019).

14. J. Polo Gomez, R. Dubessy, P. Pedri, H. Perrin, A. Minguzzi, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 195301 (2019).

15. R. Dubessy et al., *Phys. Rev. Research* **3**, 013098 (2021)

2.2 Résultats expérimentaux sur l'expérience Rubidium

2.2.1 Potentiels adiabatiques

Les potentiels adiabatiques sont des systèmes très puissants pour réaliser des pièges aux géométries complexes. Ils permettent d'obtenir un gaz quasi bidimensionnel, un double puits de potentiel, un anneau à atomes. . . L'idée, proposée par Zobay et Garraway en 2001 ¹⁶, est d'associer un champ magnétique statique inhomogène et un champ radio-fréquence (RF) qui couple de façon résonnante les sous-niveaux magnétiques d'un atome aux points de l'espace où l'écart Zeeman entre ces niveaux correspond à l'énergie d'un photon RF. En ces points, il y a donc un croisement évité, dont l'amplitude est donnée par l'amplitude du champ RF. Si celle-ci est assez grande pour empêcher les transitions en ces points et assurer un suivi adiabatique de l'état propre local du système {atome + champ RF}, appelé « état habillé », les atomes se trouvent dans un potentiel adiabatique, qui présente soit un maximum soit un minimum à l'endroit du croisement évité, selon l'orientation du spin atomique. Nous polarisons les atomes dans l'état de spin qui est attiré vers les régions résonnantes où se produit ce croisement évité, qui correspondent à des surfaces isomagnétiques du champ statique inhomogène. L'intérêt de ces potentiels adiabatique est que l'on peut ainsi accéder à de nombreuses géométries de piégeage, qui sont modifiables en temps réel, comme par exemple la position des surfaces résonnantes, fixées par la fréquence RF. Notre équipe a été pionnière dans ce domaine et est experte des potentiels adiabatiques depuis une dizaine d'années. J'ai récemment publié deux revues sur le sujet, issues d'un cours aux Houches ¹⁷.

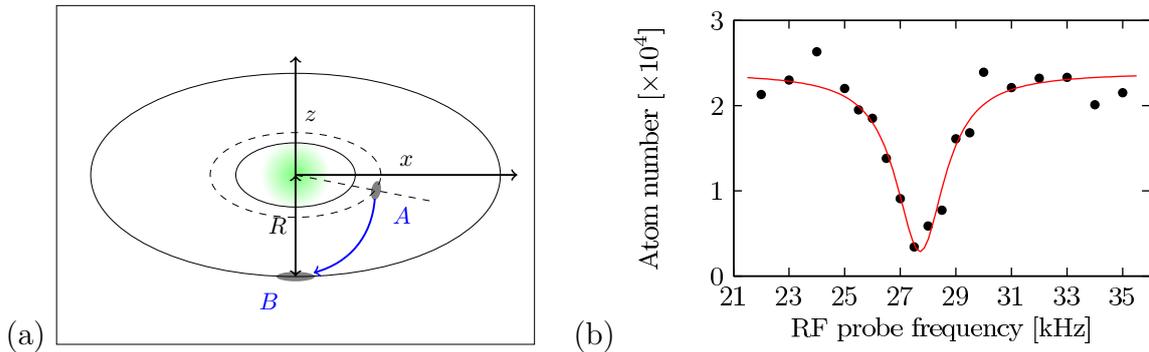


FIGURE 1: (a) Transfert des atomes depuis le piège quadrupolaire bouché (A) jusque dans le potentiel adiabatique anisotrope (B). (b) Spectroscopie dans le potentiel adiabatique. On en déduit une fréquence de Rabi égale à 27,7 kHz.

Dans l'équipe, nous confinons le gaz quantique dans un piège quadrupolaire « habillé » ¹⁸ (ce sont bien sûr les atomes qui sont habillés par le champ RF). Le champ magnétique dans lequel évoluent les atomes est nul au centre, et son amplitude croît linéairement à partir du centre. Il est invariant par rotation d'axe vertical z . Les atomes

16. O. Zobay et B. M. Garraway, Phys. Rev. Lett. **86**, 1195 (2001).

17. H. Perrin et B. Garraway, *Trapping atoms with radio-frequency adiabatic potentials*, in Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics **66** AAMOP, UK : Academic Press, 2017, pp. 181-262 ; B. Garraway et H. Perrin, *Recent developments in trapping and manipulation of atoms with adiabatic potentials*, J. Phys. B **49**, 172001 (2016) (Topical Review).

18. K. Merloti et al., New J. Phys. **15**, 033007 (2013).

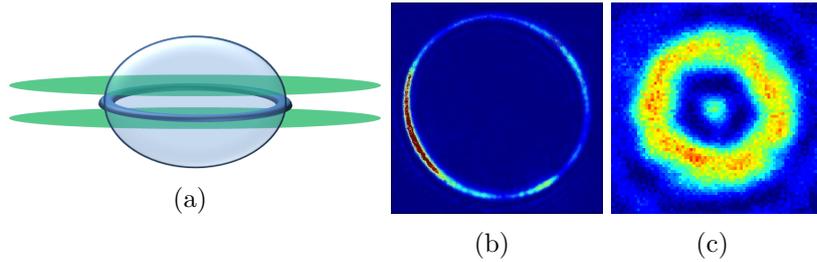


FIGURE 2: (a) Principe du piège annulaire. (b-c) Images *in situ* d'atomes confinés dans le piège annulaire, pour deux valeurs du rayon, (b) $200 \mu\text{m}$ et (c) $23 \mu\text{m}$. Le point central et les anneaux extérieurs sont dus à la diffraction. Dimensions : (b) $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, (c) $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$.

sont confinés par le champ RF de fréquence ω sur une surface isomagnétique résonnante, vérifiant $\mu B(\mathbf{r}) = \hbar\omega$: autrement dit, là où la fréquence de Larmor est égale à la fréquence RF. Pour un champ quadrupolaire d'axe vertical, cette surface est un ellipsoïde d'équation $x^2 + y^2 + 4z^2 = r_0^2$. Les atomes sont transférés dans cette « bulle à atomes » depuis le piège quadrupolaire bouché dans lequel nous avons produit le condensat jusqu'à 2022, comme le montre la figure 1(a).

Nous avons un très bon contrôle des paramètres du piège habillé : par spectroscopie RF (avec un second champ RF très faible), nous obtenons la valeur du couplage RF d'habillage à mieux que le kHz, voir figure 1(b) ; le refroidissement par évaporation (également avec un autre champ RF) fonctionne et nous donne un contrôle de la température ; nous contrôlons les fréquences d'oscillation en jouant sur la fréquence, l'amplitude et la polarisation RF ou le gradient de champ magnétique¹⁷ ; enfin, selon la polarisation du champ RF, circulaire ou linéaire, le piège possède ou non une symétrie de révolution, ce que nous avons mis à profit pour mettre les atomes en rotation. En effet tous ces paramètres peuvent être contrôlés de façon dynamique, grâce à des sources radiofréquences développées par Fabrice Wiotte à l'atelier d'électronique conjointement avec Romain Dubessy et Thomas Badr, qui fournissent un signal DDS (numérique) très peu bruité et programmable par des contrôleurs FPGA.

2.2.2 Anneau à atomes

La thèse de Camilla De Rossi avait permis à la fois des études de dynamique superfluide d'un gaz bidimensionnel au bas de la « bulle » et la démonstration de la réalisation d'un piège annulaire, obtenu par intersection entre la bulle et un plan, dans lequel les atomes sont confinés par un laser (figure 2(a)). La géométrie annulaire est en effet très bien adaptée à l'étude des courants permanents caractéristiques des superfluides. Dans le cadre de la thèse de Mathieu de Goër de Herve et grâce au financement du projet [SuperRing](#) par l'ANR, nous avons pu explorer cette thématique. J'ai coordonné ce projet de 2016 à 2019, mené en collaboration avec une équipe théorique du LPMMC à Grenoble dirigée par Anna Minguzzi.

Le piège optique qui confine les atomes à l'équateur de la bulle est réalisé avec un laser vert (à 532 nm) dans un mode TEM01 très anisotrope, qui passe à travers une lame de phase 0_π , ce qui crée la région centrale d'intensité nulle dans laquelle les atomes sont confinés (figure 2(a)). Après les premiers résultats de confinement lors de la thèse de Camilla, nous avons mis au point au cours de la thèse de Mathieu une technique de réglage des paramètres

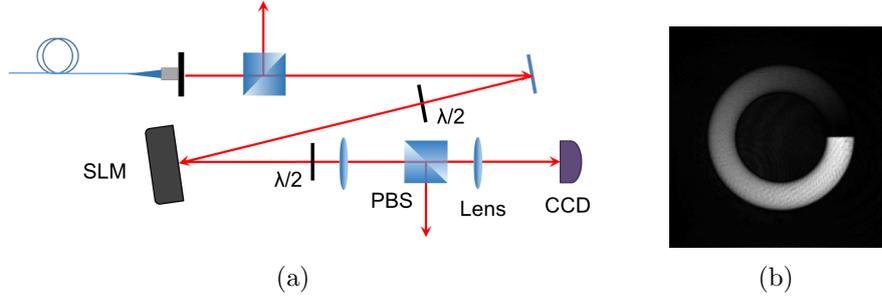


FIGURE 3: (a) Montage optique du SLM en mode « masque » : on envoie directement le profil souhaité sur ses pixels. (b) Profil d'intensité obtenu expérimentalement avec un rayon de 1.76 mm. Ce profil sera imagé sur le gaz annulaire avec un grandissement de 1/50 environ.

du laser vert et de la bulle permettant de remplir l'anneau de façon homogène (figure 2(c)), et à refroidir les atomes pour les amener dans le régime d'un gaz quantique annulaire. La géométrie de l'anneau est adaptable : il est possible de varier le rayon de l'anneau en modifiant l'altitude à laquelle la bulle est coupée ou en changeant directement le rayon de la bulle, proportionnel au champ radiofréquence et à l'inverse du gradient de champ magnétique.

Dans cet anneau, l'objectif était d'observer une dynamique superfluide, et donc de créer un courant permanent superfluide. Ce courant est quantifié — plus exactement c'est la circulation de la vitesse sur un tour qui est quantifiée et vaut $\ell h/M$ où ℓ est un entier, l'enroulement, et M est la masse des atomes. Pour un anneau de rayon r_0 , la vitesse vaut $\ell \hbar / (M r_0)$ et la fréquence de rotation $\ell \Omega_0$ avec $\Omega_0 = \hbar / (M r_0^2)$. Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre pour cela. Nous avons donc développé une série d'outils pour mettre les atomes en rotation de façon contrôlée, que l'on peut classer en deux grandes catégories : l'impression de phase (on communique l'enroulement ℓ directement) ou l'instauration d'un référentiel en rotation à la fréquence Ω (l'état fondamental étant alors un état de circulation ℓ tel que $\ell \Omega_0$ est proche de Ω).

Nous avons tout d'abord exploré la possibilité de mettre le gaz en **rotation par impression de phase**. Cette étude a démarré lors de la thèse de Camilla dans le cadre d'un projet commun avec l'équipe de Laurence Pruvost au Laboratoire Aimé Cotton, et s'est poursuivi avec l'arrivée d'Avinash Kumar, post-doc dans le cadre de l'ANR SuperRing. Thomas Badr, ingénieur de recherche de l'équipe, s'est aussi beaucoup investi dans ce projet pour la partie optique, et Romain Dubessy pour la partie théorique. L'idée est de mettre le gaz annulaire en rotation en le soumettant à une impulsion brève d'un laser dont l'intensité dépend linéairement de la coordonnée azimutale. Ce principe a été utilisé par exemple pour créer des solitons dans un gaz quantique de forme étirée¹⁹. En effet, si l'impulsion est suffisamment brève pour que les atomes ne se déplacent pas pendant sa durée, leur fonction d'onde est simplement multipliée par un nombre complexe dont la phase est proportionnelle à l'hamiltonien, et donc à l'intensité laser. On peut ainsi passer d'une phase uniforme à un enroulement de phase autour de l'anneau $\psi \rightarrow e^{i\ell\theta}\psi$ en faisant interagir très brièvement les atomes avec un potentiel d'amplitude proportionnelle à l'angle azimutal θ . Pour réaliser ce potentiel, nous avons développé un montage optique avec un modulateur de phase optique

19. J. Denschlag et al., Science **287**, 5450 (2000).

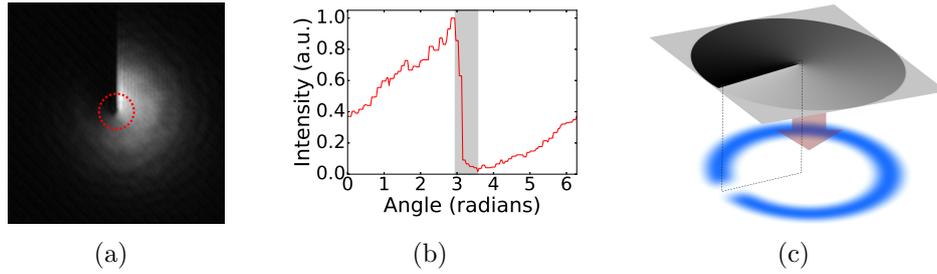


FIGURE 4: (a) Profil d'intensité hélicoïdal réaliste, obtenu avec un SLM. (b) Coupe du profil (a) à un rayon de $50 \mu\text{m}$, qui illustre le saut d'intensité imparfait. (c) Principe de l'impression de phase adaptée : pendant l'impulsion, une barrière de potentiel est placée à l'endroit où l'intensité varie très rapidement. Elle est ensuite retirée pour laisser place à l'écoulement du gaz dans l'anneau.

(acronyme anglais SLM), qui permet de réaliser des profils d'intensité lumineuse arbitraire. L'impression d'un profil d'intensité linéaire avec la coordonnée azimutale comme celui de la figure 3 devrait permettre de créer une circulation contrôlée de façon très rapide, par impulsion laser.

Avec Avinash Kumar, nous avons étudié l'effet d'un potentiel réaliste, avec une résolution optique limitée qui empêche d'avoir la véritable marche d'intensité abrupte qui serait nécessaire. Nous avons montré par des simulations de l'équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps¹¹ qu'en ajoutant une barrière de potentiel statique à l'endroit de la marche au moment de l'impulsion, voir figure 4, il était possible d'imprimer de façon contrôlée une circulation superfluide correspondant à un enroulement ℓ variant de 1 à 3. Une équipe australienne s'est inspirée de nos travaux pour réaliser une telle impression de phase avec succès²⁰, jusqu'à $\ell = 22$.

