

# **Douze Femmes en Recherche**

Variations quantiques

# Douze Femmes en Recherche

Variations quantiques

présenté par  
Jean-François Dars  
et Anne Papillault

avec le concours de  
Michèle Leduc



## *Les technologies quantiques au féminin*

*Le livre présenté ici est un ensemble de témoignages fournis par douze jeunes femmes travaillant dans le milieu de la recherche autour des thématiques de la physique quantique. Les textes rédigés par ces chercheuses sont très personnels et reflètent leur vision de ce métier si particulier que leur condition de femme ne facilite pas toujours. Ils sont illustrés par les photographies qui les a saisies en plein travail dans leurs laboratoires respectifs. Malgré les difficultés de leur tâche, rendue encore plus ardue par le confinement lié au Covid et pour certaines par les soucis redoublés de leur vie familiale, les chercheuses de ce livre se sont prêtées volontiers au jeu des séances de photographies avec Jean-François Dars et à celui de l'écriture des textes avec Anne Papillault et moi-même. Qu'elles soient ici remerciées pour leur investissement dans cette entreprise collective, ainsi que pour leur gentillesse constante.*

*La mécanique quantique est une vieille dame de plus de cent ans qui se porte très bien. Toujours pas réconciliée avec la gravitation relativiste, elle fait encore beaucoup parler d'elle. Bien que cette théorie n'ait jamais été mise en défaut, la signification de ses concepts continue de faire débat. Pourtant ses applications parfaitement maîtrisées se multiplient. Les extraordinaires progrès expérimentaux des der-*

*nières décennies permettent aujourd'hui d'observer des particules telles que des photons, des atomes ou des ions contrôlés individuellement aussi bien que collectivement. On peut alors les préparer et les manipuler en utilisant les concepts de superposition d'états quantiques ou d'intrication. L'exploitation technologique de ces idées n'en est encore qu'à ses débuts. La superposition d'états quantiques, très sensible à l'environnement, fournit des capteurs d'une précision inégalée : horloges atomiques, gyromètres, gravimètres pour des applications spatiales ou des prédictions géophysiques, tandis que toute la métrologie s'en trouve révolutionnée. Des problèmes inaccessibles aux supercalculateurs trouvent des solutions avec des simulations pour des systèmes formés d'un grand nombre d'objets quantiques en interaction. Les communications à distance vont bientôt pouvoir être mieux sécurisées grâce aux progrès de la cryptographie quantique, alors que se multiplient les travaux sur l'ordinateur quantique, le véritable graal qui focalise les rêves du public autant que des scientifiques.*

*Les nouvelles technologies quantiques suscitent un fort engouement de la part des décideurs politiques au niveau mondial. Des programmes prioritaires très bien dotés sont lancés, tels le Quantum*

*Technology Flagship européen et depuis janvier 2021 le Plan Quantique français. Ce fascinant domaine suscite déjà de colossaux investissements industriels, de multiples startups, des recherches attirant des étudiants brillants. Dès 2016 la Région Île-de-France a décidé de financer pour plusieurs années le Domaine d'Intérêt Majeur SIRTEQ (Science et Ingénierie en Région Île-de-France pour les Technologies Quantiques), un réseau de recherche sous la houlette de Philippe Grangier de l'Institut d'Optique à Palaiseau.*

*Les femmes, traditionnellement peu nombreuses dans ce champ de la science, sont très présentes dans SIRTEQ et y jouent un rôle considérable. Débutantes ou chevronnées, doctorantes ou professeures d'université, les douze chercheuses de ce livre nous font partager la fascination de leur quête, chacune sur un axe différent du quantique. Nous cheminons avec elles dans leur vie de laboratoire, faite avant tout de marche patiente à petits pas, illuminée de temps en temps par le bonheur soudain d'une découverte majeure justifiant tous les efforts.*

*Enfin je remercie le comité de pilotage de SIRTEQ d'avoir rendu ce livre possible.*

*Michèle Leduc*





## *Women in Quantum Technologies*

*This is a diverse collection of testimonies written by twelve young women who perform research in the general area of quantum physics. These highly personal musings reflect their visions of a rather special occupation, often complicated by their status as women. The texts are illustrated by pictures taken at work in their laboratory. Despite the difficulties of their task, significantly increased during the Covid period by confinement and, for some, by the worries of family life, the participants readily played the game: photography with Jean-François Dars, and text polishing with Anne Papillault and myself. We thank them all for their investment in this collective undertaking, as well as for their constant kindness.*

*Quantum mechanics is a lady over hundred years old who is doing very well. Albeit not yet having come together with relativistic gravitation, she is much talked about. Although the theory has never been faulted, the very meaning of its concepts is still under debate. Yet its perfectly mastered applications multiply. The extraordinary experimental progress of the last few decades now makes it possible to observe and control photons,*

*atoms or ions individually as well as collectively. They can be prepared and manipulated using the concepts of superposition of quantum states or entanglement. The technological development of these ideas is still in its infancy. The superposition of quantum states, which is very sensitive to the environment, provides sensors of unparalleled precision: atomic clocks, gyrometers, gravimeters for space applications or geophysical predictions; the field of metrology is revolutionized. Problems inaccessible to supercomputers are beginning to find solutions with simulations for systems made up of a large number of interacting quantum objects. Remote communications will soon be more secure thanks to advances in quantum cryptography, while an intense competition is under way regarding a possible quantum computer, a grail focussing dreams for the public as well as for scientists.*

*New quantum technologies attract a great deal of interest from political decision-makers worldwide. Well-funded priority programs have been launched, such as the European “Quantum Technology Flagship” and, since January 2021, the French “Plan Quantique”. This fascinating field is already*

*attracting colossal industrial investments, multiple start-ups and brilliant research students. In 2016 and beyond, the Île-de-France region decided to finance SIRTEQ (Science and Engineering in the Île-de-France Region for Quantum Technologies), a research network qualified as a “Major Interest Area”, under the leadership of Philippe Grangier at the Institut d’Optique in Palaiseau.*

*Traditionally, there were few women in this area of science. In SIRTEQ their presence is significant, and they play quite a role. Beginners or experienced, doctoral students or university professors, the twelve women researchers in this book, each following a different quantum axis, join us in sharing a fascination for their quest. We see them in their daily laboratory life, mostly made of patient, small advances or setbacks, illuminated from time to time by the sudden joy of a major discovery that justifies all the effort.*

*To conclude, I would like to thank the SIRTEQ steering committee for making this book possible.*

*Michèle Leduc*

## *Les multiples facettes de la recherche*

*Par goût et par curiosité, j'ai toujours été attirée par l'univers de la recherche, ce qui m'a menée pour commencer à soutenir une thèse de doctorat en optique non linéaire au sein du laboratoire Moltech Anjou de l'université d'Angers, en cotutelle avec l'université marocaine Chouaib Doukkali à El Jadida.*

*Mon premier emploi ayant été un poste d'ATER à l'université d'Angers, j'ai pu découvrir que l'enseignement et la transmission des connaissances sont des vocations puissantes. Ce furent ensuite deux post-doctorats, l'un à l'Institut de chimie séparative du CEA, à Marcoule, l'autre dans le département d'optique et techniques associées de l'ONERA à Palaiseau. Là, je me suis tournée vers les applications et confrontée à de nombreux aspects de la technologie.*