Nous avons également exploré deux variantes de la deuxième méthode qui consiste à placer les atomes dans un référentiel en rotation à la fréquence Ω . En fait, si le condensat n'est pas produit directement en refroidissant les atomes dans ce référentiel en rotation, le passage d'un état sans rotation à un état avec courant $\ell\Omega_0 \simeq \Omega$ passe par un processus d'excitation, qui dépend donc de la méthode de mise en rotation. On s'attend donc à ce que la vitesse de rotation minimale permettant d'observer un courant dépende de la façon dont on brise l'invariance par rotation pour faire tourner les atomes, et qu'elle puisse donc être bien supérieure à Ω_0 . Nous avons d'ailleurs exploré l'excitation d'un gaz annulaire dans un travail théorique précédent²¹

La première variante tire partie du contrôle dynamique que nous avons sur la bulle elle-même. Nous induisons donc une **déformation quadrupolaire** de la bulle qui sert d'ossature au piège annulaire, voir la figure 5(a-b), et faisons tourner cette déformation. Si la fréquence de rotation est suffisante, les vortex peuvent alors rentrer par les régions où la densité est plus faible. La détection de la circulation se fait après un temps de vol, ce qui donne accès à la distribution en impulsion dans l'anneau : en présence de circulation le nuage présente un trou central dont le diamètre dépend de la circulation dans l'anneau, voir figure 5(d). En l'absence de circulation, il y a au contraire un pic de densité au centre

20. Thomas Bell, *Engineering Time-Averaged Optical Potentials for Bose-Einstein Condensates*, PhD thesis (2020).

21. R. Dubessy, T. Liennard, P. Pedri, H. Perrin, *Phys. Rev. A* **86**, 011602(R) (2012).

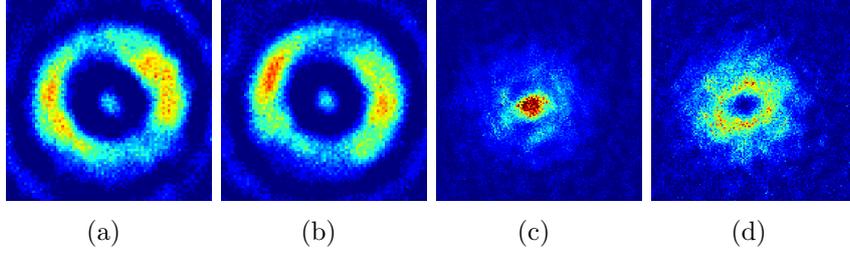


FIGURE 5: (a), (b) Déformation quadrupolaire imposée à l’anneau en modifiant la polarisation du champ radiofréquence de circulaire à elliptique, selon deux axes différents. (c) et (d) Images après temps de vol, en l’absence (c) ou en présence (d) d’une circulation superfluide dans l’anneau. Dimensions des images : (a) et (b) $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$, (c) et (d) $140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m}$.

après temps de vol, voir la figure 5(c). Cette distribution est proche de celle attendue pour un état $e^{i\ell\theta}$ dans un anneau, dont la transformée de Fourier est une fonction de Bessel $J_\ell(r)$, creusée au centre d’autant plus que ℓ est grand, sauf dans le cas $\ell = 0$ où elle est piquée au centre. Nous avons observé qu’il fallait faire tourner le nuage à au moins 7 Hz pour observer de la circulation, très au-dessus de la fréquence élémentaire $\Omega_0/2\pi = 0.22$ Hz pour cet anneau de rayon $23 \mu\text{m}$. Cette valeur bien plus élevée que Ω_0 est plutôt à comparer avec les fréquences d’excitation pour créer une excitation quadrupolaire dans l’anneau²¹, de l’ordre cette fois de la dizaine de Hz. À ces valeurs de rotation cependant, la circulation produite est déjà très élevée ($\ell > 10$), plusieurs vortex entrant de façon à réduire l’énergie et s’approcher de $\ell\Omega_0 \simeq \Omega$.

Afin d’observer une circulation avec une rotation à beaucoup plus basse fréquence, nous avons également mis en place une « **touillette** » **laser**, avec un laser focalisé se propageant dans la direction verticale et traversant le nuage. C’est cette méthode qui avait été utilisée en 1999 pour observer les premiers vortex dans le groupe de Jean Dalibard²². Avec un laser très focalisé, on s’attend à observer un passage de $\ell = 0$ à $\ell = 0$ lorsque Ω est proche de $\Omega_0/2$, avec des phénomènes d’hystérésis²³. Notre laser focalisé sur $7 \mu\text{m}$ produit une déplétion sur une large fraction d’un anneau de rayon $23 \mu\text{m}$, ce qui conduit à un mode d’excitation légèrement différent. Cependant nous avons également pu observer la création d’un courant permanent pour une fréquence de rotation un peu inférieure à Ω_0 , ce qui confirme le contrôle plus fin que ce mode d’excitation apporte par rapport à la déformation quadrupolaire quant à l’état de circulation ℓ produit. Pour observer ces circulations beaucoup plus faibles, nous avons mis au point une technique de « reconnexion » de l’anneau en un piège harmonique, en faisant remonter la bulle pour que les atomes, dont l’altitude est imposée par le laser, se retrouvent en bas. Cela donne une bien meilleure sensibilité après temps de vol pour l’observation de petites valeurs de ℓ . La figure 6 montre un histogramme de mesure de la taille du trou après temps de vol lorsque l’on augmente la vitesse de rotation de la touillette, mettant en évidence l’existence de circulation même à très basse fréquence. Des données étaient en cours d’acquisition lorsque nous avons dû fermer le laboratoire en mars 2020 pour cause de pandémie, ce qui a limité la statistique de cet histogramme. Les résultats

22. K. Madison et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 806 (2000).

23. K. C. Wright et al., PRL **110**, 025302 (2013) ; S. Eckel et al., Nature **506**, 200 (2014).

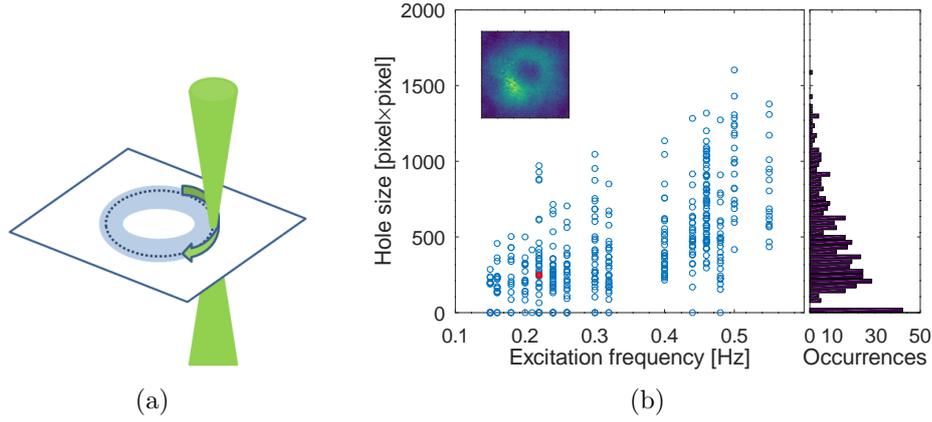


FIGURE 6: (a) Principe de la « toilette laser ». (b) Histogramme de l’aire des trous observée après temps de vol en fonction de la fréquence de rotation de la toilette. On voit bien une taille de trou caractéristique correspondant à $\ell = 1$. En insert : image typique obtenue après temps de vol montrant un trou central de densité.

sont publiés dans un article synthétisant notre travail sur le piège annulaire ²⁴.

2.2.3 Rotation rapide dans un piège anharmonique

Dans la continuation de nos études de dynamique superfluide dans la bulle ²⁵, sans nappe laser cette fois-ci, nous avons récemment étudié la rotation rapide du condensat dans la bulle, en ajustant sa forme pour l’exciter en faisant tourner une déformation quadrupolaire, puis revenir à un ellipsoïde parfaitement invariant par rotation — ce qui nécessite un réglage très fin de la polarisation RF, avec trois antennes indépendantes dont on contrôle les amplitudes et phases relatives avec un DDS (voir plus haut). Cette géométrie particulière de confinement permet d’accéder à un régime de rotation rapide du condensat, à une fréquence de rotation qui peut être supérieure à la fréquence de piégeage ω_r , à l’approximation harmonique au fond de la bulle. En raison de la force centrifuge, la force de rappel est modifiée en présence de rotation à la fréquence Ω et vaut $-M(\omega_r^2 - \Omega^2)$. Lorsque Ω excède ω_r , la courbure du potentiel au fond de la bulle s’inverse. Cependant, les atomes restent confinés par les parois latérales de la bulle, alors qu’un trou central se forme. Ce régime est notamment intéressant pour la recherche d’un analogue à l’effet Hall quantique fractionnaire ²⁶ et la mise en évidence d’états exotiques présentant un vortex géant au centre ²⁷. Il a été exploré par exemple dans le groupe de Jean Dalibard ²⁸ avec un potentiel anharmonique permettant de tourner au-delà de ω_r . Ce groupe a observé une réduction de la densité au centre, signe d’une inversion de courbure, sans que la densité centrale ne s’annule.

Dans notre expérience, grâce au très bon contrôle du potentiel, nous avons pu mettre en évidence la formation d’un « anneau dynamique », avec une déplétion totale des atomes au centre, qui se forment après une dynamique complexe, voir la figure 7. Dans un premier

24. M. de Goër de Herve et al., *J. Phys. B* **54**, 125302 (2021)

25. R. Dubessy et al., *New J. Phys.* **16**, 122001 (2014); C. De Rossi et al. *NJP* **18**, 062001 (2016).

26. B. Paredes, P. Fedichev, J. I. Cirac et P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 010402 (2001).

27. A. Aftalion et I. Danaïla, *Phys. Rev. A* **69**, 033608 (2004).

28. V. Bretin, S. Stock, Y. Seurin et J. Dalibard, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 050403 (2004).

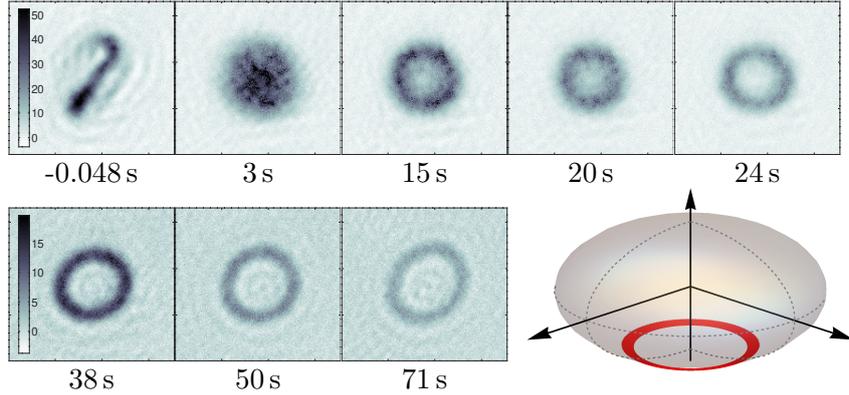


FIGURE 7: *Évolution du nuage atomique in situ dans la bulle, vu de dessus. $t = 0$ correspond à la fin de l'excitation. Un creux se forme vers 20 s, et devient un véritable anneau à $t = 24$ s, après la rampe d'évaporation. En bas à droite : schéma représentant l'anneau dynamique dans la bulle.*

temps, la densité au centre est réduite sans s'annuler. Nous baissons alors la fréquence RF du « couteau » qui permet de refroidir les atomes par évaporation. En raison des inhomogénéités de couplage RF le long de la bulle, l'évaporation est plus efficace au centre que sur la périphérie. Les atomes de moment cinétique plus faible sont donc éliminés plus efficacement que ceux de moment cinétique élevés qui ne passent pas par le centre, ce qui accélère la rotation et permet d'atteindre le régime de l'anneau dynamique : un gaz très froid, de forme annulaire, en rotation très rapide jusqu'à une vingtaine de fois la vitesse du son dans le gaz¹⁰. Même s'ils sont indétectables à l'échelle de notre résolution optique, on s'attend à ce qu'un réseau de vortex soit présent dans l'épaisseur de l'anneau, voir la figure 8(a).

Cet état très fortement hors équilibre préfigure l'état de « vortex géant » attendu à rotation encore plus élevée ou lorsque le nombre d'atomes est plus faible : les vortex doivent alors tous quitter l'épaisseur de l'anneau pour rejoindre le centre, et le gaz en rotation devient bidimensionnel. Romain Dubessy a montré dans une simulation que nous devrions être dans ce cas si le nombre d'atomes est réduit à 400 dans notre expérience, voir la figure 8(b). Cependant pour le moment un tel nombre n'est pas détectable par notre système d'imagerie.

Enfin, nous avons exploré les modes collectifs de ce gaz en rotation. Des prédictions de Cozzini et al.²⁹ indiquent qu'il doit exister, comme pour un gaz non trou (connecté) dans un piège harmonique, deux modes quadrupolaires dont la fréquence dépend de la rotation. Dans un gaz connecté, ces modes Ω_{\pm} peuvent être utilisés pour mesurer la fréquence de rotation du gaz³⁰ car ils vérifient $\Omega_{+} - \Omega_{-} = 2\Omega$. L'un (Ω_{+}) correspond à une déformation elliptique qui tourne dans le même sens que le gaz, et sa fréquence augmente avec Ω . L'autre (Ω_{-}) correspond à une déformation elliptique qui tourne dans le sens opposé, et sa fréquence diminue avec Ω , jusqu'à être quasi nulle lorsque le trou se forme. Cependant, Cozzini et al. prédisent que même après la formation du trou, le sens de rotation des deux

29. M. Cozzini et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 100402 (2005).

30. V. Bretin et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 050403 (2004).

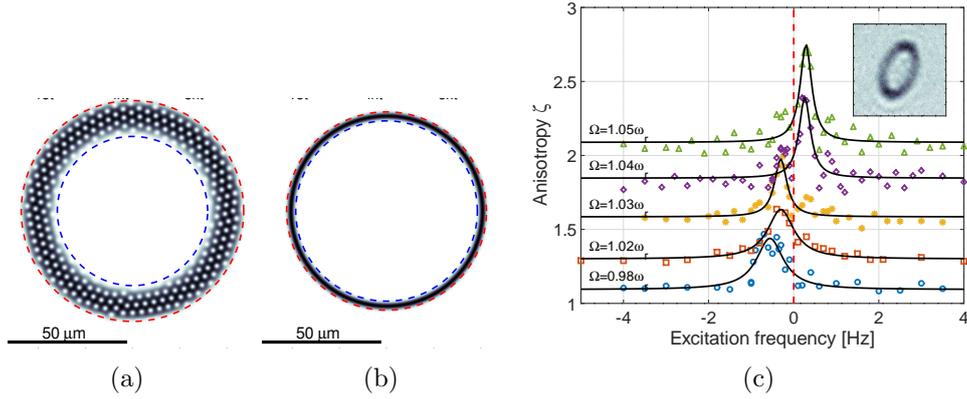


FIGURE 8: (a-b) Simulation de la densité in situ dans l'anneau dynamique, pour $\Omega = 1.06\omega_r$. On indique la circulation à l'intérieur des pointillés bleus C_{int} et rouges C_{tot} . (a) $C_{\text{int}} = 298 \hbar/M$, $C_{\text{tot}} = 540 \hbar/M$, $N = 10^5$ atomes. (b) $C_{\text{int}} = C_{\text{tot}} = 434 \hbar/M$, $N = 400$ atomes. (c) Excitation résonnante du mode quadrupolaire dans l'anneau dynamique. La fréquence du mode change de signe lorsque le trou se forme, c'est-à-dire que la déformation tourne en sens inverse.

modes doit toujours être opposé. Ce n'est pas ce que nous avons observé dans l'expérience en sondant le mode par excitation résonnante, voir la figure 8(c) : le signe de la fréquence résonnante Ω_- change, ce qui signifie que la déformation tourne à présent dans le même sens que le flux d'atomes. Cette observation reste à ce jour inexpliquée par la théorie. Ces résultats sont parus début 2020 dans Phys. Rev. Lett.¹⁰ L'article a été mis en avant par APS en tant qu'Editors's suggestion et par un Synopsis dans Physics³¹, ainsi que par l'INP via une brève reprise dans les Reflets de la physique, la revue de la SFP.