*Me voici désormais membre de la coordination du DIM (Domaine d'Intérêt Majeur) SIRTEQ, financé par la Région Île-de-France, qui rassemble la plus grande concentration européenne d'équipes*

*académiques dans le domaine des technologies quantiques. Ce qu'on attend de moi, c'est que j'en assure le fonctionnement quotidien, le pilotage et le suivi de toutes les actions qui en découlent. Toutes les chercheuses qui s'expriment dans ces pages, par-delà la variété de leurs approches, sont reliées à ce point d'ancrage et de coordination de leurs efforts qu'est le SIRTEQ, qui leur permet en plus de mieux faire connaître leurs domaines et leurs aspirations.*

*Et c'est ainsi que j'ai découvert un autre aspect de la recherche, celui de sa communication. En lien avec les autres DIMs, je me dois d'étendre et de développer l'information scientifique, que ce soit entre chercheurs ou à destination du grand public.*

*Aujourd'hui, je ne cesse d'osciller, au gré des rencontres, entre mon goût de la recherche et mon intérêt pour l'accompagnement de la recherche. Que faire ? Peut-être, en bonne logique quantique, le hasard décidera-t-il de me faire choisir les deux à la fois...*

*Hasnaa El Ouazzani*





## *The Many Facets of Research*

*Driven by taste and curiosity, I was always attracted to the world of research. So I started a doctoral thesis in non-linear optics at the Moltech Anjon laboratory at the University of Angers, in a double-tutelage with the Moroccan university Chouaib Doukkali in El Jadida.*

*My career started as an ATER at the University of Angers. This first job taught me that teaching and transmitting knowledge were very appealing activities for me. I then took two post-doctoral positions, first at the CEA's Institute of Separative Chemistry in Marcoule, then in the Department of Optics and Associated Techniques at ONERA in Palaiseau. Both arose my interest in applications and provided a large technological background.*

*I am now a member of the coordination team of the DIM (Domaine d'Intérêt Majeur) SIRTEQ, financed by the Île-de-France Region. SIRTEQ brings together the largest European concentration*

*of academic teams in the field of quantum technologies. I am expected to ensure day-to-day running of the project, and to steer and monitor all the resulting activities. All the women researchers who appear in this book with quite distinct views and purposes are tied to SIRTEQ which coordinates their efforts and also facilitates the dissemination of knowledge in their field.*

*This is how I discovered another aspect of research: communicating about it. In conjunction with other regional DIMs, my job involves extending and developing scientific information, both among researchers and for the general public.*

*Today, depending on who I meet, I constantly hesitate between my love of research and my interest in accompanying it. What should I do? Perhaps, in good quantum logic, chance will decide that I'll do both at the same time...*

*Hasnaa El Ouazzani*

Hélène Perrin  
Directrice de recherche au CNRS  
Laboratoire de Physique des Lasers  
Villetaneuse

## Dernières nouvelles des bulles



Quand j'étais enfant, j'aimais beaucoup faire des bulles de savon – avec ces petits flacons gagnés à la fête de l'école. Quand on regarde bien, les bulles ont mille couleurs, et quand la bulle est assez grosse, on voit que le savon est plus épais vers le bas : il tombe au fond.

J'aime toujours les bulles. Maintenant, celles que j'utilise sont un peu plus sophistiquées. Nous fabriquons au laboratoire une bulle immatérielle avec des champs magnétiques et des ondes radiofréquence, à la surface de laquelle nous piégeons les atomes d'un gaz. Le gaz est si froid que ses propriétés quantiques s'en trouvent exacerbées : on dit qu'il est superfluide. Au repos, le fluide se tient, lui aussi, au fond de la bulle, immobile. Mais si nous déformons très légèrement la surface de la bulle pour la faire tourner comme une toupie, le fluide tourne, de plus en plus vite, et la force centrifuge le pousse vers l'extérieur, jusqu'à ce qu'il atteigne l'équateur !

Je ne sais pas en faire autant avec du savon...

Hélène Perrin





## Latest News About Bubbles

When I was a child, I loved blowing soap bubbles —with those little bottles I won at the school fair. When you look closely, the bubbles have a thousand colours, and when the bubble is big enough, you can see that the soap is thicker at the bottom: it falls to the bottom.

I still like bubbles. Now the ones I use are a bit more sophisticated. In the laboratory we make an immaterial bubble with magnetic fields and radio frequency waves, on the surface of which we trap the atoms of a gas. The gas is so cold that its quantum properties are exacerbated: it is said to be superfluid. At rest, the fluid also lies at the bottom of the bubble, motionless. But if we slightly deform the surface of the bubble to make it spin like a top, the fluid spins, faster and faster, and the centrifugal force pushes it outwards, until it reaches the equator!

I don't know how to do that with soap...

Hélène Perrin





# Lumière dans le noir

En réfléchissant à mon parcours dans le monde de la recherche, je suis frappée de voir à quel point a changé ma vision de ce que signifie chercher, s'attarder, trouver (ou ne pas trouver). Je me souviens qu'il me semblait ironique, quand j'étais doctorante, moi qui suis attirée par la lumière comme un lézard qui se dore au soleil et pas seulement pour en étudier les propriétés les plus fondamentales, de passer toutes mes journées dans un laboratoire presque noir. J'étais étonnée que cela me pèse moins que je ne le craignais. J'étais étonnée aussi, alors que je suis plutôt dynamique de nature, par ma patience face à un métier qui nous demande de spéculer, de recommencer, de faire des erreurs, d'essayer de nouveau.

Plus tard j'ai découvert que ce métier en contenait en réalité plusieurs, non seulement la théorie et la pratique, mais dans la pratique la nécessité d'être également plombier, électricien et mécanicien. Pour revenir dès le lendemain à la pure théorie, qui nous explique simplement le pourquoi du comment. Plus tard encore je me suis demandé tout simplement si cela valait bien la peine de faire tous ces essais et tous ces efforts, sans être assurée d'aboutir à des certitudes.

Pour enfin découvrir, au gré des occasions, qu'il restait encore de rôles à apprendre et endosser, car piloter un projet de recherche, c'est comme piloter une petite entreprise, avec tout ce que cela implique, y compris face à la richesse et la variété de toutes les personnes qui la composent.

Valentina Parigi



Valentina Parigi  
Associate Professor at Sorbonne Université  
Laboratoire Kastler Brossel  
Paris



## Light in the Dark

Reflecting on my journey into the world of research, I realise how much my views have changed about what searching means: taking time, finding (or not finding). I remember how ironical it seemed to me as a PhD student—attracted to light as a lizard basking in the sun, not only to study its most fundamental properties—to spend my days in a dark laboratory. I was amazed that it was less of a burden than I had feared. Generally being rather dynamic by nature, I was also amazed by my patience in doing a job that requires speculation, starting over and over, making mistakes, trying again.

Later on I discovered that this job actually involves several others, involving not only theory and practice, but also being a plumber, an electrician and a mechanic. All followed, on the very next day, by a return to pure theory, finding simple explanations, as to whys and wherefores. At times, I simply asked myself if it was all worth so many attempts and so much effort without being sure to reach a reliable result.