2.2.4 Rotation modérée : fonte du réseau de vortex

Plus récemment, nous avons repris des mesures ébauchées au cours de la thèse de Mathieu de Goër lorsque que le superfluide est en rotation modérée au bas de la bulle et qu'un réseau de vortex se développe. Ce réseau, en général triangulaire (réseau d'Abrikosov), est attendu dans l'état fondamental, à température nulle. Il subsiste à température non nulle mais bien inférieure à la température de transition superfluide. Nous nous sommes posés la question de la robustesse de la structure cristalline lorsque la vitesse de rotation augmente. En effet, des excitations de grande longueur d'onde ont été observées dans ces réseaux³², et on peut se poser la question de la température de fusion du cristal vers un état où les vortex sont libres (liquide de vortex). Ce problème a été étudié par Gifford et Baym³³, qui estiment la température de transition T_m (en gardant à l'esprit que ce sont plutôt des crossover car les systèmes sont de petite taille). Dans le cas des expériences du groupe de Cornell, cette température était très proche de la température de transition, de sorte que le réseau était toujours cristallisé. Dans notre piège où le nuage est très aplati même en l'absence de rotation, la température de fusion serait plutôt de l'ordre de $T_m/10$, ce qui

31. <https://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.124.025301>

32. V. Schweikhard et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 040404 (2004).

33. S. A. Gifford et G. Baym, Phys. Rev. A **78**, 043607 (2008).

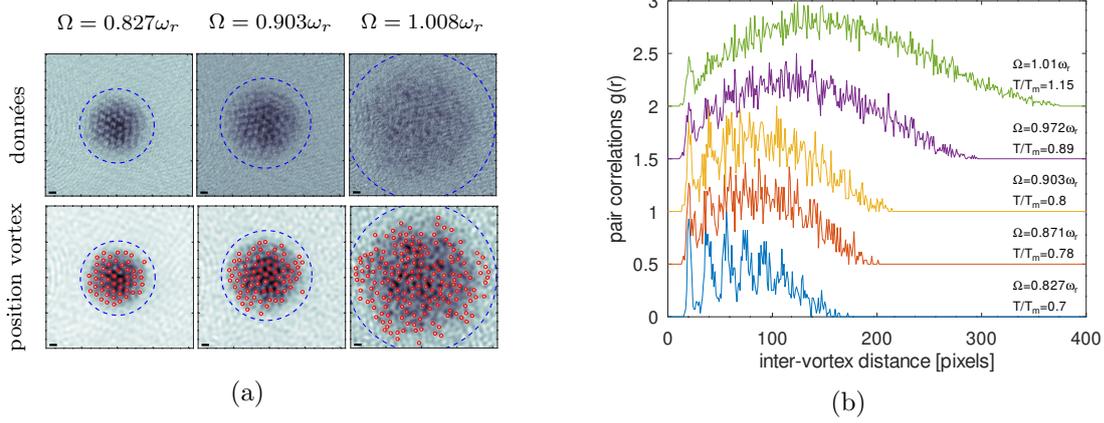


FIGURE 9: *Fonte du réseau de vortex lorsque la fréquence de rotation augmente. (a) En haut, images de la densité intégrée du nuage en rotation (après temps de vol) pour trois valeurs de la fréquence de rotation, donnée en haut en unité de la fréquence d'oscillation radiale, et qui correspond aux courbes bleue, orange et verte de (b). En bas, résultat de la procédure de localisation automatique des vortex. (b) Analyse de la positions des vortex : on calcule la probabilité de trouver un vortex à une distance r d'un vortex donné. Chaque courbe correspond à une fréquence de rotation différente. À faible rotation (bleu), les pics parqués sont la signature d'une structure cristalline, qui disparaît quand la rotation augmente.*

permet d'accéder au régime du liquide de vortex.

Nous avons pris un grand nombre de données avec différentes valeurs de fréquence de rotation et nombre d'atomes, à température fixe $T \simeq 20$ nK. Varier la fréquence de rotation à température fixe permet en effet de faire varier T/T_m : le potentiel centrifuge déforme le piège quand la rotation augmente, réduisant toutes les échelles d'énergie et en particulier T_m , de sorte que le rapport T/T_m augmente même si T est fixe. Nous observons (figure 9(a)) que l'organisation des vortex en réseau triangulaire est perdue lorsque la vitesse de rotation dépasse environ $0.9\omega_r$ où ω_r est la fréquence de confinement radiale au bas de la bulle. Pour analyser ce phénomène de façon plus quantitative, nous avons appliqué une procédure de détection automatique de la position des vortex développée par l'équipe de Simon Cornish³⁴ et nous avons calculé les corrélations entre les positions des vortex. La figure 9(b) montre l'évolution de $g(r)$, la probabilité de trouver un vortex à la distance r d'un vortex donné. Dans un réseau triangulaire, on s'attend à des pics réguliers, le premier étant au pas du réseau, avec une enveloppe caractéristique de la taille totale du nuage (courbe bleue). Plus la fréquence de rotation augmente, moins les pics sont nets, traduisant la fonte du réseau. La température (ou la rotation) à laquelle cela se produit est compatible avec les prédictions de Gifford et Baym. J'ai présenté ces résultats dans un exposé oral à EGAS et un poster à BEC. Un article est en préparation sur ce sujet.

2.2.5 Bulle en microgravité

En relation avec ces expériences, nous avons démarré une collaboration avec Vanderlei Bagnato sur la turbulence dans les fluides quantiques. Vanderlei Bagnato est particulièrement intéressé par la possibilité, avec notre système, de réaliser un piège ayant la

34. A. Rakonjac et al., Phys. Rev. A **93**, 013607 (2016).

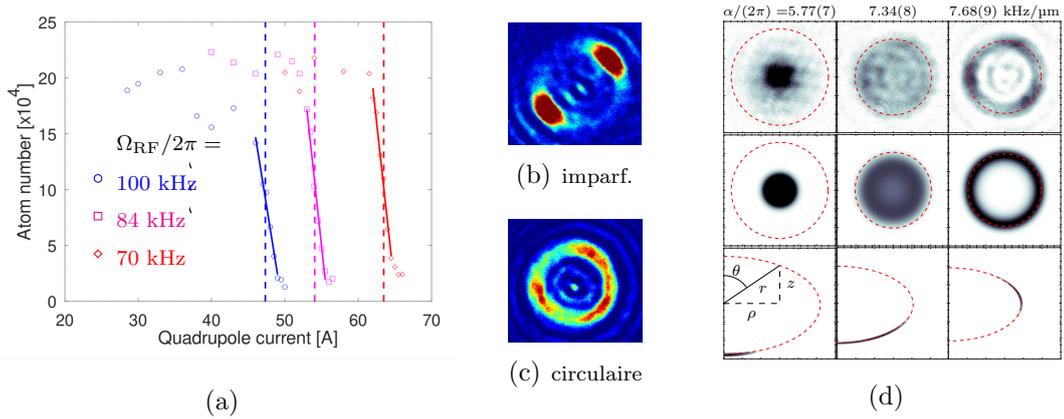


FIGURE 10: (a) Observation du seuil permettant de compenser la gravité dans la bulle. Pour trois valeurs du couplage $RF \Omega_{RF}$, on fait varier le courant qui crée le champ magnétique quadrupolaire (et donc r_0). Au-delà d'un courant critique, les atomes sont poussés vers le haut de la bulle et leur nombre décroît sensiblement. (b-c) Vue de dessus des atomes dans la bulle : ils restent en fait proches de l'équateur. (b) Lorsque la polarisation RF n'est pas parfaitement circulaire, l'invariance par rotation est brisée et les atomes s'accumulent en deux points opposés de l'équateur. (c) Un réglage fin de la polarisation permet de répartir les atomes sur toute la circonférence, légèrement au-dessus de l'équateur. La modulation de densité résiduelle est due à l'inhomogénéité du champ radiofréquence au niveau de 1% à l'échelle de la bulle. (d) Comparaison entre l'image expérimentale de la densité dans la bulle vue de dessus (en haut) et la simulation numérique de l'équation GP , en projection selon l'axe vertical (au milieu) ou horizontal (en bas), pour trois valeurs du gradient de champ magnétique, correspondant de gauche à droite à $Mgr_0 > \hbar\Omega_1$, $Mgr_0 \simeq \hbar\Omega_1$ et $Mgr_0 < \hbar\Omega_1$. Les atomes remontent les parois de la bulle et s'accumulent à l'équateur quand la gravité est (sur)compensée.

topologie d'une sphère. C'est un aspect que nous avons aussi discuté avec Maxim Olshanii, collaborateur de longue date de l'équipe : si la surface de la bulle est entièrement recouverte d'un gaz quantique, les vortex iront toujours par paires, ou si l'on préfère une ligne de vortex entrant dans la bulle doit en ressortir, ce qui conduit à des paires de vortex-antivortex si l'on oriente le sens de circulation par rapport à la normale à la surface. Un projet de bulle RF dans l'espace est d'ailleurs lancé par la NASA dans l'ISS.

Sans aller jusque là, nous nous sommes demandés comment compenser la gravité sur Terre pour remplir entièrement la bulle. Il se trouve qu'avec une polarisation RF circulaire pour l'habillage, le couplage RF n'est pas homogène sur la surface, il décroît linéairement avec z pour s'annuler au sommet : $\Omega_{RF} = \Omega_1(1/2 - z/r_0)$. Par ailleurs, les atomes sur la surface voient un potentiel proportionnel au couplage. Comme le potentiel gravitationnel est proportionnel à z , il suffit de bien choisir le couplage maximal Ω_1 au bas de la bulle et le rayon r_0 de l'ellipsoïde pour avoir $Mgr_0 = \hbar\Omega_1$ et compenser la gravité par le gradient de couplage ! Des premières expériences menées avec Emmanuel Mercado, un étudiant de Vanderlei Bagnato (Université de São Paulo) venu deux semaines fin 2019 dans le cadre de notre projet COFECUB-USP ont permis de tester l'idée. Nous avons d'abord déterminé la condition de compensation de la gravité, observée par une perte d'atomes, voir la figure 10(a).

Comme souvent, la situation réelle est plus compliquée que l'idée de base : comme la gravité est compensée, les atomes deviennent sensibles à de toutes petites variations

du potentiel. Le réglage de la polarisation devient extrêmement critique, et des variations faibles de couplage RF induisent les atomes à se rassembler au voisinage de l'équateur de la bulle, figure 10(b-c). La polarisation RF devient ultra sensible. Lorsqu'elle est parfaitement circulaire, voir figure 10, nous pouvons réaliser une fois de plus un anneau! En fait c'est l'énergie de point zéro du piège dans l'épaisseur de la bulle qui devient très grande quand on s'approche du sommet et qui forme une barrière de potentiel empêchant les atomes de l'atteindre lorsque le gradient de couplage excède la gravité. Avec Romain Dubessy nous avons développé une interprétation théorique des résultats expérimentaux, vérifiée par des simulations numériques poussées effectuées par Romain et prenant en compte les termes au-delà de l'approximation du champ tournant (RWA) dans le calcul du potentiel. L'accord est très satisfaisant avec les données expérimentales, confirmant notre interprétation : une fois la gravité compensée, l'énergie qui domine est l'énergie de point zéro du confinement transverse à la bulle, qui présente un minimum proche de l'équateur, là où le gradient de champ magnétique est minimum (l'axe du quadrupole est vertical). On peut aussi voir ce phénomène comme une autre méthode pour réaliser un anneau d'atomes par des moyens purement magnétiques. Ces résultats ont fait l'objet d'un article en collaboration avec l'équipe brésilienne³⁵.

2.2.6 Améliorations apportées à l'expérience Rubidium

Au cours de la thèse de David Rey et actuellement pendant la thèse de Rishabh Sharma, nous avons apporté des améliorations à l'expérience pour la fiabiliser et aller vers une prise automatique des données. David Rey a mis en place de nouvelles cartes d'acquisitions (PXI) qui soient plus indépendantes de l'ordinateur de contrôle, pour éviter les problèmes d'obsolescence. À cette occasion, il a également changé le programme de contrôle de la séquence expérimentale, que j'avais mis en place il y a plus de vingt ans à mon arrivée au laboratoire, pour un programme Labscript en open source, écrit en Python, développé par des collègues australiens. Ce programme permet d'intégrer dans le même outil le contrôle des cartes de pilotage à la microseconde, l'acquisition des données par les caméras et le traitement des images. Il comporte également une option pour optimiser un signal de façon automatique. David a fait des premiers tests de ce module en 2022. Simon Thomas, actuellement en post-doc dans l'équipe, est chargé d'améliorer l'ergonomie du programme, et si le temps le permet de mettre en place des contrôles automatiques de l'expérience pour un fonctionnement en autonomie.

Par ailleurs, avec Rishabh et Simon nous avons remplacé le laser à 532 nm qui permettait de produire le condensat dans un piège quadrupolaire bouché (voir figure 1(a)) par un laser à 1064 nm, dont le rôle est au contraire d'éloigner les atomes du zéro de champ magnétique, voir figure 11(a). Cela a permis de réduire les excitations résiduelles du centre de masse près transfert dans la bulle par rapport au montage précédent, voir figure 11(b). Un article — dédié à la mémoire de Claudine Hermann — présente ces améliorations³⁶.

35. Y. Guo et al., *New J. Phys.* **24**, 093040 (2022).

36. D. Rey et al., *J. Appl. Phys.* **132**, 214401 (2022).

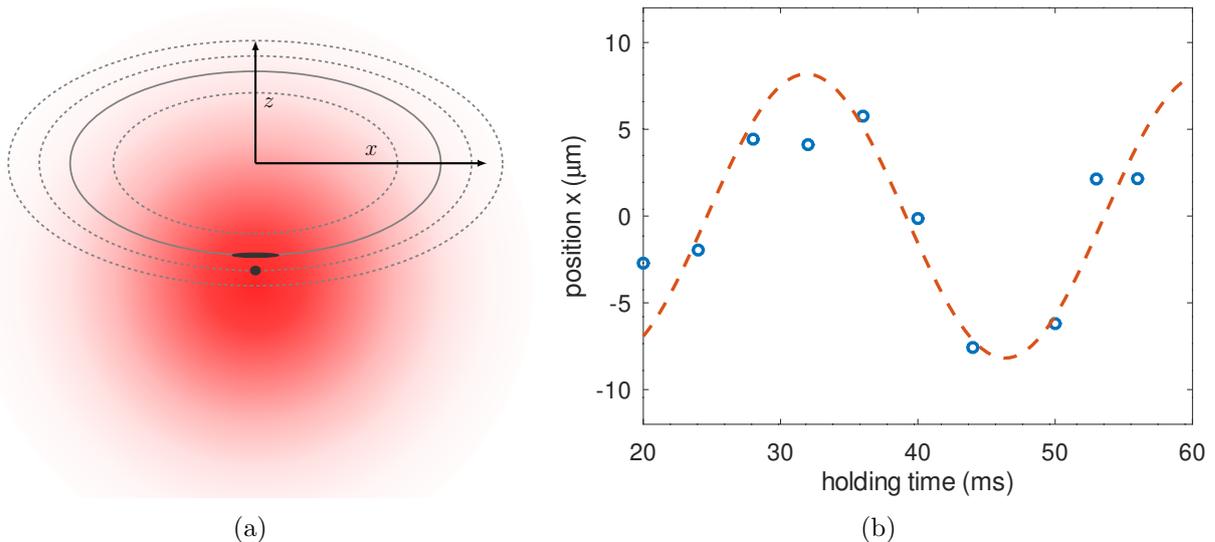


FIGURE 11: *Condensation de Bose-Einstein avec le nouveau dispositif. (a) Schéma de principe. (a) Le laser attire les atomes en dessous du zéro de champ. On transfère les atomes depuis le centre du piège hybride (point noir) vers le bas de la bulle (ellipse noire). (b) Oscillations résiduelles au fond de la bulle après transfert depuis le piège hybride. L’amplitude de $8 \mu\text{m}$ après temps de vol correspond à une amplitude de $1.6 \mu\text{m}$ in situ.*

2.3 Expérience Sodium : un gaz 1D sur une puce à atomes

Nous avons démarré fin 2013 une deuxième expérience. Ce projet est également consacré à la dynamique des gaz quantiques, thème principal de l’équipe, en se focalisant cette fois sur les gaz unidimensionnels, leurs excitations élémentaires (qui présentent une branche spécifique aux gaz unidimensionnels où les excitations sont des solitons) ainsi que leur dynamique hors équilibre. Les atomes de sodium sont confinés sur une puce à atomes comprenant un guide d’onde micro-onde, avec comme objectif d’exciter une résonance de Feshbach micro-onde encore jamais observée³⁷ et, si les conditions sont favorables, de l’utiliser pour contrôler les interactions entre atomes.