And then, as opportunities occurred, I discovered that there were still so many roles to learn and to take on, because running a research project is like running a small company, with all its implications, including the resources and variety of the people who make it up.

Valentina Parigi





## Petit pas par petit pas

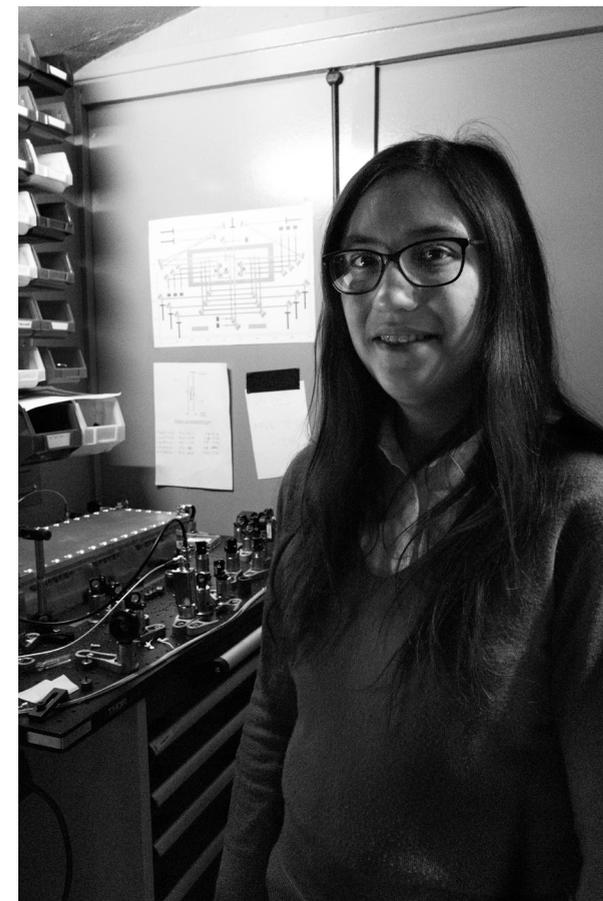
Une mesure, ce n'est pas qu'un nombre avec une unité. Une mesure c'est aussi une incertitude, des barres d'erreur qui permettent de quantifier sa précision. Celle-ci est limitée par des bruits qui peuvent provenir du système d'acquisition (électronique), de l'environnement (thermique, sismique) ou encore être plus fondamentaux (quantique). Dans mon travail je cherche à identifier ces facteurs limitants, à les quantifier et si possible à les réduire afin d'améliorer la précision de mon système.

Cette démarche de compréhension, caractérisation et optimisation, je l'applique aux différents systèmes que sont les détecteurs d'ondes gravitationnelles et les horloges atomiques qui, malgré leurs différences apparentes, ont en commun une excellente précision de mesure de la lumière.

Ce qui me passionne, c'est de pouvoir contribuer à approfondir notre compréhension du monde (en explorant l'Univers et en testant les théories le décrivant) à travers ces mesures de précision, petit pas par petit pas. Par exemple, améliorer d'un facteur 2 la sensibilité d'un détecteur d'ondes gravitationnelles en comprenant et réduisant ses bruits les plus fondamentaux, permet de multiplier par 8 le volume d'Univers accessible et d'observer des fusions de trous noirs proches du Big Bang !

Angélique Lartaux

Angélique Lartaux  
Postdoctorante à l'Observatoire de Paris  
Laboratoire Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE)  
Paris



Angélique Lartaux

Post-doctoral research fellow at Observatoire de Paris  
Laboratoire Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE)  
Paris



## Step By (Little) Step

A measurement is not just a number with a unit. A measurement is also an uncertainty, with error bars that allow its precision to be quantified. This is limited by noise which can come from the acquisition system (electronics), the environment (thermal, seismic) or even be more fundamental (quantum). In my work, I seek to identify these limiting factors, to quantify them and if possible to reduce them in order to improve the precision of my system.

I apply this approach of understanding, characterising and optimising, to different systems such as gravitational wave detectors and atomic clocks which, despite their apparent differences, have in common an excellent precision in measuring light.

What I am enthusiastic about is our possible contribution to understanding the world (by exploring the Universe and testing the theories describing it) through these precision measurements, step by step. For example, improving the sensitivity of a gravitational wave detector by a factor of 2 by understanding and reducing its most fundamental noises, makes it possible to increase the volume of the accessible Universe by a factor of 8 and to observe black hole mergers close to the Big Bang!

Angélique Lartaux





## Crypter la lumière

Mon domaine : la cryptographie quantique, ou comment utiliser les propriétés quantiques de la lumière pour sécuriser nos communications de façon inégalée, profite des interfaces. Des interfaces entre disciplines – la physique bien évidemment, théorique et expérimentale, les mathématiques, l'informatique, l'ingénierie – mais aussi, et de plus en plus, des interfaces entre le monde de la recherche et le monde industriel.

C'est un domaine que j'ai rencontré pendant ma thèse aux Etats-Unis et que je n'ai plus quitté depuis. Évoluer sur ces interfaces m'oblige à sortir de ma zone de confort, à travailler dans un environnement particulièrement stimulant, à comprendre des points de vue qui m'avaient échappé. J'aime l'évolution de mon domaine vers le développement de technologies qui sortiront dans un avenir pas trop lointain de mon laboratoire expérimental pour façonner les réseaux de communication de demain.

J'aime aussi les débats passionnés autour de son utilité (ou pas !). Faire partie d'une communauté scientifique forte et soudée par l'objectif commun de relever les multiples défis dans ce chemin m'anime tous les jours et m'amène invariablement vers de nouvelles voies à suivre.



Eleni Diamanti  
Senior Research Fellow at CNRS  
Laboratoire d'Informatique de Sorbonne Université (LIP6)  
Paris