Cette activité a été lancée essentiellement par Aurélien Perrin. Je suis son avancement, participe aux discussions et à la rédaction des articles et encadre les étudiants, notamment lors des phases de préparations d’exposés et de la rédaction de la thèse. Depuis 2020, je me suis investie davantage dans le suivi scientifique et organisationnel : organisation du travail, de réunions régulières, encadrement de la doctorante, propositions de stratégies scientifiques. J’ai participé activement en 2020 à la rédaction d’une ANR autour de cette expérience, coordonnée par Patrizia Vignolo, en collaboration avec Quentin Glorieux et ma collaboratrice de longue date Anna Minguzzi. L’ANR a finalement été resoumise et acceptée en 2021, sous le nom Quantum-SOPHA. Aurélien Perrin en est le coordinateur local. L’idée en est entre autres de tester nos prédictions théoriques sur l’impression de phase (voir §2.4) avec le gaz unidimensionnel qui sera produit par le montage. Je décrirai ici dans les grandes lignes les avancées récentes que nous avons obtenues avec cette expérience.

37. D. J. Papoular, G. V. Shlyapnikov, J. Dalibard, Phys. Rev. A **81**, 041603 (2010).

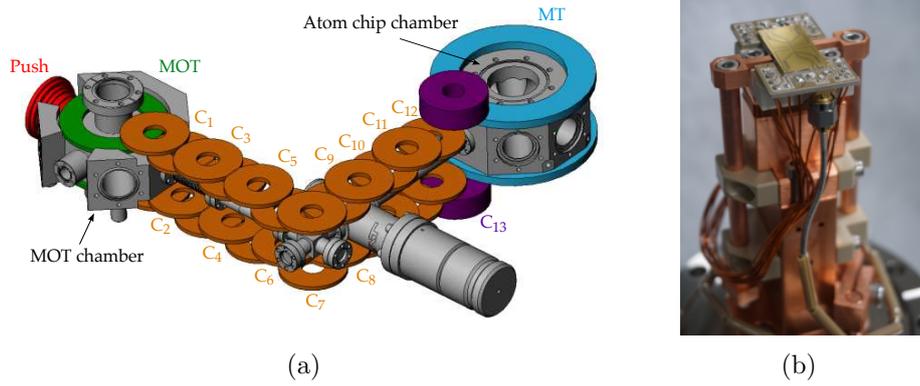


FIGURE 12: (a) Ensemble des bobines produisant le champ magnétique qui permet de transporter les atomes de l'enceinte du MOT à l'enceinte de la puce. (b) La puce à atomes sur sa monture. On distingue sous la puce, à droite et à gauche, les extrémités du fil de cuivre en Z.

2.3.1 Montage expérimental

Le montage a été dessiné par Aurélien, et une grosse partie de sa mise en œuvre a fait l'objet des thèses de Dany Ben Ali, soutenue en mai 2016, et de Joseph Seaward, soutenue en novembre 2020.

Dans cette expérience, la source d'atomes provient d'un ralentisseur Zeeman à aimants permanents d'un mètre de long³⁸. Les atomes sont ensuite capturés dans une enceinte octogonale par les six faisceaux d'un piège magnéto-optique (la partie la plus à gauche de la figure 12(a)). De là, ils sont chargés dans un piège magnétique quadrupolaire produit avec les bobines du MOT, puis transportés magnétiquement³⁹ en faisant varier dans le temps les courants traversant une série de treize bobines successives, voir la figure 12(a). Ils doivent à la fin du transport atteindre la dernière enceinte qui contient la puce à atomes. Le transport magnétique fonctionne très bien, et les tests ont montré que nous pouvons transporter efficacement les atomes en moins d'une seconde sans échauffement notable. Nous avons publié une étude détaillée de cette optimisation du transport³⁹. Thomas Badr, ingénieur de recherche de l'équipe et premier auteur du papier, a contribué de façon essentielle au design du transport magnétique.

En parallèle, la puce à atomes a été réalisée en collaboration avec l'université technique de Vienne (TU Wien). La monture de puce a été conçue et assemblée par Thomas Badr, voir la figure 12(b). Lors de l'année 2019, nous avons placé la puce sous ultra-vide, non sans avoir dû changer des joints de hublots qui présentaient des fuites. Tout était en place le 10 mars 2020, juste avant le confinement. Il nous restait alors à transférer les atomes vers le micro-piège produit par une puce à atomes. Une étude théorique de ce transfert a été réalisée par Manon Ballu au cours de son stage de M2, pendant le confinement.

38. D. Ben Ali et al., *J. Phys. B* **50**, 055008 (2017).

39. T. Badr et al., *Appl. Phys. B* **125**, 102 (2019).

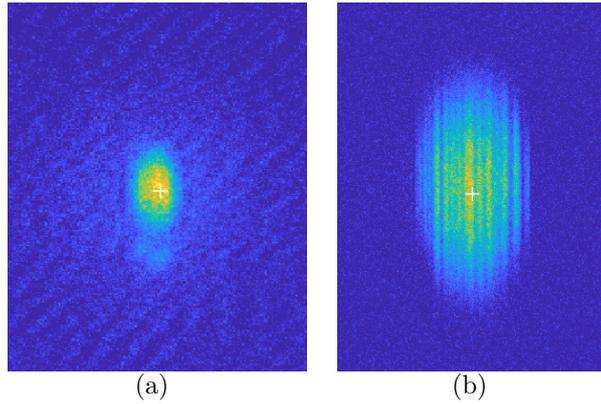


FIGURE 13: (a) Première image du condensat de Bose-Einstein produit dans la puce, imagé après un temps de vol de 10 ms. (b) Dans le régime où le gaz est très allongé selon x , les fluctuations de phase se traduisent après expansion par des fluctuations de densité dans la direction x .

2.3.2 Obtention d'un condensat de Bose-Einstein

L'arrêt de l'expérience a nécessité une phase de réalignement de la chaîne laser au retour au laboratoire. Au cours des 18 premiers mois de sa thèse, Manon Ballu a pris l'expérience en main et réussi à transférer les atomes vers l'enceinte de la puce, puis à les comprimer et rendre le nuage plus allongé grâce au fil de cuivre intermédiaire en forme de Z placé sous la puce. La dernière étape de transfert vers le micropiège créé par les fils de la puce n'a cependant pas permis de transférer suffisamment d'atomes. Nous nous sommes aperçus que le fil en Z était trop loin sous la surface de la puce, de sorte que le gradient de champ magnétique produit était trop faible et ne permettait pas de comprimer et refroidir suffisamment les atomes. Il nous a fallu casser le vide pour changer ce fil, et mettre une nouvelle puce puisque celle-ci est collée au fil. Cela a retardé de presque un an le transfert des atomes dans le piège de la puce, temps que nous avons mis à profit pour lancer une étude numérique de l'excitation du gaz 1D vers un régime turbulent, voir le paragraphe 2.4.4. Nous avons également prolongé la thèse de Manon d'un an pour lui permettre d'aller au bout de son projet.

Avec le dispositif corrigé, Manon a réussi à obtenir un condensat de sodium début janvier 2023, voir figure 13(a). Le nombre d'atomes condensés est très important et peut atteindre 10^6 , ce qui est favorisé par les faibles pertes à trois corps du sodium. Avec ce nombre d'atomes, le condensat est tridimensionnel mais très allongé. Lorsque l'on réduit le nombre d'atomes, on peut atteindre le régime unidimensionnel. La situation est donc idéale pour étudier le crossover 1D-3D. Manon et Aurélien ont pris des données dans les différents régimes et Aurélien a entrepris d'en faire l'analyse pour établir les meilleurs protocoles de mesure de la température dans cette situation intermédiaire. Dans ce régime, les fluctuations de phase dans la direction longue du condensat conduisent à une auto-interférence lors de l'expansion du gaz en temps de vol. Cela se traduit par des franges aléatoires, voir figure 13(b). L'une des méthodes de mesure de la température⁴⁰ repose justement sur la caractérisation de ces franges, qui sont plus nombreuses à température plus élevée.

40. A. Imambekov et al., Phys. Rev. A **80**, 033604 (2009) ; M. Schemmer et al., PRA **98**, 043604 (2018).

2.3.3 Résonance moléculaire

Après avoir caractérisé le condensat et le piège de la puce en fonction des différents courants passant à travers les microfils, nous avons démarré la recherche de la résonance de Feshbach micro-onde prédite en 2010³⁷, voir figure 14(a). La résonance est a priori très étroite (quelques kHz), avec une largeur qui dépend du carré de l'amplitude micro-onde, d'où l'importance d'accéder à des champs élevés grâce au guide situé sur la puce. Une étude similaire vient d'être publiée⁴¹ sur le rubidium par l'équipe de Jérôme Beugnon au LKB, avec des amplitudes de champ très faibles permettant de créer des molécules par photoassociation mais ne permettant pas d'espérer une modification de la longueur de diffusion. Nous avons échangé avec le groupe d'Olivier Dulieu au LAC pour essayer de localiser au mieux la résonance moléculaire correspondant au transfert de deux atomes initialement dans $F = 1$ vers un état moléculaire où l'un des spins est retourné. La résonance est située environ 200 MHz en dessous de la transition hyperfine atomique à 1.77 GHz. L'équipe du LAC nous a donné une estimation de la position de la résonance à 10 MHz près à partir de la bibliographie.

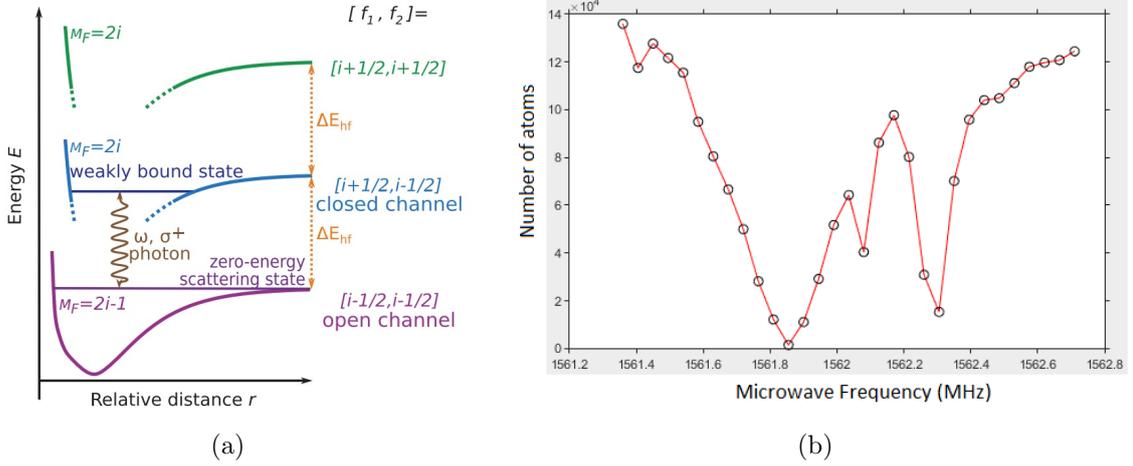


FIGURE 14: (a) Résonance de Feshbach micro-onde, figure extraite de [37]. On excite la résonance d'un état libre à deux atomes (courbe violette) vers un état lié moléculaire (courbe bleue), avec un photon de fréquence inférieure à la fréquence hyperfine. (b) Pertes d'atomes en fonction de la fréquence micro-onde. Les molécules formées à partir des paires quittent le piège, provoquant une perte d'atomes signature de la résonance. Les trois résonances correspondent à des transitions avec trois polarisations différentes de la micro-onde (σ^+ , σ^- , π), toutes présentes dans le champ.

Il peut y avoir aussi des bonnes surprises en physique expérimentales. Avec les amplitudes de champ micro-ondes très élevées qui nous sont accessibles (supérieures au gauss), Manon a détecté la résonance moléculaire très rapidement. On observe trois ou quatre résonances, identifiées par Aurélien, selon le spin de l'état moléculaire couplé à la paire d'atomes initialement dans $F = 1, m = -1$, voir figure 14(b). Comme dans le cas de l'expérience du LKB, les largeurs observées sont plus grandes que celles prédites. À ce stade, nous avons observé la production de molécules par photoassociation. Pour utiliser la

41. C. Maury et al., Phys. Rev. Research **5**, L012020.

résonance de Feshbach, il faut travailler un peu hors résonance (pour réduire les pertes) et chercher une modification des propriétés de collisions et donc de la longueur de diffusion. Cela reste à faire mais ces premiers résultats et l'intensité du couplage sont très prometteurs. Aurélien a obtenu une ANR internationale MICO3 avec Thorsten Schumm (TUW, Vienne, Autriche), dans laquelle je suis impliquée, pour explorer avec lui ces résonances. Nos expériences sont complémentaires puisque Thorsten travaille avec l'atome de césium, pour lequel la résonance attendue est encore plus large.

2.4 Activité théorique

J'ai noué depuis plusieurs années des collaborations avec des théoriciens. Je travaille ainsi régulièrement avec Maxim Olshanii, de l'université de Boston, Barry Garraway, de l'université du Sussex à Brighton, et Paolo Pedri, de l'équipe Gaz Quantiques Magnétiques du LPL. De plus, le projet ANR SuperRing que nous avons obtenu avec Anna Minguzzi du LPMC (Grenoble) nous a permis de démarrer une collaboration très fructueuse, et nous avons menés ensemble plusieurs projets théoriques en lien avec nos intérêts expérimentaux.