## Encrypting Light

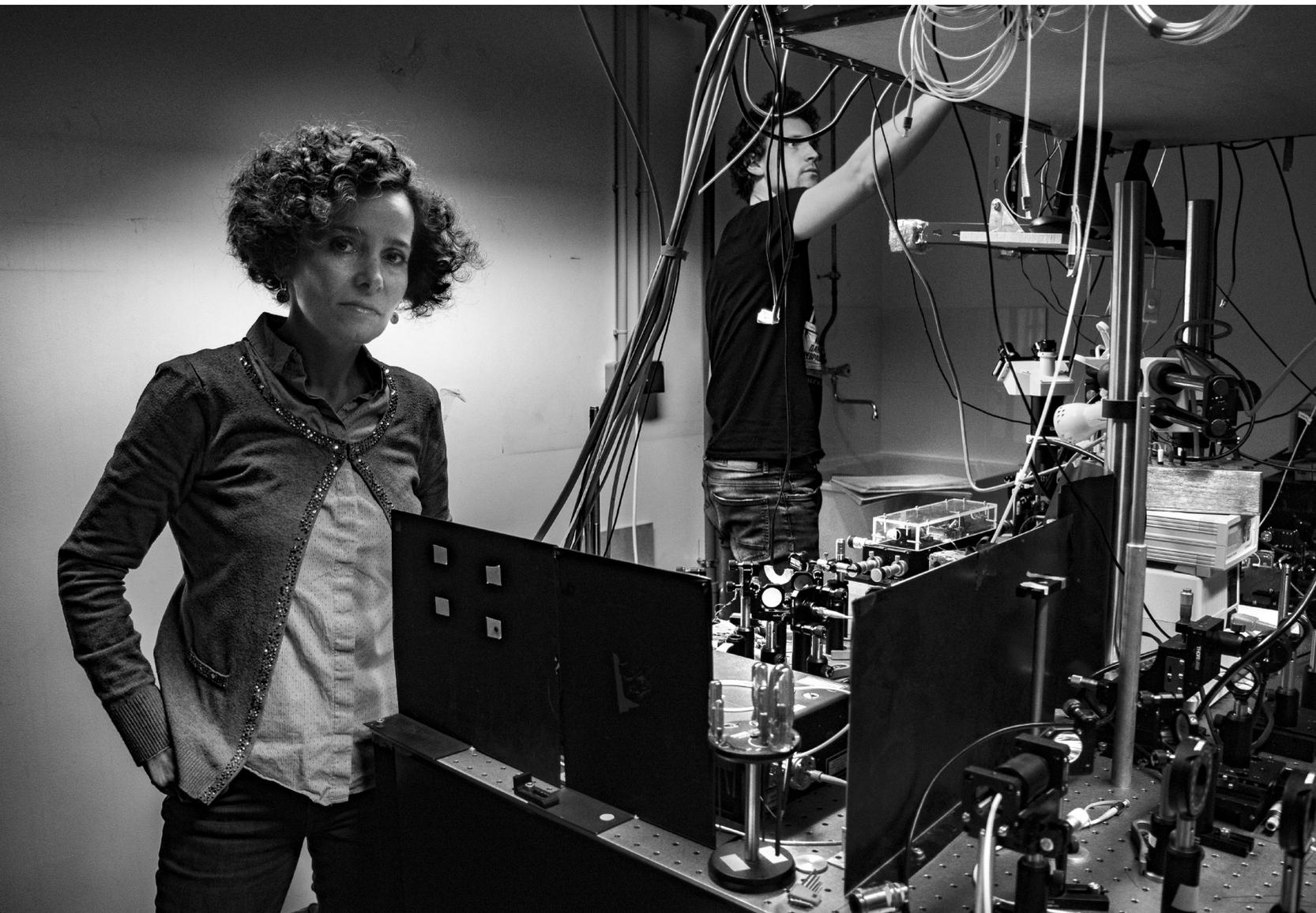
My field is quantum cryptography, or how to use the quantum properties of light to secure communications in an unparalleled way. It takes advantage of the interfaces. Interfaces between disciplines—physics of course, theoretical and experimental, mathematics, computer science, engineering—but also, and increasingly, interfaces between the world of research and the world of industry.

This is a field that I encountered during my thesis time in the United States and that I have pursued since. Working on these interfaces forces me to leave my comfort zone, to work in a particularly stimulating environment, to understand points of view that I had bypassed. I like the evolution of my field toward the development of technologies that will emerge from my experimental laboratory in the near future, in order to shape the communication networks of tomorrow.

I also appreciate the passionate debates about its (questionable!) usefulness. Being part of a strong scientific community united by a common goal, I am stimulated every day by the many challenges I encounter, which invariably lead me down new paths.

Eleni Diamanti





## Photons intriqués sur puce

La capacité de façonner et de contrôler les états de la lumière à l'échelle du photon unique a permis de mettre en évidence certaines propriétés étonnantes et contre-intuitives de la physique quantique, comme le phénomène d'intrication.

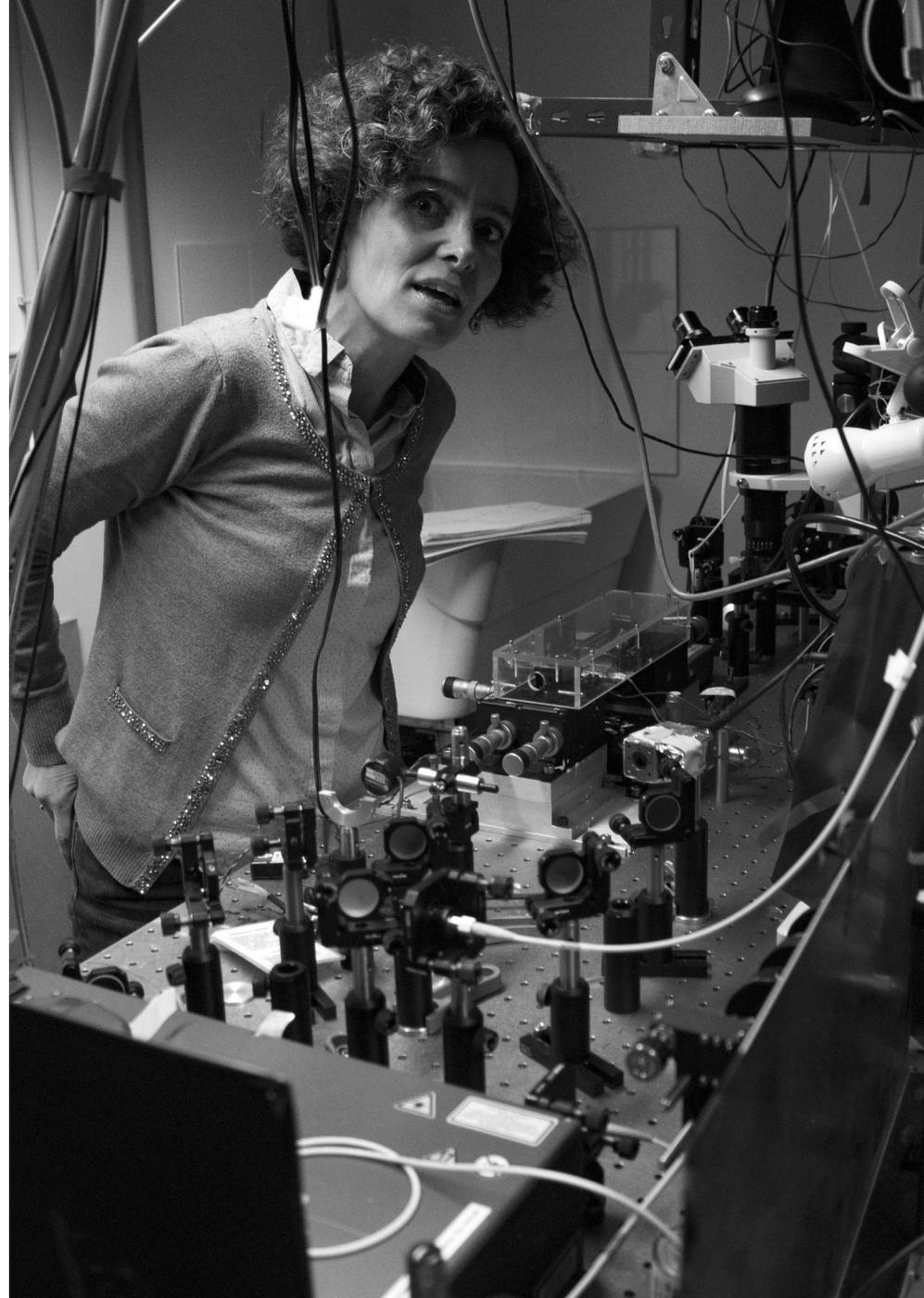
Quand deux photons sont intriqués, la mesure des propriétés de l'un permet de connaître instantanément les propriétés de l'autre, quelle que soit la distance les séparant. En plus d'être au cœur de nombreuses études fondamentales, l'intrication est aujourd'hui une ressource clé dans plusieurs domaines d'application comme les communications, le calcul, la simulation et la métrologie quantiques.

Dans mon équipe nous développons des sources de photons intriqués en matériaux semi-conducteurs, une plateforme idéale pour la miniaturisation et l'intégration de plusieurs composants quantiques sur une puce miniature et aller ainsi vers une large diffusion des technologies quantiques. C'est un beau travail collectif qui fait intervenir plusieurs types de savoir-faire : de la conception de dispositifs à leur fabrication en salle blanche, des mesures optiques à la théorie et à la proposition de nouvelles applications de ces états quantiques de la lumière. Des années de recherches et de défis passionnants s'annoncent tant en photonique théorique qu'expérimentale !

Sara Ducci

Sara Ducci  
Professeure à l'Université de Paris  
Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques  
Paris





## Entangled Photons on Chip

The ability to shape and control the states of light at the single-photon scale has revealed some surprising and counter-intuitive properties of quantum physics, such as the phenomenon of entanglement.

When two photons are entangled, measuring the properties of one photon instantly reveals the properties of the other one, regardless of the distance between them. In addition to being at the core of many fundamental studies, entanglement is now a key resource in several applications such as communications, computing, simulation and quantum metrology.

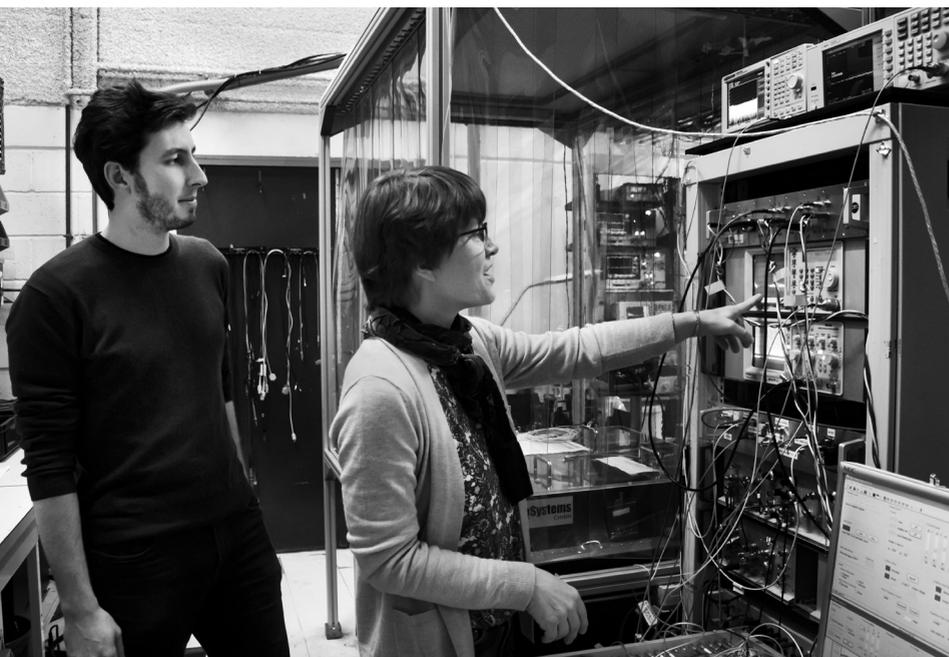
My team is developing entangled photon sources in semiconductor materials, an ideal platform for the miniaturisation and integration of several quantum components on a miniature chip, which could lead to a wide impact of quantum technologies. This is a wonderful collective enterprise involving several know-hows: from designing devices to manufacturing them in a clean room, from optical measurements to theory, resulting in proposals of new applications for such quantum states of light. Years of exciting research and challenges lie ahead in both theoretical and experimental photonics!

Sara Ducci

Sara Ducci  
Professor at Université de Paris  
Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques  
Paris



Anne Amy-Klein  
Professeure à l'université Sorbonne Paris Nord  
Laboratoire de Physique des Lasers  
Villetaneuse



## En attente de l'imprévu

Avec mes collègues de recherche, je cherche à mettre en évidence des effets fondamentaux de physique à partir d'expériences de très haute précision. Nous devons être extrêmement rigoureux dans nos montages expérimentaux pour éviter le moindre bruit parasite et arriver à détecter des signaux très faibles mais également rester ouverts à l'imprévu et essayer de nouvelles méthodes pour progresser.

En pratique je combine de l'intuition avec des raisonnements poussés, et aussi beaucoup de ténacité. Et je progresse aussi grâce aux échanges entre collègues, surtout lorsque les expériences ne donnent pas les résultats attendus.

L'enseignement est également un moteur pour mes recherches, car nous devons nous adapter aux formations variées de nos étudiants de licence et master. Ainsi nous avons toujours à évoluer et approfondir de nouvelles façons d'enseigner ou même des techniques ou théories que nous n'avions pas encore eu l'occasion d'étudier ou qui se sont développées récemment. Ainsi, après trente ans de recherche, je suis toujours curieuse d'explorer et de comprendre de nouveaux processus physiques.

Anne Amy-Klein





## Waiting for the Unexpected

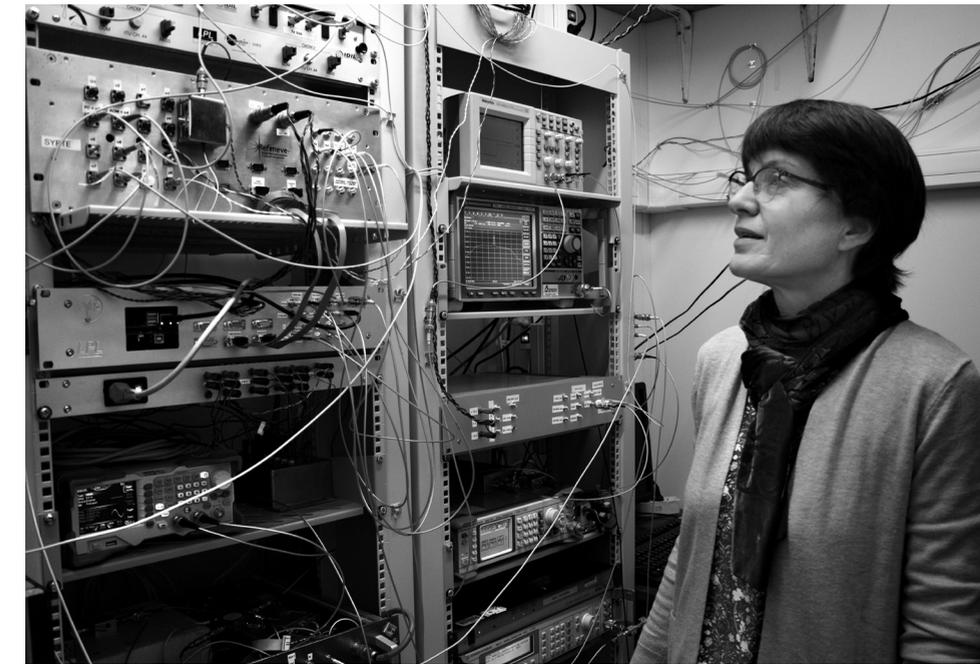
With my research colleagues, I attempt to expose fundamental physics effects using very high precision experiments. We have to be extremely rigorous in our experimental set-ups to avoid the slightest parasitic noise and manage detection of very weak signals, but we also have to remain open to the unexpected and try new methods to make progress.