2.4.1 Bosons corrélés dans un anneau

En collaboration avec Anna Minguzzi, Luigi Amico qui était professeur invité à Grenoble, et Maxim Olshanii, nous avons étudié un gaz quantique annulaire avec interaction attractives sur un anneau. D'ordinaire et notamment dans le cas d'interactions répulsives, ou dans le régime de champ moyen, lorsqu'on place le système dans un référentiel en rotation, chaque atome voit son moment cinétique s'accroître de \hbar en même temps que les autres, de sorte que le moment cinétique total augmente par pas de $N\hbar$ pour N atomes. Or, dans le cas d'un gaz avec interactions attractives, le moment cinétique *total* augmente par pas de \hbar pour l'ensemble du gaz à cause des corrélations, les atomes formant un soliton impliquant l'ensemble des particules, voir la figure 15(a). Si l'on peut mesurer le moment cinétique par particule, celui-ci progresse donc par pas bien plus fins de \hbar/N lorsque Ω augmente. Lorsque les interactions sont plus faibles, les marches deviennent irrégulières, figure 15(b), et on retrouve les marches de \hbar à $(n+1/2)\Omega_0$ lorsqu'elles s'annulent, figure 15(c). Cette effet de quantification à \hbar/N est totalement absent pour des interactions répulsives ($g > 0$, figure 15(c)). Nous avons étudié comment cela pourrait être une application des technologies quantiques aux mesures de rotation⁴². La diagonalisation exacte a été faite par Piero Naldesi, ma contribution a été de proposer un protocole de mesure.

2.4.2 Dissipation d'un courant dans un anneau en présence de barrière

Nous avons vu au §2.2.2 que l'on pouvait mettre les atomes en rotation par impression de phase, ce qui multiplie la fonction d'onde du condensat par $e^{i\ell\theta}$. Une fois le courant établi, on peut étudier les mécanismes de dissipation, en particulier lorsque l'on brise l'invariance par rotation en ajoutant une barrière de potentiel, qui expérimentalement peut être réalisée au moyen d'un faisceau laser focalisé (comme pour la touillette). Nous avons donc étudié le problème suivant, qui est directement lié à l'étude expérimentale et numérique de l'impression de phase : l'évolution d'un gaz annulaire dans le cas où la barrière de po-

42. P. Naldesi et al., [SciPost Phys.](#) **12**, 138 (2022).

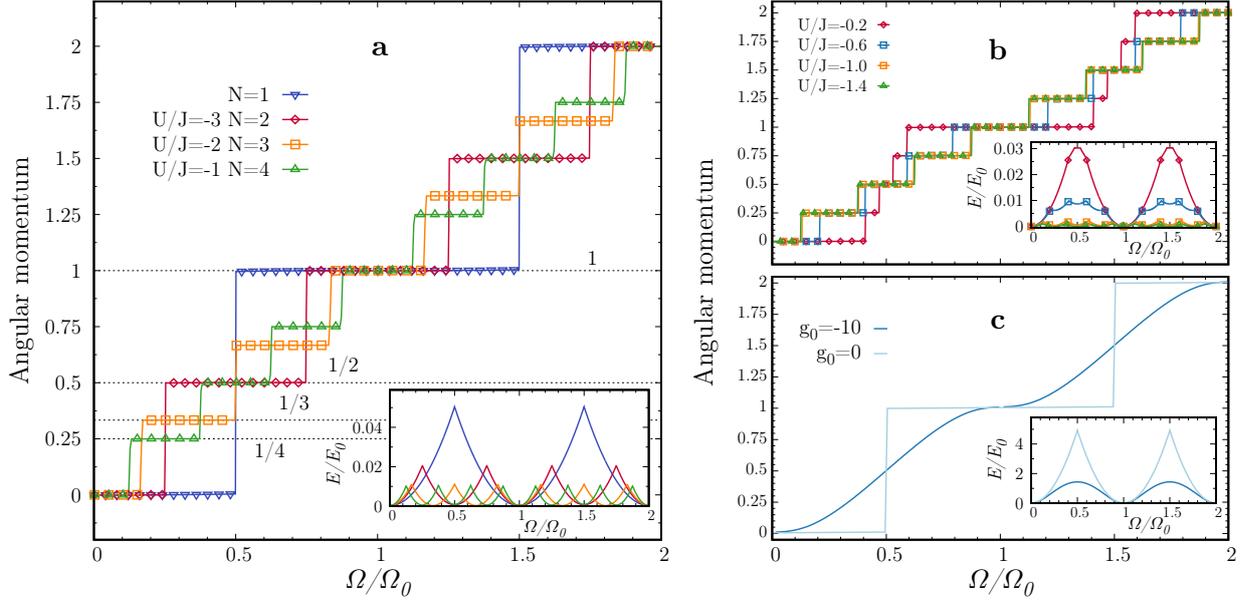


FIGURE 15: (a) Moment cinétique par particule pour des interactions attractives $U < 0$ et un nombre d'atomes N allant de 1 à 4. Lorsque Ω augmente, le moment cinétique croît par pas de \hbar/N . (b) Pour des interactions attractives plus faibles, les marches sont inégales et l'allure générale se rapproche du cas $U = 0$. (c) Comportement pour des interactions nulles ($g = 0$, bleu clair) : la quantification est à \hbar ; dans le régime GP ($g = 10$), la quantification disparaît progressivement.

tentiel est présente dès le début, lorsque la fonction d'onde est multipliée brutalement par $e^{i\theta}$, ce qui produit un courant unitaire (à la vitesse $\Omega_0 r_0$), voir figure 16(a). On s'attend donc, en fonction de l'amplitude de la barrière, à coupler le système à d'autres états de circulation, voir figure 16(b), voire à observer des oscillations de courant à faible barrière ou des ondes de chocs pour une barrière élevée. Nous nous sommes placés dans le cas d'un gaz unidimensionnel, pour lequel des théories analytiques existent, dans les régimes allant des interactions faibles (régime de champ moyen ou Gross-Pitaevskii, GP) aux interactions fortes (régime de Tonks-Girardeau, TG). Nous avons également étudié le cas des

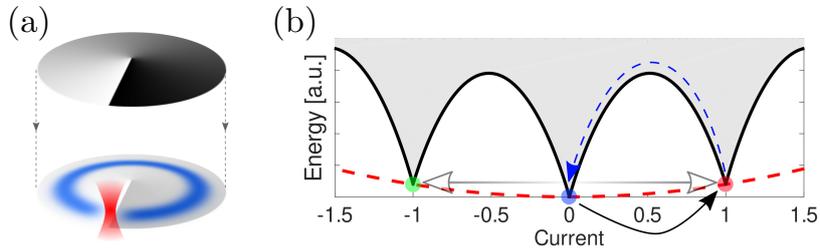


FIGURE 16: (a) Protocole d'impression de phase en présence d'une barrière. Juste après l'impression de phase, le courant vaut 1 en unités de $j_0 = nr_0\Omega_0$. (b) Diagramme d'énergie du système selon la valeur du courant. Pour passer de 1 à 0 le système doit franchir une barrière de potentiel. Les états de courant 1 et -1 sont dégénérés et peuvent être couplés par effet tunnel grâce à la barrière.

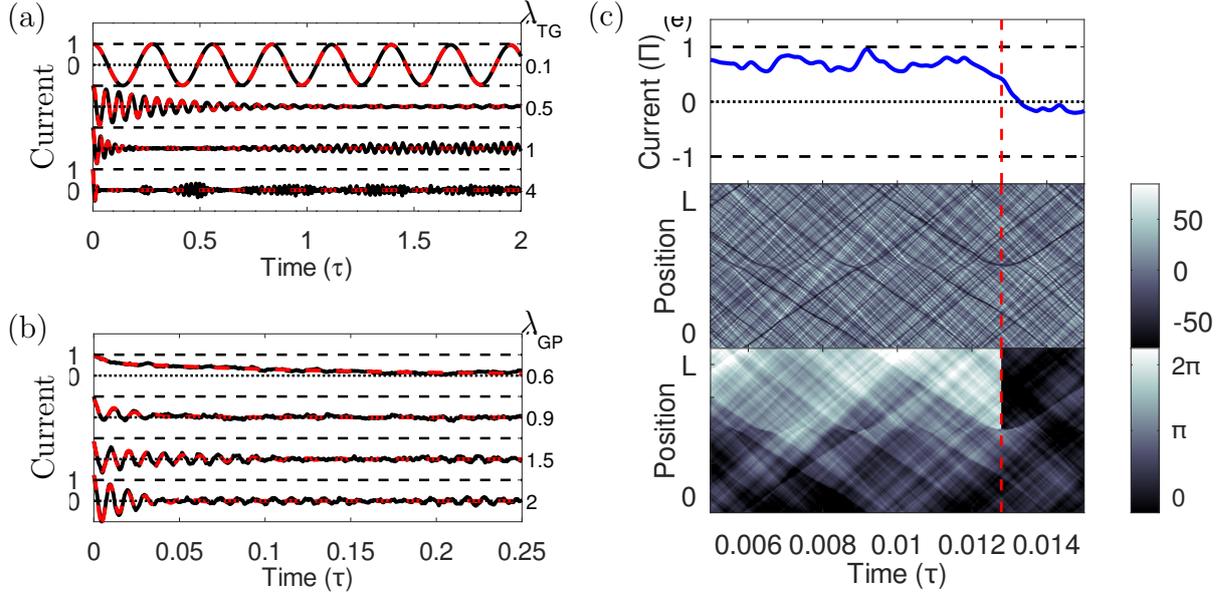


FIGURE 17: (a) Évolution du courant dans le régime TG, à température non nulle $k_B T = E_F$, pour différentes amplitudes de barrière λ_{TG} . On observe des oscillations de Rabi à faible barrière. (b) Même chose dans le régime GP à $k_B T = \mu$. Des oscillations du courant apparaissent pour des amplitudes de barrière $\lambda_{GP} > 1$. (c) Suivi d'une trajectoire dans le régime GP. En haut : courant moyen en fonction du temps. Au milieu : différence entre densité locale et densité moyenne (chaque ligne verticale correspondant à un instant). En bas : phase. La valeur du courant saute brusquement de 1 à 0 lorsqu'un soliton est réfléchi sur la barrière (trace noire réfléchi en densité). La densité s'annule à la barrière et la phase saute de 2π .

températures non nulles, par la méthode des champs classiques dans le régime GP : on suit un grand nombre de trajectoires du gaz régies par l'équation de GP, avec des conditions initiales aléatoires reproduisant une certaine distribution thermique. Les simulations ont été faites par Joan Polo Gomez pour le cas TG et Romain Dubessy pour le cas GP. Les résultats sont parus en 2019 dans Phys. Rev. Lett.¹⁴

Dans le régime TG, à faible barrière, le couplage entre les états 1 et -1 est faible, on a des oscillations de Rabi entre ces deux états, voir figure 17(a). Dans le régime GP, à faible barrière le courant reste égal à 1 (figure 17(b)), il finit par décroître à température non nulle en raison de sauts de phase aléatoire liés à la réflexion de solitons sur la barrière (figure (c)). Nous avons donc élucidé le mécanisme de dissipation du courant dans le cas de figure.

À grande amplitude de barrière, le courant se met à osciller dans les deux limites GP et TG. Les oscillations sont plutôt de forme triangulaires à forte barrière, donc avec une vitesse constante, ce qui nous a amenés à lancer une autre étude plus précise de ce cas.

2.4.3 Ondes de choc dans un gaz quantique

En observant attentivement les profils de densité à très grande barrière dans le régime GP, nous nous sommes aperçus qu'elle présentait des marches très marquées, se déplaçant à la vitesse du son, ce qui donnait lieu aux oscillations triangulaires. En fait, à très grande barrière, le couplage est nul et on peut alors dérouler le gaz annulaire : la situation est

identique à un gaz dans une boîte, auquel on imprime brusquement une vitesse non nulle, une fraction $\eta = v/c$ de la vitesse du son c , voir figure 18. Cela produit un creux de densité $-\Delta n$ près du mur que les atomes quittent et un excès de densité Δn là où les atomes sont réfléchis par l'autre mur, avec $\Delta n/n_0 = \eta$ si n_0 est la densité initiale. Ces deux fronts sont des ondes de choc qui se propagent à la vitesse du son. Ce qui est remarquable c'est que cette situation est universelle : elle est valable aussi bien dans le régime GP que dans le régime TG. Avec Anna Minguzzi et Maxim Olshanii avons publié un article sur ce sujet, *Universal shock-wave propagation in one-dimensional Bose fluids*¹⁵.

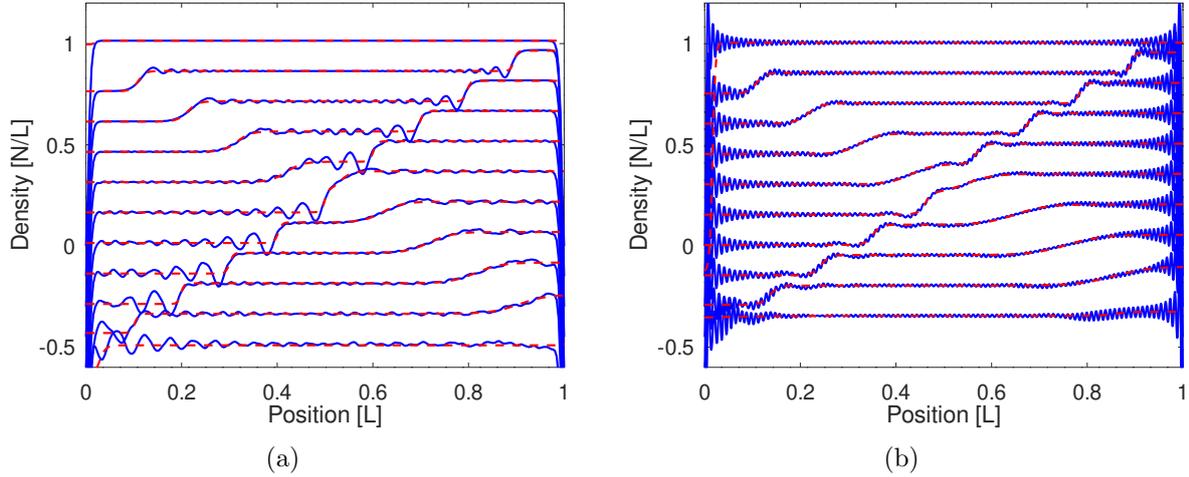


FIGURE 18: Profil de densité du gaz unidimensionnel dans une boîte de longueur L à différents instants de 0 à L/c tous les $0.1L/c$. Les profils sont décalés verticalement de $0.15 n_0$ pour plus de clarté. À $t = 0$, la densité est uniforme à $n_0 = N/L$ et un courant $v = 0.1 c$ est imprimé vers la droite. La partie centrale se déplace vers la droite, laissant une partie du fluide immobile de plus faible densité $0.9 n_0$ à gauche et un excès de densité $1.1 n_0$ immobile également, sur lequel le fluide se réfléchit, à droite. Les fronts se déplacent à $\pm c$. Celui qui va de $0.9 n_0$ à n_0 s'élargit au cours du temps, l'autre reste très raide. Les deux fronts se croisent sans se perturber. (a) Régime GP. Des trains de solitons sont créés à l'avant du front droit. (b) Régime TG. Le front droit se propage sans déformation.