In practice, I combine intuition with advanced reasoning, and also a lot of tenacity. And I also progress thanks to exchanges between colleagues, especially when experiments do not produce the expected results.

Teaching is also a driving force for my research, because we have to adapt to the varied backgrounds of our undergraduate and graduate students. We thus always evolve and deepen new ways of teaching, or even techniques or theories that we had not yet studied or that have developed recently. So, after thirty years of research, I am still curious to explore and understand new physical processes.

Anne Amy-Klein

Anne Amy-Klein  
Professor at Université Sorbonne Paris Nord  
Laboratoire de Physique des Lasers  
Villetaneuse



## Mes états multimodes rêvés et agiles

Je voudrais réaliser des états quantiques collectifs (on dit multimode, on dit aussi canevas quantique pour ces *cluster states* dont le nom est devenu moins sympathique ces derniers mois). Qu'ils croissent et qu'on puisse les distribuer avec fibres optiques.

D'autres ont montré que ces états collectifs sont une ressource pour le calcul quantique, qu'ils seront robustes et d'autant plus utiles qu'on aura pu leur faire pousser un peu, beaucoup de non « gaussianité ». D'autres en ont déjà vus ! Des spectraux (chez Valentina qui est là, page 17), des qui se tiennent la main en ribambelle, des qui se tordent en boucle. Il faut chausser la bonne paire de lunettes pour les discerner, critères et témoins à l'appui.

La paire de lunettes (en fait plus d'une paire de théories et quelques matrices pour faire bonne mesure), les critères, les témoins c'est encore la production d'autrui. Autant de chapeaux de Gibis\* à connecter à ma barrette ou mon casque à vélo (ce que j'ai de mieux en matière de couvre-chef) et à mes états multimodes rêvés et agiles.

Moi je voudrais un cluster portatif, un canevas mouchoir de poche avec juste ce qu'il faut de matière nanométrique, de couches et de structures, de matériau qui guide, qui couple, qui crée de la lumière quantique (on dit nonlinéaire). Et je voudrais que dans notre assemblée de Gibis il y ait plus de barrettes, de couettes et de casques à vélos (mais il me semble être bien entourée ici).

\*Vous connaissez les Gibis ? Ces sympathiques antagonistes des affreux Shadocks (qui ne pensent qu'à rater jusqu'à ce que ça réussisse !) ont une intelligence collective qui provient de leurs chapeaux melons. Quand un Gibi réfléchit à un problème difficile, ça passe automatiquement dans tous les autres chapeaux, et tous les Gibis se mettent à réfléchir ensemble... En fait les Gibis me font furieusement penser à mon canevas quantique ! En plus ils vivent sur une planète toute plate, ce qui n'est pas loin d'un *cluster state on chip*.

Nadia Belabas



## My Dreamy and Agile Multimode States

I would like to create collective quantum states (we say multimode, we also say quantum canvas for these cluster states whose name has become less friendly in recent months). So that they grow and that they can be distributed with optical fibres.

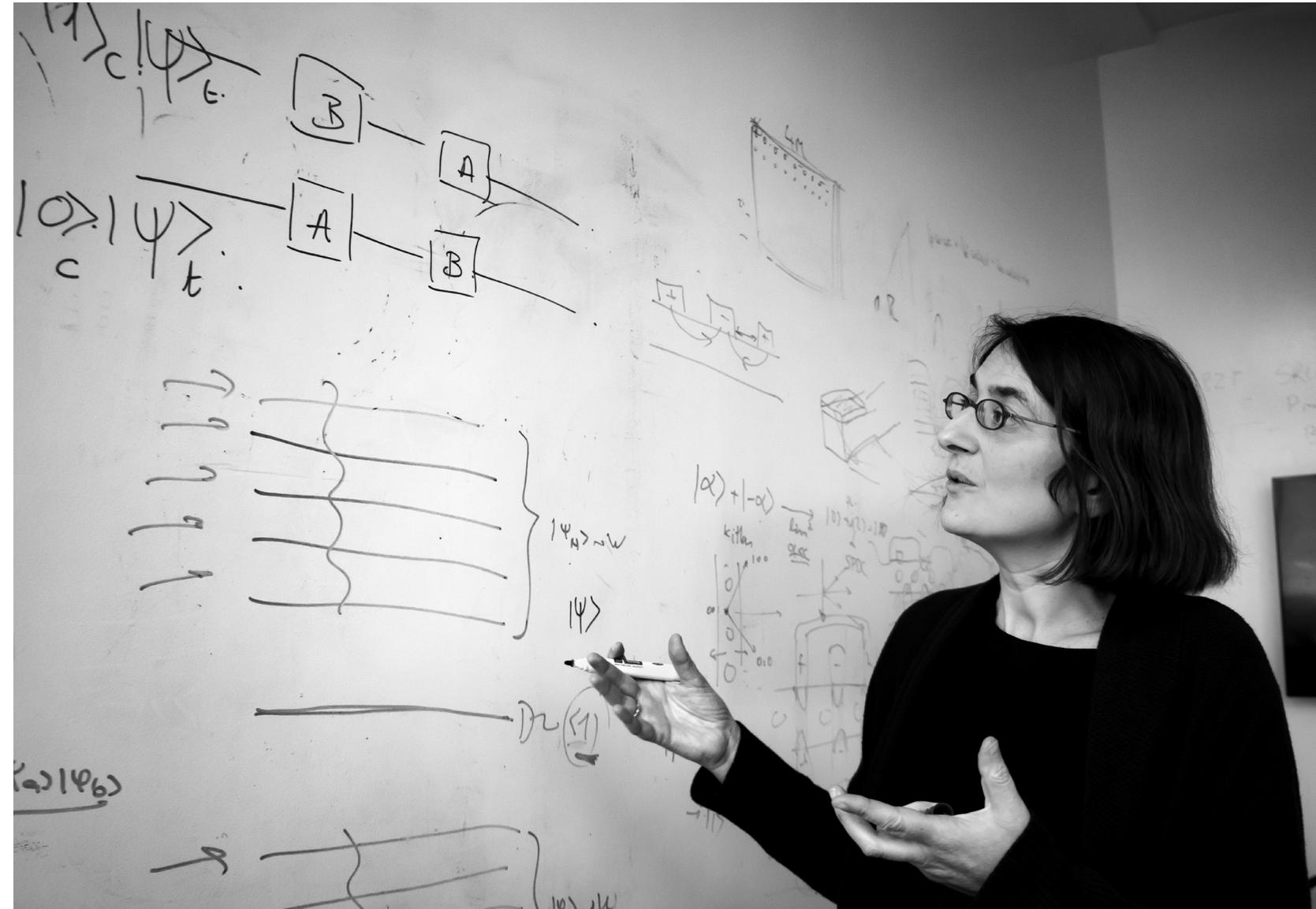
Others have shown that these collective states are a resource for quantum computation, that they will be robust and all the more useful if we can make them grow a little or a lot of their “non-Gaussianity”. Still others have already seen some of them! Some may be spectral, such as those of Valentina (page 18), some hold hands in a ribbon, some twist in a loop. You need the right pair of glasses to discern them, with criteria and witnesses to back up your observation.