2.4.4 Au-delà des chocs : vers le régime turbulent

Dans le cadre de l'ANR Quantum-SOPHA et de la partie théorique de la thèse de Manon Ballu, nous avons étudié l'état d'excitation d'un gaz 1D lorsqu'il est soumis à une perturbation périodique de grande amplitude, qu'il s'agisse d'une barrière de potentiel parcourant la longueur du gaz en aller-retour ou d'une oscillation du fond de la boîte dans laquelle le gaz est confiné, par analogie avec une étude expérimentale récente dans le cas 3D⁴³. Cette étude a été faite en collaboration avec Anna Minguzzi et l'apport important de Romain Dubessy, qui a développé le code et une méthode de comptage des solitons créés⁴⁴. Nous avons pu mettre en évidence plusieurs régimes pour la distribution en impulsion stationnaire $n(k)$ dans le gaz, avec une loi en k^{-2} pour k inférieur à à l'inverse de la

43. Navon et al., Science **366**, 382–385 (2019)

44. Characterizing far from equilibrium states of the one-dimensional nonlinear Schrödinger equation, Abhik Kumar Saha et Romain Dubessy, Preprint [arXiv:2210.09812](https://arxiv.org/abs/2210.09812)

longueur de relaxation ξ et faible amplitude de perturbation et une loi en k^{-8} à plus forte amplitude et pour des valeurs de k supérieures à ξ^{-1} . Le nombre de solitons créés dans le gaz croît avec l'amplitude d'excitation V comme $V^{0.37}$, et leur vitesse est plus faible à grande excitation (ils sont aussi plus profonds). Ces résultats sont en cours de rédaction.

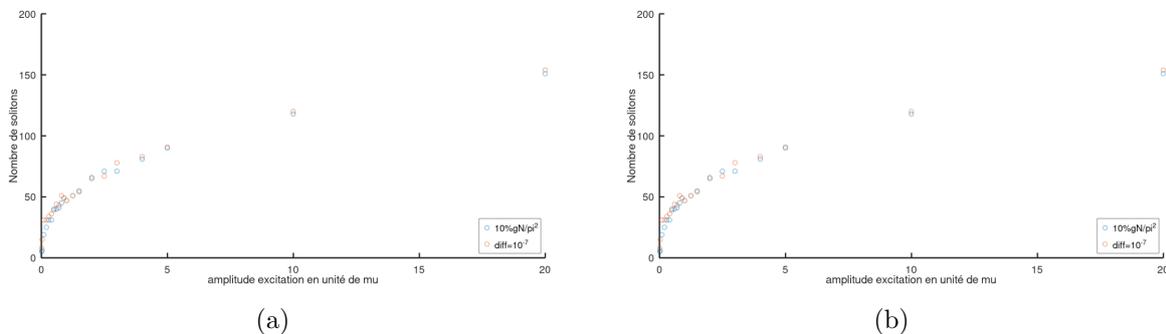


FIGURE 19: (a) Suivi d'une trajectoire dans le régime GP : différence entre densité locale et densité moyenne (chaque ligne verticale correspondant à un instant). (b) Nombre de solitons dans le gaz à la fin de l'évolution, en fonction de l'amplitude d'excitation en unités du potentiel chimique.

2.5 Principales collaborations

Mon équipe collabore avec des théoriciens, avec lesquels nous avons tissés des relations de longue date. Elle a également développé des interactions et échanges avec des groupes d'expérimentateurs. Nos principaux collaborateurs sont les suivants :

- Barry Garraway (Université du Sussex, Royaume-Uni) pour la théorie des potentiels adiabatiques, avec lequel j'ai écrit plusieurs articles dont deux articles de revue ou d'analyse approfondie sur ce thème ;
- Anna Minguzzi (LPMGC Grenoble), théoricienne avec laquelle nous avons une collaboration fructueuse depuis l'ANR SuperRing sur des sujets liés aux courants permanents dans les anneaux et à la dynamique des gaz 1D. Cette collaboration a d'ailleurs permis à Romain Dubessy de développer des savoir-faire dans le domaine de la simulation numérique, et d'encadrer ensuite de manière autonome un doctorant indien (à distance). Nous avons également interagi avec Luigi Amico sur le thème de l'atomtronique grâce à notre collaboration avec Anna ;
- Patrizia Vignolo (université de Nice, InPhyNi) coordonne l'ANR Quantum-SOPHA dans laquelle Anna Minguzzi est également impliquée, et interagit avec nous sur le sujet des gaz 1D ;
- Maxim Olshanii (Université du Massachusetts à Boston), théoricien avec lequel nous collaborons depuis plus de 20 ans. Récemment il a été moteur dans notre intérêt pour les ondes de choc dans les gaz 1D. Il a également encadré l'un de nos doctorants sur un sujet théorique ;
- Sergey Nazarenko (laboratoire InPhyNi), théoricien spécialiste de la turbulence avec lequel nous avons démarré le projet ANR VORTECS en 2023 ;
- Vanderlei Bagnato (université de São Paulo à São Carlos), expérimentateur. Nous avons une collaboration COFECUB avec lui et son groupe d'expérimentateurs et de théoriciens sur le sujet des bulles à atomes et de la turbulence ;

- Quentin Glorieux, avec lequel nous avons un projet SIRTEQ et une ANR en commun (Quantum-SOPHA) et dont le système expérimental (basé sur des photons en interaction non linéaire) est complémentaire du nôtre ;
- Thorsten Schumm (université technique TUW de Vienne) avec lequel nous avons collaboré pour la réalisation de la puce de l'expérience Sodium et avec qui nous étudions à présent les résonances de Feshbach micro-ondes dans le cadre de l'ANR MICO3.

2.6 Place de ma recherche dans celle de mon unité

L'activité scientifique du laboratoire de physique des lasers est essentiellement expérimentale et à dominante physique et optique. D'une façon générale, nous étudions les interactions entre ondes et matière, dans des domaines fondamentaux (physique atomique et moléculaire, spectroscopie...) ou plus appliqués (instrumentation, diodes électroluminescentes organiques, optique biomédicale...) et souvent pluridisciplinaires, aux interfaces avec la physique du solide, la chimie, la biologie ou les nanosciences. Ces études vont de l'atome isolé jusqu'au milieu vivant, en passant par les molécules simples ou biologiques, les agrégats et les matériaux. L'onde est soit un outil pour accéder aux informations concernant le milieu, soit elle-même l'objet d'étude, qu'il s'agisse de lumière et de lasers ou d'ondes de matière.

Le laboratoire regroupe 80 à 85 personnes dont 29 enseignants-chercheurs (relevant majoritairement de la section 30, sauf 6 en section 63 et un en section 31), 9 chercheurs CNRS + 2 émérites (relevant tous de la section 04), 15 personnels administratifs et techniques (11 CNRS, 4 USPN dont un à 50%), 15 à 20 doctorants, et une dizaine de postdocs, ATER et CDD, parmi lesquels les chefs de projets de l'Equipex T-REFIMEVE et du DIM QuanTiP.

Le laboratoire est structuré en cinq axes de recherche :

1. **Gaz Quantiques** : équipes **Condensats de Bose-Einstein** (BEC) et Gaz quantiques magnétiques. Atomes ultra-froids et condensation de Bose-Einstein ; manipulation dans des potentiels optiques ou radiofréquences ; effets des interactions dipolaires et d'une dimensionnalité réduite.
2. Atomes aux interfaces : équipes Optique et Interférométrie Atomique et Spectroscopie Atomique aux Interfaces. Interactions atomes – nanostructure – lumière.
3. Métrologie, Molécules et Tests fondamentaux. Interactions laser – systèmes simples : atomes ou molécules ; spectroscopie à très haute résolution ; applications à la métrologie, aux sources lasers ultra-stables et au transfert de référence de fréquence.
4. Lasers pour le vivant : équipes Optique des Milieux Aléatoires et BioMolécules et Spectroscopie. Spectroscopie et structures de biomolécules et de complexes spécifiques ; diffusion lumineuse dans les milieux aléatoires et les tissus biologiques ; applications à la modélisation biomoléculaire et au diagnostic médical.
5. Photonique Organique et Nanostructures. Plasmonique, applications à la nanophotonique et aux lasers organiques.

Mes travaux relèvent du premier de ces axes, qui concerne deux équipes. Mon équipe (BEC) interagit scientifiquement avec l'autre équipe d'atomes froids (GQM). Nous partageons toutes les semaines une séance de discussion scientifique (la *réunion biblio*) autour d'un article récent. Lors de cette réunion, nous échangeons également sur les expériences en cours

au laboratoire. L'équipe GQM était invitée lors des présentations scientifiques données dans le cadre de l'ANR SuperRing avec notre partenaire Anna Minguzzi. Nous avons tenu en 2018 deux demi-journées « Matière froide », et une en mars 2019, pour discuter des projets de nos équipes. Je collabore notamment avec Paolo Pedri, théoricien qui fait partie de l'équipe GQM mais partage son activité entre plusieurs équipes du laboratoire.

Enfin, nos expériences d'atomes froids reposent sur une instrumentation de pointe, en partie développée au sein des ateliers d'électronique et de mécanique du laboratoire. Fabrice Wiotte, responsable de l'atelier d'électronique, a obtenu en 2022 le Cristal du CNRS, en partie pour la conception et réalisation des sources radiofréquences qu'il a développées pour notre équipe.

2.7 Production scientifique 2018-2023

En résumé : 10 articles, 1 acte de conférence, 17 invitations à des conférences ou écoles d'été, 3 communications orales, 4 posters, 16 séminaires, 5 articles ou entretiens écrits pour une audience grand public, 1 livre niveau enseignement supérieur en français et sa version anglaise.

2.7.1 Articles parus ou acceptés dans des revues à comité de lecture

1. D. Rey, S. Thomas, R. Sharma, T. Badr, L. Longchambon, R. Dubessy et H. Perrin, *Loading a quantum gas from a hybrid dimple trap to a shell trap*, J. Appl. Phys. **132**, 214401 (2022).
2. Y. Guo, E. Mercado Gutierrez, D. Rey, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon, V. Bagnato, H. Perrin et R. Dubessy, *Expansion of a quantum gas in a shell trap*, New J. Phys. **24**, 093040 (2022).
3. P. Naldesi, J. Polo Gomez, V. Dunjko, H. Perrin, M. Olshanii, L. Amico et A. Minguzzi, *Enhancing sensitivity to rotations with quantum solitonic currents*, SciPost Phys. **12**, 138 (2022).
4. L. Amico et al., *Roadmap on Atomtronics : State of the art and perspective*, AVS Quantum Sci. **3**, 039201 (2021).
5. M. de Goër de Herve, Y. Guo, C. De Rossi, A. Kumar, T. Badr, R. Dubessy, L. Longchambon et H. Perrin, *A versatile ring trap for quantum gases*, J. Phys. B **54**, 125302 (2021).
6. R. Dubessy, J. Polo Gomez, H. Perrin, A. Minguzzi et M. Olshanii, *Universal shock-wave propagation in one-dimensional Bose fluids*, Phys. Rev. Research **3**, 013098 (2021).
7. Y. Guo, R. Dubessy, M. de Goër de Herve, A. Kumar, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon, and H. Perrin, *Supersonic rotation of a superfluid : a long-lived dynamical ring*, Phys. Rev. Lett. **124**, 025301 (2020). Sélectionné comme *Editor's suggestion* et pour un article Synopsis de *Physics*. Associé à une [brève de l'INP](#) parue également dans *Reflets de la physique*.
8. J. Polo Gomez, R. Dubessy, P. Pedri, H. Perrin, A. Minguzzi, *Oscillations and decay of superfluid currents in a one-dimensional Bose gas on a ring*, Phys. Rev. Lett. **123**, 195301 (2019).

9. T. Badr, D. Ben Ali, J. Seaward, Y. Guo, F. Wiotte, R. Dubessy, H. Perrin et A. Perrin, *Comparison of time profiles for the magnetic transport of cold atoms*. Appl. Phys. B **125**, 102 (2019).
10. A. Kumar, R. Dubessy, T. Badr, C. De Rossi, M. de Goër De Herve, L. Longchambon et H. Perrin, *Producing superfluid circulation states using phase imprinting*, Phys. Rev. A **97**, 043615 (2018).

2.7.2 Conférences invitées dans des congrès (présentées par moi-même)

1. *Melting of a vortex lattice in a fast rotating Bose gas*, Polish-French Symposium II, Paris, France (31 mai - 2 juin 2023).
2. *Superfluid dynamics of a quantum gas on a shell*, Out-of-equilibrium physics with photons and atoms, Les Houches, France (6-10 mars 2023).
3. *Superfluid quantum Bose gas on a shell*, Frontiers On Matterwave Optics (FOMO) 2022, Trieste, Italie (19-23 septembre 2022).
4. *Superfluid quantum Bose gases on a shell*, Atomtronics 2022, Benasque, Espagne (1-13 mai 2022).
5. *Collective excitations and superfluid dynamics of a 2D Bose gas*, São Paulo School of Advanced Science on Quantum Fluids and Applications, São Carlos, Brésil (20 février - 4 mars 2022), en visioconférence.
6. *Physics in a bubble : from supersonic rotation to the effects of dimensional reduction*, Modern problems in laser physics, Novosibirsk, Russie, par visioconférence (22-29 août 2021).
7. *Exploring new regimes with atoms trapped on a curved surface*, Atomtronics 2021, Abu Dhabi, conférence donnée en visioconférence par Romain Dubessy (31 mai au 11 juin 2021).
8. *Quantum gas flowing in a ring : the elementary atomtronic circuit*, SPIE Photonex + Vacuum Expo, Royaume-Uni, conférence plénière donnée en visioconférence (5-9 octobre 2020).
9. *Quantum gases in ring traps : From quantized flows to supersonic rotation*, SPIE Optics + Photonics 2020, San Diego, États-Unis, conférence plénière donnée en visioconférence (24-28 août 2020)
10. *Superfluid hydrodynamics of a Bose gas in a harmonic (or bubble) trap*, Coherent quantum dynamics, OIST, Okinawa, Japon (24 septembre - 3 octobre 2019)
11. *Collective excitations and superfluid dynamics of a 2D Bose gas*, Vortex Dynamics, Turbulence and Related Phenomena in Quantum Fluids, International Institute of Physics (IIP), Natal, Brésil (24-28 juin 2019)
12. *Dynamical ring formed by a superfluid rotating at supersonic speed*, Non-Equilibrium Phenomena, Newcastle, Royaume-Uni (10-12 juin 2019).
13. *Supersonic superfluid annular flow sustained by its angular momentum*, Atomtronics, Benasque, Espagne (6-19 mai 2019).
14. *Fast rotation of a trapped Bose gas*, EnIQMa 2018 (Entangled Interacting Quantum Matter), ENS Lyon, France (19-21 novembre 2018).

15. *Superfluid dynamics of a trapped Bose gas : from 2D connected to annular gases*, Modern problems in laser physics, Novosibirsk, Russie (26-31 août 2018)
16. *Dynamique superfluide d'un gaz de Bose*, session PAMO/COLOQ du Congrès de la Société française d'optique, Toulouse, France, (3-6 juillet 2018)
17. *Atoms rotating in a ring : an elementary 'circuit' for quantum simulation*, International Conference on challenges in Quantum Information, Tokyo, Japon (9-11 avril 2018).

2.7.3 Actes de colloques à comité de lecture

1. R. Dubessy, C. De Rossi, M. de Goër De Herve, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon et H. Perrin, *Local correlations reveal the superfluid to normal boundary in a trapped two-dimensional quantum gas*, AIP Conference Proceedings **1936**, 020027 (2018).

2.7.4 Publications dans des revues sans comité – vulgarisation

1. *Simuler la matière avec des atomes ultrafroids*, article coécrit avec Manon Ballu dans le [numéro 574](#) de *La Recherche*, juin 2023.
2. Article sur les technologies quantiques dans la Gazette de la recherche de l'Institut Galilée, coécrit avec Jocelyn Achard (LSPM), juin 2023.
3. Entretien avec Guillaume Grallet pour le [magazine Le Point](#), *La physique quantique peut heurter notre intuition de la vie quotidienne*.
4. Participation à l'ouvrage « [Douze femmes en recherche - Variations quantiques](#) », livre de textes de chercheuses accompagnés de photographies de Jean-François Dars et Anne Papillault, avec le concours de Michèle Leduc. Texte : *Dernières nouvelles des bulles / Lastest News About Bubbles*. 2021.
5. Co-rédaction avec Laurent Longchambon et l'équipe de communication de l'INP d'une brève intitulée [Quand un superfluide passe le mur du son](#). Cette brève a été republiée dans la revue de la SFP *Reflats de la physique*, numéro 65 d'avril 2020.

2.7.5 Communications à des congrès, symposium (présentées par moi-même)

1. R. Sharma, D. Rey, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon, R. Dubessy et [H. Perrin](#), *Melting of a vortex lattice in a fast rotating Bose gas*, BEC 2023, Sant Feliu de Guixols, Espagne (9-15 septembre 2023), poster.
2. H. Perrin, *Fast rotation of a superfluid in a shell*, Open quantum many body physics 2023, Orsay (26-30 juin 2023), communication orale.
3. R. Sharma, D. Rey, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon, R. Dubessy et [H. Perrin](#), *Melting of a vortex lattice in a fast rotating Bose gas*, EGAS, Strasbourg (19-22 juin 2023), communication orale.
4. Y. Guo, D. Rey, E. Mercado Gutierrez, R. Sharma, S. Thomas, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon, V. Bagnato, [H. Perrin](#) et R. Dubessy, *Superfluid Bose gas on a bubble*, ECAMP 14, Vilnius, Lituanie (27 juin - 1^{er} juillet 2022), poster.
5. [H. Perrin](#), Y. Guo, R. Dubessy, M. de Goër de Herve, A. Kumar, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon, *Supersonic rotation of a superfluid : a long-lived dynamical ring*,

Quantum Optics X, Toruń, Pologne (5-11 septembre 2021), communication orale.
<https://www.youtube.com/watch?v=02BYCVpe4lY>

6. Y. Guo, M. de Goër de Herve, A. Kumar, R. Dubessy, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon et H. Perrin, *Superfluid dynamics in Bose gases*, ECAMP 13 (13th European Conference on Atoms Molecules and Photons), Florence (8-12 avril 2019), poster.
7. A. Kumar, M. de Goër de Herve, R. Dubessy, Y. Guo, T. Badr, A. Perrin, L. Longchambon et H. Perrin, *Superfluid flow of an annular Bose gas*, ICAP 2018 (International Conference on Atomic Physics), Barcelone (23-27 juillet 2018), poster.

2.7.6 Séminaires, workshops

1. *Superfluid quantum Bose gas on a shell*, séminaire du Majulab, Singapour (24 mai 2023), en visioconférence.
2. *Quantum gases in ring traps : Birth and death of a quantum circulation*, séminaire du groupe d'optique, São Carlos, IFSC, Brésil (17 novembre 2022).
3. *Superfluid dynamics in a bubble : from supersonic rotation to the effects of dimensional reduction*, Quantum Optics seminar, Ben Gourion University, Israël (12 janvier 2022), en visioconférence.
4. *Superfluid dynamics in a bubble : from supersonic rotation to the effects of dimensional reduction*, QuCoLiMa Talk, Erlangen / Mainz / Saabrücken (21 décembre 2021), en visioconférence.
5. *Physics in a bubble : from supersonic rotation to the effects of dimensional reduction*, BEC Seminar, Trento (1 juin 2021), en visioconférence.
6. *Reaching the 1D regime in the Na experiment*, workshop LPL-LPMMC-UMass Boston (18 mars 2021), en hybride.
7. *Rotating annular quantum gases : from elementary to supersonic flow*, séminaire au collège de France dans le cadre du cours de Jean Dalibard (5 mars 2021).
8. *Superfluid dynamics of a quantum gas at the bottom of a bubble trap*, séminaire du Department of Atomic & Laser Physics, Oxford, Royaume-Uni (9 novembre 2020), en visioconférence.
9. *Superfluid dynamics of a quantum gas at the bottom of a bubble trap*, IFSC – USP seminar, São Carlos, Brésil (15 septembre 2020), en visioconférence.
10. *Superfluid dynamics of a quantum gas at the bottom of a bubble trap*, QUANTUM seminar (en visioconférence), Université de Mainz, Allemagne (4 juin 2020).
11. *Superfluid dynamics of a quantum gas at the bottom of a bubble trap*, Physics Colloquium, Université de Kaiserslautern, Allemagne (10 février 2020).
12. *Adiabatic potentials*, cours donné à l'International school for young scientists (MPLP 2018), Novosibirsk State University, Russie (30 août 2018).
13. *Superfluid dynamics : from 2D connected to annular gases*, Physics Department, Strathclyde University, Glasgow, Royaume-Uni (19 juillet 2018).
14. *Superfluid dynamics of a trapped Bose gas*, [DQ-mat Kolloquium \(Guest lecture\)](#), Hannover, Allemagne (28 juin 2018).

15. *Superfluid dynamics : from 2D connected to annular gases*, Physics Department, Durham University, Royaume-Uni (17 mai 2018).
16. *An annular quantum gas*, Frank Hekking memorial workshop, Les Houches, France (28-30 janvier 2018).

2.7.7 Livres et ouvrages

1. *Atomes, ions, molécules ultrafroids et les technologies quantiques*, Robin Kaiser, Michèle Leduc et Hélène Perrin (coord.), EDP Sciences (2020).
2. *Ultra-cold atoms, ions, molecules and quantum technologies*, Robin Kaiser, Michèle Leduc et Hélène Perrin (coord.), EDP Sciences (2022). Version anglaise du livre ci-dessus, traduction assurée par les auteurs.

2.7.8 Chapitres d'ouvrages

1. Conclusion (chapitre 8) du livre *Atomes, ions, molécules ultrafroids et les technologies quantiques* susmentionné, ainsi qu'un chapitre : Bruno Laburthe-Tolra, Thierry Lahaye et Hélène Perrin, *La simulation quantique avec des atomes froids*, pp. 75-96.
2. Traduction anglaise des chapitres ci-dessus dans la version anglaise du livre.

3 Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique

3.1 Encadrement de thèses et post-docs

3.1.1 Thèses

1. Direction de la thèse de **Mathieu de Goër de Herve** (2015-2018), intitulée *Superfluid dynamics of annular Bose gases*, soutenue le 23 octobre 2018. Après une participation à la mesure des fréquences du mode ciseau d'un gaz 2D (thèse de Camilla De Rossi), Mathieu a amélioré le chargement des atomes dans l'anneau jusqu'à obtenir un gaz annulaire condensé. Il a mis en place les outils pour faire tourner ce gaz : touillette laser, rotation d'une déformation du nuage, étude de l'effet d'une impression de phase (avec Avinash Kumar). Il a également étudié l'effet d'une rotation rapide dans le piège habillé : du réseau de vortex ordonné à sa fonte, jusqu'à la première mise en évidence d'une déplétion au centre (le futur anneau dynamique). Mathieu est coauteur de six publications. Mathieu est ingénieur chez Openenergy (Egis).
2. Direction de la thèse de **Yanliang Guo** (bourse chinoise du CRC, 2017-2020), intitulée *Annular quantum gases in a bubble-shaped trap: from equilibrium to strong rotations*, soutenue le 13 janvier 2021 (soutenance décalée en raison du Covid). Yanliang a pris la suite de Mathieu de Goër, en prenant des données de façon systématique et quantitatives concernant à la fois le piège annulaire en rotation (mesure de supercourants quantifiés) et la rotation rapide. Grâce à la mise en place d'un processus d'évaporation en polarisation circulaire, la rotation au fond de la bulle est accélérée jusqu'à l'obtention, pour la première fois, d'un anneau dynamique dont la forme est

maintenue uniquement par le moment cinétique (effet centrifuge). Enfin, il a observé un anneau statique se former dans la bulle lorsque le gradient d'amplitude RF compense la gravité : les atomes lévitent proche de l'équateur. Yanliang est coauteur de quatre articles parus, un autre est en cours de rédaction. Yanliang est en post-doc à Innsbruck avec Hans-Christoph Nägerl.

3. Direction de la thèse de **Joseph Seaward** (2017-2020), intitulée *Unidimensional gas with tunable interactions*, soutenue le 20 novembre 2020 (maintenue fin 2020 malgré le Covid, la rédaction ayant été efficace). Joseph a pris la suite de Dany Ben Ali sur l'expérience Sodium. L'encadrement au quotidien dans la salle d'expérience a été assuré par Aurélien Perrin et Thomas Badr. Joseph a optimisé le transport des atomes de l'enceinte du MOT à l'enceinte finale, ce qui a donné lieu à un article paru en 2019. Il a mis au point le système de détection du condensat. Malheureusement le confinement a démarré au moment même où les étapes d'étuvage de l'enceinte finale étaient terminées, ce qui ne lui a pas permis de transférer les atomes sur la puce et d'observer un condensat. Joseph a également mené en parallèle un projet de physique mathématique en collaboration avec Maxim Olshanii de l'Université du Massachusetts à Boston, avec un article publié sur ce sujet théorique. Joseph travaille dans une entreprise américaine de technologies, Physical Sciences Inc.
4. Direction de la thèse de **David Rey** (2019-janvier 2023), intitulée *Control and Optimization of a Bose-Einstein condensation experiment*, soutenue le 24 janvier 2023 (la soutenance a été décalée en raison de l'interruption des expériences due au Covid). David a pris le relais de Yanliang sur l'expérience rubidium. Sa thèse, plutôt orientée instrumentation, a porté sur la mise en place d'un nouveau contrôle informatique de l'expérience, qui permet de procéder à des optimisations automatiques. Il a aussi participé à la mise en place d'un nouveau laser pour la production du condensat. Il est auteur d'un article. David est maintenant ingénieur R&D chez Posithôt (Saclay).
5. Direction de la thèse de **Manon Ballu**, commencée en septembre 2020 (encadrement sur l'expérience : Aurélien Perrin et Thomas Badr). Manon a pris le relais de Joseph sur l'expérience Sodium. L'objectif de sa thèse est la mise en évidence d'une résonance de Feshbach micro-onde. Manon a rapidement montré qu'on pouvait charger des atomes dans le piège de la puce. Les expériences ont cependant dû être interrompues pendant près d'un an pour changer un fil de cuivre servant de piège intermédiaire entre le piège magnétique quadrupolaire et le piège de la puce à atomes, car la configuration d'origine ne permettait pas de refroidir suffisamment les atomes. Après la modification, Manon a obtenu très rapidement un condensat de Bose-Einstein dans la puce. Elle explore actuellement les résonances moléculaires micro-ondes, excitées par le guide d'onde se trouvant sur la puce. Manon a démarré en parallèle un projet théorique pendant l'interruption, co-encadré par Anna Minguzzi dans le cadre de l'ANR Quantum-SOPHA. Nous avons prolongé son contrat d'un an et sa soutenance en prévue en 2024.
6. Direction de la thèse de **Rishabh Sharma**, commencée en octobre 2021. La thèse est co-dirigée à 50% par Romain Dubessy. L'objectif de la thèse de Rishabh, qui travaille sur l'expérience Rubidium, est de mettre en place une imagerie non destructive des atomes, afin de pouvoir étudier leur dynamique hors équilibre. Rishabh a aussi participé à la mise en place d'un nouveau laser de piégeage et a pris les données

montrant la production d'un condensat avec ce nouveau système. Il est co-auteur d'un article.

7. Co-direction (50%) de la thèse de **Matthieu Cassus**, commencée en septembre 2023 (directeur : Romain Dubessy). Matthieu a pris le relais de Rishabh sur l'expérience rubidium. L'objectif de sa thèse est l'étude de la dynamique des gaz superfluides très hors équilibre, dans le prolongement des expériences sur l'anneau dynamique. Ce projet est accompagné par l'ANR VORTECS portée par Romain Dubessy. Cette thématique correspond aussi au thème de notre collaboration avec Vanderlei Bagnato de l'Université de São Paulo (Brésil), avec un projet USP-COFECUB que j'ai porté de 2019 à 2023, et un nouveau projet soumis par Romain Dubessy.
8. Direction de la thèse de **Bastien Mirmand**, commencée en octobre 2023 (encadrement sur l'expérience : Aurélien Perrin et Thomas Badr). Bastien a pris le relais de Manon sur l'expérience Sodium. L'objectif de sa thèse est l'étude plus poussée de la résonance de Feshbach micro-onde, et son utilisation avec un gaz unidimensionnel uniforme. L'idée est de placer les atomes dans un piège hybride associant le champ magnétique de la puce pour le confinement radial et une boîte optique pour le confinement longitudinal. Sa thèse est financée par une ANR PCRI franco-autrichienne, MICO3.

3.1.2 Post-docs

1. Encadrement d'**Avinash Kumar**, post-doc ANR puis SIRTEQ d'octobre 2016 à juillet 2018. Avinash a mis en place le SLM pour communiquer du moment cinétique aux atomes par impression de phase, et il a étudié l'effet de cette impression de phase par simulation numérique. Il a également participé aux expériences sur la rotation rapide au fond de la bulle. Avinash a publié deux articles avec nous. Après un autre postdoctorat à Besançon dans l'équipe de Clément Lacroûte, il est à présent employé par la start-up Cailabs à Rennes, qui l'a embauché pour ses compétences en SLM acquises dans l'équipe.
2. Encadrement de **Simon Thomas**, post-doc SIRTEQ mars-septembre 2022, puis depuis juin 2023. Simon a participé à l'obtention d'un condensat de Bose-Einstein avec un nouveau système laser. Il a été en arrêt maladie pendant une longue période. J'ai mis en place avec l'équipe une adaptation de ses missions, il travaille actuellement à mi-temps sur la fiabilisation du système de contrôle de l'expérience et l'analyse des images. Il est co-auteur d'une publication.

3.2 Enseignement, formation, diffusion de la culture scientifique

Le volume total annuel de mon enseignement tourne autour de 40 HETD en comptant les cours en école d'été. Je ne souhaite pas augmenter ce volume, aussi n'ai-je jamais postulé à la PES/PEDR.

Master

- Responsable de l'option *Photons and Atoms* du M2 Physique quantique de l'ENS (20 heures de cours par an) depuis septembre 2018 (j'en assurais les TDs jusqu'à décembre 2017) : quantification du champ, interaction atomes-photons.

- Montage d’une nouvelle option du M2 Dispositifs quantiques de l’Université de Paris (ex Paris Diderot), *Quantum computing* en binôme avec Perola Milman. Perola s’occupe de la partie théorique (algorithmes), je présente quant à moi les plateformes les plus avancées pour le calcul et la simulation quantique : ions, qubits supraconducteurs, spins dans le silicium, atomes froids... Cette option (12 heures de cours) créée de toutes pièces m’a demandé un investissement très important, une partie des dispositifs enseignés sortant clairement de mon domaine de compétence direct. J’ai assuré ce cours pendant deux ans. Je l’ai ensuite transmis à Bruno Laburthe pour me libérer du temps pour la direction de QuantIP.