The pair of glasses (in fact more than one pair of theories and a few matrices for good measure), the criteria, the witnesses are again the results of others. So many Gibi\* hats to connect to my barrette or my bicycle helmet (the best I have in terms of headgear) and to my dreamy and agile multimode states.

I would like a portable cluster, a pocket handkerchief canvas with just the right amount of nanoscale material, layers and structures, material to guide, couple, create quantum light (we say nonlinear). And I wish that in our assembly of Gibis there were more barrettes, quilts and bicycle helmets (but I seem to be well surrounded here).

\*Do you know the Gibis? These friendly antagonists of the dreadful Shadocks (who only think of failing until they succeed!) have a collective intelligence that comes from their bowler hats. When a Gibi thinks about a difficult problem, it automatically goes through all the other hats, and all the Gibis start thinking together... In fact the Gibis remind me furiously of my quantum canvas! And they live on a flat planet, which is not far from a state on chip cluster.

Nadia Belabas



Isabelle Zakine  
Professeure à Télécom Paris  
Laboratoire de Traitement et Communication de l'Information (LTCI)  
Palaiseau



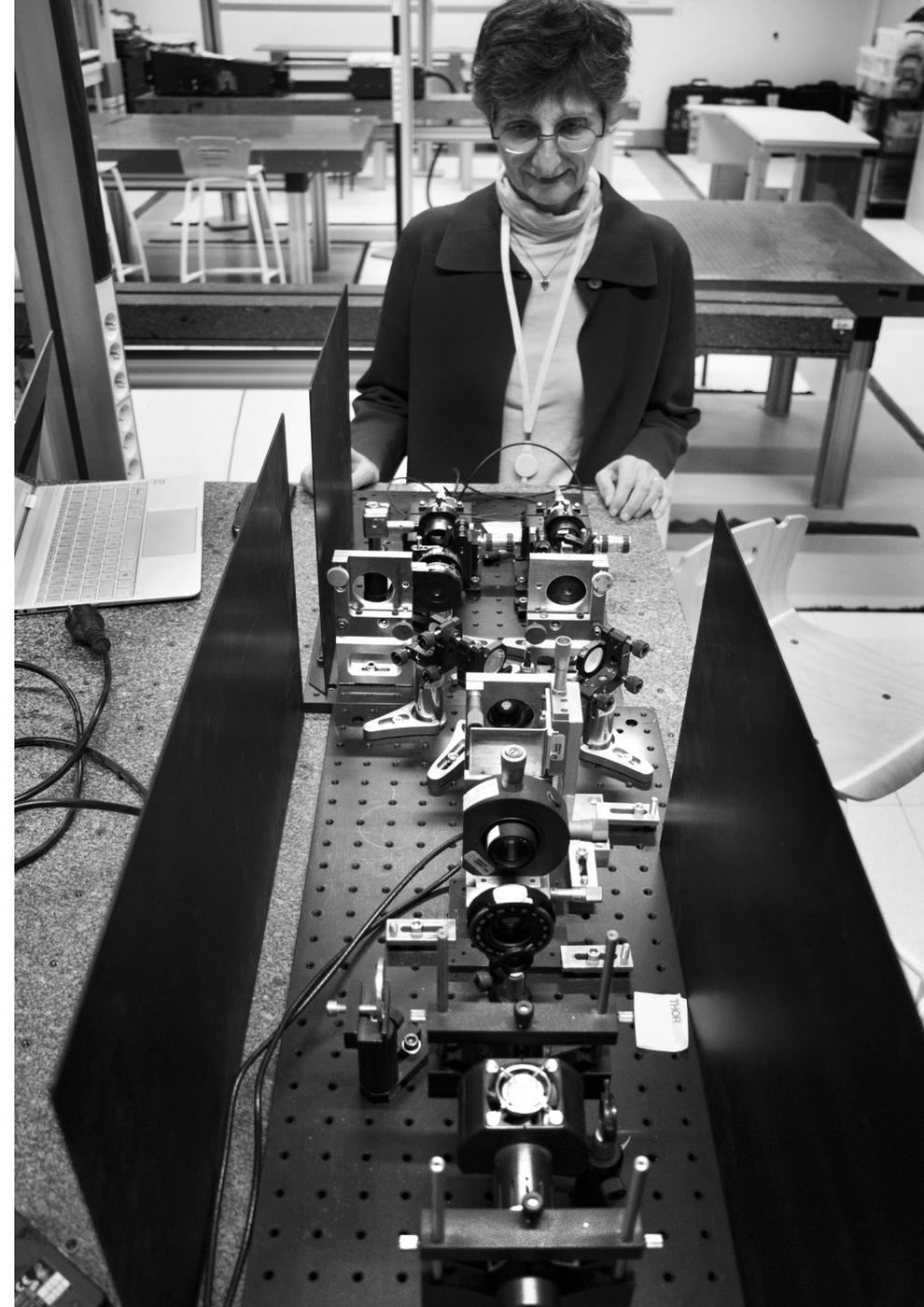
## Moments de lumière

Être expérimentatrice en optique quantique nécessite un incessant aller-retour entre des questionnements sur les principes fondamentaux de la physique quantique et des considérations beaucoup plus terre-à-terre sur comment fixer ce support pour que ce miroir soit bien positionné...

Les moments les plus gratifiants sont les déclics : ceux qui apportent de la lumière après une période obscure. On cherche à capter un signal, on sait que les photons sont là, quelque part, mais la fibre n'est pas tout à fait au bon endroit et on ne voit que le bruit électronique. Patience, adopter une stratégie de positionnement de la fibre, des déplacements micrométriques qui explorent systématiquement l'espace... Puis tout à coup on y est, le compteur s'affole, de centaines on passe à des milliers de photons par seconde et guidé par cette progression, on arrive très vite à des centaines de milliers, c'est gagné !!!

Ce peut être aussi une idée d'explication ou d'illustration qui vient tout à coup pour éclaircir une notion sur laquelle les étudiants butent année après année ou bien encore le moment où le doctorant, après s'être laissé largement guider pendant des mois, prend son sujet en main et propose une modification majeure dans le modèle ou dans l'expérience.

Isabelle Zaquine





## Moments of Light

Being an experimentalist in quantum optics requires constant give and take between questions about fundamental principles of quantum physics and the far more trivial considerations of how to fix this particular stand so that this special mirror is adequately positioned...

The most gratifying moments are the clicks: those that bring light after a dark period. We try to capture a signal, we know that the photons are there, somewhere, but the fibre is not quite in the right place and we can only see electronic noise. Patience, adopting some strategy of positioning the fibre, micrometric displacements that systematically explore space... Then suddenly we are there, the counter goes crazy, from hundreds we pass to thousands of photons per second and guided by this progression, we arrive very quickly at hundreds of thousands, we've won!