Doctorat

- Série de 2 cours (en 2018) ou 3 cours (en 2019) de 1h30 à l’école prédoctorale des Houches sur les réseaux optiques.
- Série de 3 cours sur *BEC, adiabatic potentials and superfluid dynamics*, Natal, Brésil, juin 2019.
- Série de 3 cours sur *Laser cooling, BEC and superfluid dynamics*, Okinawa, Japon, septembre 2019.
- Série de 3 cours sur *BEC, adiabatic potentials and superfluid dynamics*, São Carlos, Brésil, février 2022. Faits en visioconférence, mon voyage au Brésil ayant dû être annulé pour raisons personnelles.
- Série de 2 cours sur *Adiabatic rf potentials for quantum gases*, São Carlos, Brésil, novembre 2022. Diffusés dans le cadre du cours de Vanderlei Bagnato, disponibles sur YouTube : [Cours 1](#), [Cours 2](#).
- Jurys de thèse : pour la période décembre 2017 – décembre 2023, en dehors des jurys de mes propres étudiants en thèse, j’ai participé à 4 jurys en tant que rapporteuse (dont 3 à l’étranger), 2 comme présidente et 6 comme membre. J’ai participé à 6 jurys d’habilitation dont 2 comme présidente.
- Comités de suivi : j’ai été membre des comités de suivi de thèse de 5 étudiants dans la période (autres que mes étudiants).
- Membre du conseil de l’école doctorale EDPIF (Paris).

3.3 Diffusion scientifique

- Organisatrice avec Patrizia Vignolo et Anna Minguzzi d’un mini-colloque *Simulateurs quantiques* au congrès général de la SFP, Nantes, juillet 2019.
- Membre du Comité scientifique des conférences ECAMP 13 et ECAMP 14 de l’EPS (Florence 2019, Vilnius 2022).
- En temps que membre de l’International Advisory Committee de la conférence ICAP, j’ai conseillé avec deux collègues les organisateurs de la conférence ICAP 2022 à Toronto (qui aurait dû avoir lieu en 2020).
- Communication de l’équipe : maintien du site internet de l’équipe <http://www-lpl.univ-paris13.fr/bec>, fiche de l’équipe sur le site de SIRTEQ.

3.4 Communication auprès du grand public

Grand public

- *Simuler la matière avec des atomes ultrafroids*, article coécrit avec Manon Ballu dans le [numéro 574](#) de *La Recherche*, juin 2023.
- Article sur les technologies quantiques dans la Gazette de la recherche de l'Institut Galilée, coécrit avec Jocelyn Achard (LSPM), juin 2023.
- Long entretien avec Olivier Ezratty pour son podcast *Decode quantum*, février 2023.
- Entretien avec Michèle Leduc pour l'émission de France Culture *Divers aspects de la pensée contemporaine*, le [25 décembre 2022](#).
- Intervention lors de l'événement en l'honneur de la remise du prix Nobel à Alain Aspect, *Décortiquez les révolutions quantiques !*, ENS Paris-Saclay, 10 décembre 2022.
- Participation à l'émission de Nicolas Martin *La méthode scientifique* sur France Culture, le [16 mars 2022](#).
- Entretien avec Guillaume Grallet pour le [magazine Le Point](#), *La physique quantique peut heurter notre intuition de la vie quotidienne*. Réponses rédigées par écrit.
- Participation à l'ouvrage « [Douze femmes en recherche - Variations quantiques](#) », livre de textes de chercheuses accompagnés de photographies de Jean-François Dars et Anne Papillault, avec le concours de Michèle Leduc. Texte : *Dernières nouvelles des bulles / Latest News About Bubbles*. 2021.
- Rédaction avec Laurent Longchambon d'un communiqué de l'INP sur l'obtention de l'anneau dynamique : [Quand un superfluide passe le mur du son](#).
- Participation à un projet photographique sur les femmes dans les technologies quantiques : <http://www.qfdn.net/categories/enseignement> octobre 2019.
- Participation à une table ronde lors de la journée Sciences et progrès organisée par la Fédération Française de Sociétés Scientifiques (F2S), « Technologies quantiques, en marche vers les applications », le 11 janvier 2018 à l'ENS.
- Entrevue avec une journaliste de *Sciences et Avenir* sur la simulation quantique, parue dans le numéro de décembre 2017.
- Participation à l'exposition « Froid » à la Cité des Sciences de la Villette (photo, texte), qui s'est tenue du 5 décembre 2017 au 26 août 2018.

Collège-lycée-découverte pour le premier cycle

- Séminaire lors de la semaine de découverte pour les étudiants de licence de l'USPN. *Un aperçu du monde quantique ou comment apprivoiser le chat de Schrödinger*, Villetaneuse (12 janvier 2023).
- Stand Femmes & Sciences dans le cadre de Savante Banlieue (octobre 2019).
- Présentation d'une « mini-conférence » intitulée *Qu'est-ce que la température ?* à destination de collégiens et de lycéens dans le cadre de Savante Banlieue (octobre 2018).
- Interventions en collège et lycée pour inciter les élèves à se tourner vers les études scientifiques (dans le cadre de l'association Femmes et Sciences, une à deux fois par an) : forums, tables rondes ou exposés.

Collègues non physiciens

- Coordination d’une session sur les technologies quantiques dans le cadre de la *Journée de la recherche* de l’Institut Galilée, 14 novembre 2019. J’ai donné un exposé d’introduction générale et un focus sur la simulation quantique, et sollicité deux collègues pour présenter un exemple d’algorithme quantique et un autre de capteur quantique.
- Séminaire pour les nouveaux entrants de l’INP (JPhy 2018) : *La physique quantique, ou comment apprivoiser le chat de Schrödinger ?* (28 mai 2018).

3.5 Expertise, évaluation

Réflexion collective sur l’expertise au CNRS

Avec un groupe de collègues chercheurs et ITA du CNRS participant à un programme de formation des cadres du CNRS, j’ai contribué pendant un an à une réflexion collective sur l’expertise au CNRS, qu’elle soit collective ou individuelle, faite au nom de l’organisme sur demande des pouvoirs publics ou dans le cadre d’interaction directe avec la société civile. Ce travail d’équipe a demandé un investissement important, avec de nombreux entretiens avec des personnalités ayant une vision de l’expertise (j’ai participé et fait le compte-rendu de 8 d’entre eux), et des heures de visioconférence, de synthèses et de rédaction collective en sous-groupes de travail. Cela a occupé en moyenne 10% de mon temps du printemps 2020 au printemps 2021. Nous avons abouti au printemps 2021 à un rapport de synthèse et des fiches pratiques pour la mise en place au CNRS d’une Mission pour l’expertise scientifique (MPES), que nous avons présentés en conseil de direction. Suite à ce travail, le CNRS a effectivement [mis en place la MPES début 2022](#), centrée sur l’expertise collective institutionnelle ⁴⁵.

Expertise de projets

1. Expertise de projets de recherche pour la Région Nouvelle Aquitaine, le LabEx PALM.
2. Membre depuis 2023 du comité scientifique du LabEx ITI-QMAT de Strasbourg : évaluation de projets pour l’attribution de bourses de thèse, avec audition des porteurs à Strasbourg (4 jours par an).
3. En tant que responsable de l’axe Gaz quantiques du DIM SIRTEQ : recherche de rapporteurs extérieurs à l’Île-de-France, évaluation et classement des projets déposés.
4. En tant que membre du COPI de NAP-MOSAIC : attribution du financement de projets sur évaluation et audition (voir paragraphe 5)

Évaluation

1. J’ai fait partie du comité d’évaluation HCERES du Laboratoire Charles Fabry de l’Institut d’Optique en décembre 2018.
2. Expertise pour l’attribution des primes de recherche de Sorbonne Université (ex UPMC) (6 dossiers par an de 2018 à 2020).
3. Membre du comité d’experts de la section 30 à l’USPN depuis 2021.

45. Site de la MPES : <https://www.cnrs.fr/fr/mpes>

4. 1 an au Comité National, section 4 (membre du bureau).
5. Participation à un concours de recrutement IR CNRS en 2020 comme représentante du laboratoire.
6. Participation à des comités de sélection : postes de MCF à Besançon (2019), Grenoble-Alpes (2019), l'USPN (2021, 2023), Nice (2023) ; postes de professeurs à l'USPN (2019) et l'ENS Paris (2021 comme membre, 2023 comme présidente du comité).
7. Experte extérieure pour des postes de professeurs ouverts au repyramidage à Paris-Saclay.
8. Expertise pour l'Université de Heidelberg, pour la titularisation d'un professeur junior (2023).

Revues

1. Éditrice de la série de livres *Advances of Atomic, Molecular and Optical Physics*.
2. 2 à 6 expertises par an pour les revues ou éditeurs scientifiques (Physical Review A et Letters, New Journal of Physics, Journal of Physics B, EPJD, Optics Communications, Nature physics, Nature Review, Springer, Oxford, ...).

4 Transfert technologique, relations industrielles et valorisation

J'ai peu d'occasions de participer à des activités de transfert de technologie ou à des brevets, ce qui s'explique par le caractère assez amont de mes recherches. J'ai cependant été contactée par Safran qui s'intéresse aux gyroscopes, dans le cadre de leur veille scientifique. Nos expériences sur la rotation d'un condensat dans un piège en forme de bulle rencontrent leurs centres d'intérêt, et nous avons mis en place en 2021 un accord de confidentialité, pour faciliter les activités de conseil auprès d'eux. Mon collègue Laurent Longchambon est également impliqué dans ces échanges. Nous sommes allées visiter l'un des sites industriels de Safran pour mieux comprendre leur expertise. Ces contacts en sont encore à leurs débuts.

Dans le cadre du DIM SIRTEQ : j'ai participé à une journée Sciences et progrès, rassemblant scientifique et industriels, le 11 janvier 2018 à l'ENS organisée par la F2S. J'ai assisté à la journée *Perspectives on quantum computing* organisée par SIRTEQ le 29 novembre 2019, qui a réuni scientifiques et industriels (IBM, Google, Rigetti notamment). J'ai suivi une journée de formation à la valorisation et la création d'entreprise en septembre 2021. J'ai également assisté à la remise du rapport Forteza sur les technologies quantiques à l'Assemblée nationale. J'ai participé à la rédaction du projet de « hub quantique » parisien.

Dans le cadre du DIM QuanTiP, je suis présente à cette journée de sensibilisation annuelle (dernière édition en janvier 2023) et je suis en contact avec des industriels, que nous cherchons à faire adhérer à un « Club QuanTiP » des entreprises.

Bilan des financements sur projet

Je liste ici les projets dont je suis la coordinatrice (hors QuanTiP) ou dans lesquels je suis impliquée significativement, d'un montant supérieur à 25 k€.

1. Coordination du projet ANR *SuperRing* (2016-2019) retenu lors de la campagne 2015 au titre du « Défi de tous les savoirs », 260 k€ dont 160 k€ pour le LPL. Expérience Rubidium, thématique anneau, partenaire Anna Minguzzi, LPMMC (Grenoble).
2. Coordinatrice d'un projet du DIM SIRTEQ en 2017 : financement de 6 mois de post-doc pour Avinash Kumar.
3. Coordination du projet COFECUB-USP de collaboration France-Brésil avec Vanderlei Bagnato, de l'Université de São Paulo, intitulé *Out Of Equilibrium Trapped Superfluid*, pour deux ans renouvelable une fois. Ce projet permet de financer deux voyages par an pour chaque partenaire, pour un chercheur et un étudiant. Les voyages n'ont pas été possibles en 2020 ni en 2021 (Covid). Le projet a été prolongé d'une année en raison de la pandémie, donc de 2019 à 2023. La visite de Vanderlei Bagnato et le séjour d'Emmanuel Mercado en décembre 2019 ont notamment été le point de départ de notre article sur la compensation de la gravité dans l'anneau³⁵.
4. 2021 : financement de 12 mois de post-doc pour Simon Thomas par le DIM SIRTEQ (porteur : Laurent Longchambon).
5. projet SIRTEQ mi-lourd Hydrolive (2021-2023), avec Quentin Glorieux (LKB) et Nicolas Pavloff (LPTMS), coordonnée par Romain Dubessy, 82 k€ pour le LPL. Je suis impliquée via l'expérience Rubidium.
6. ANR PRC Quantum-SOPHA (2021-2025), CE47, 228 k€ pour le LPL. Coordinée par Patrizia Vignolo (InPhyNi), avec Anna Minguzzi (LPMMC) et Quentin Glorieux (LKB). Coordinateur local Aurélien Perrin (expérience Sodium). J'ai participé à la constitution du consortium (suite de l'ANR avec Anna Minguzzi) et à la rédaction du projet. Je suis impliquée dans l'avancée de l'ANR, particulièrement en ce qui concerne la dynamique non linéaire. C'est dans ce cadre que nous avons lancé un projet théorique qui implique Manon Ballu.
7. ANR PCRI MICO3 (2023-2026) avec Thorsten Schumm (TUW, Vienne), coordonnée par Aurélien Perrin (expérience Sodium), 210 k€ pour le LPL. Je participe comme membre et pour l'encadrement des doctorants à ce projet centré sur la résonance de Feshbach micro-onde.
8. ANR PRC VORTECS (2023-2026), CE30. Coordinée par Romain Dubessy, partenaire Sergey Nazarenko (InPhyNi), 236 k€ pour le LPL. Je participe à la vie scientifique de ce projet sur la dynamique superfluide très hors équilibre qui est central pour l'expérience Rubidium.

5 Encadrement, animation et administration de la recherche

Au laboratoire et à l'université :

- Directrice adjointe de l'unité depuis avril 2019. Je suis en particulier représentante du laboratoire au sein de la structure fédérative de recherche NAP-MOSAIC de l'université Sorbonne Paris Nord.
- Direction de l'équipe BEC depuis 2012. L'équipe compte cinq permanents et deux à quatre doctorants ou post-doc.

- Membre du Comité de pilotage de la Structure fédérative de recherche NAP-MOSAIC de l'USPN, rassemblant les laboratoires de l'université autour des nanosciences.

En France :

- Directrice du DIM QuantIP⁴⁶ depuis 2022. Ce réseau financé à hauteur de 2,5 M€ par an par la Région Île-de-France, pour lequel j'ai monté le projet en 2021 avec une petite équipe, rassemble 650 chercheurs permanents dans 41 laboratoires. Outre l'organisation des appels à projets, nous organisons plusieurs événements par an, comme la journée scientifique du DIM et des formations à la valorisation et l'entrepreneuriat. J'ai recruté une cheffe de projet en juin 2022 pour m'aider dans cette tâche, principalement pour les aspects administratifs et organisationnels.
- Membre du conseil scientifique de l'école des Houches (2017-2021).
- Membre nommée au Conseil scientifique de l'INP 2015–2018.
- Participation à une mission de réflexion sur le rôle de l'expertise au CNRS (2020-2021), voir paragraphe 3.5.
- Membre du comité de pilotage du DIM SIRTEQ⁴⁷ sur les technologies quantiques. Responsable de l'axe Simulation quantique (2017-2021).
- Membre du bureau du GDR « Atomes Froids » 2016–2021.

Au plan international :

- Membre du Conseil — *International Advisory Committee* — de la série de conférences ICAP (International Conference on Atomic Physics) depuis 2012.
- Membre 2016-2022 du bureau de la division Physique Atomique, Moléculaire et Optique (AMOP) de la société européenne de physique (EPS). Dans ce cadre, membre du comité scientifique des conférences ECAMP 13 à Florence (2019) et ECAMP 14 à Vilnius (2022).

46. <https://quantip.org>

47. <http://www.sirteq.org>