It can also be an idea for an explanation or an illustration that suddenly comes along to clarify a notion that students have been stumbling over year after year, or the moment when the doctoral student, after having been mostly guided for months, takes his subject in hand and suggests a major modification to the model or the experiment.

Isabelle Zaquine



## Théorie et pratique

Théoricienne, j'étudie des systèmes ayant des propriétés quantiques macroscopiques, comme les superfluides et les condensats de Bose-Einstein d'atomes froids.

L'objectif est double. D'une part, nous voulons apporter des contributions à la théorie des systèmes quantiques multicorps. Par exemple, nous avons généralisé et corrigé le résultat de Landau et Khalatnikov sur l'amortissement du son dans un superfluide particulier, où il résulte de processus d'interaction à quatre phonons. Ce qui est fascinant dans cette recherche est d'extraire du formalisme mathématique des résultats physiques forts et parfois inattendus.

D'autre part, nous voulons utiliser ces systèmes dans les technologies quantiques. Par exemple contrôler les corrélations quantiques dans un gaz d'hélium où chaque atome porte un spin nucléaire qui peut être utilisé comme une sonde de champ

magnétique. Avec ces études, nous explorons les subtilités de la théorie quantique, espérant que ces techniques seront réellement mises en œuvre au niveau technologique. Les applications visées sont les capteurs atomiques dont la sensibilité atteint les limites imposées par la mécanique quantique, ce qui est déjà le cas pour les horloges atomiques et pourrait devenir le cas pour des magnétomètres et gyromètres miniaturisés où les fluctuations quantiques jouent un rôle important. Pour les spins nucléaires de l'hélium qui ont un très long temps de cohérence, on envisage aussi un rôle central de « mémoire » dans les techniques de communication quantique.

Et tout cela ne serait pas possible sans les constants échanges avec les chercheurs, théoriciens ou expérimentateurs, tous aussi brillants que passionnés, avec lesquels je collabore.

Alice Sinatra



## Theory and Practice

As a theoretician, I study systems with macroscopic quantum properties, such as superfluids and Bose-Einstein condensates of cold atoms.

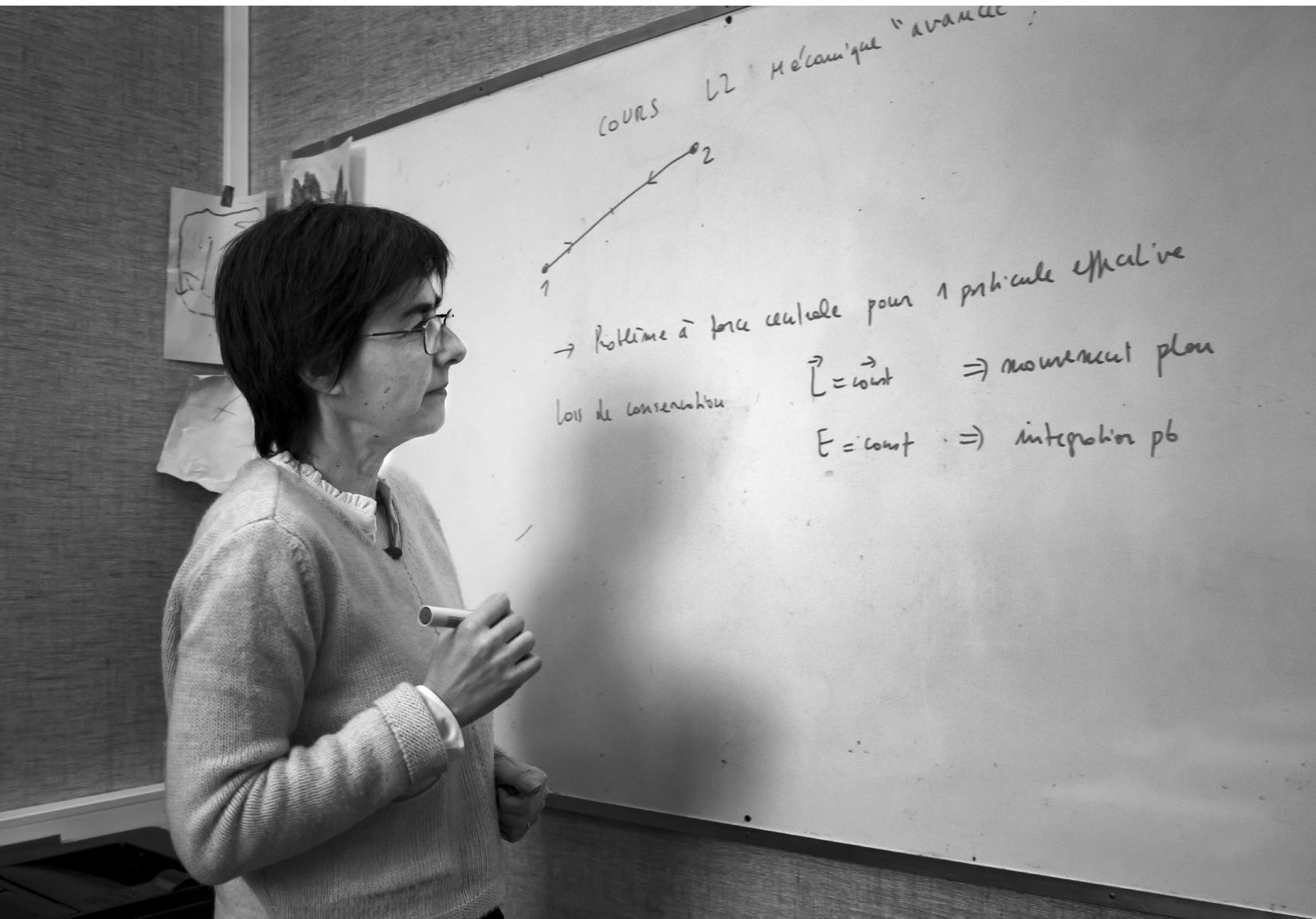
The objective is twofold. On one hand, we want to contribute to the theory of many-body quantum systems. For example, we have generalised and corrected the result of Landau and Khalatnikov on the damping of sound in a particular superfluid, where it results from four-phonon interaction processes. What is fascinating in this research is to extract from the mathematical formalism strong and sometimes unexpected physical results.

On the other hand, we want to use these systems in quantum technologies. For example, monitoring quantum correlations in a helium gas where each atom carries a nuclear spin that can be used as a magnetic field probe. With these studies, we are exploring the subtleties of

quantum theory, hoping that these techniques will actually be implemented at the technological level. The targeted applications are atomic sensors whose sensitivity reaches the limits imposed by quantum mechanics, which is already the case for atomic clocks and could become the case for miniaturised magnetometers and gyrometers where quantum fluctuations play an important role. For the nuclear spins of helium, which have a very long coherence time, a central 'memory' role in quantum communication techniques is also envisaged.

And none of this would be possible without the constant exchanges with the brilliant and passionate researchers, theoreticians and experimenters, with whom I collaborate

Alice Sinatra



Marianne Le Dantec  
Doctorante du groupe Quantronique  
Service de Physique de l'État Condensé (SPEC)  
Gif-sur-Yvette



## Traquer l'atome unique

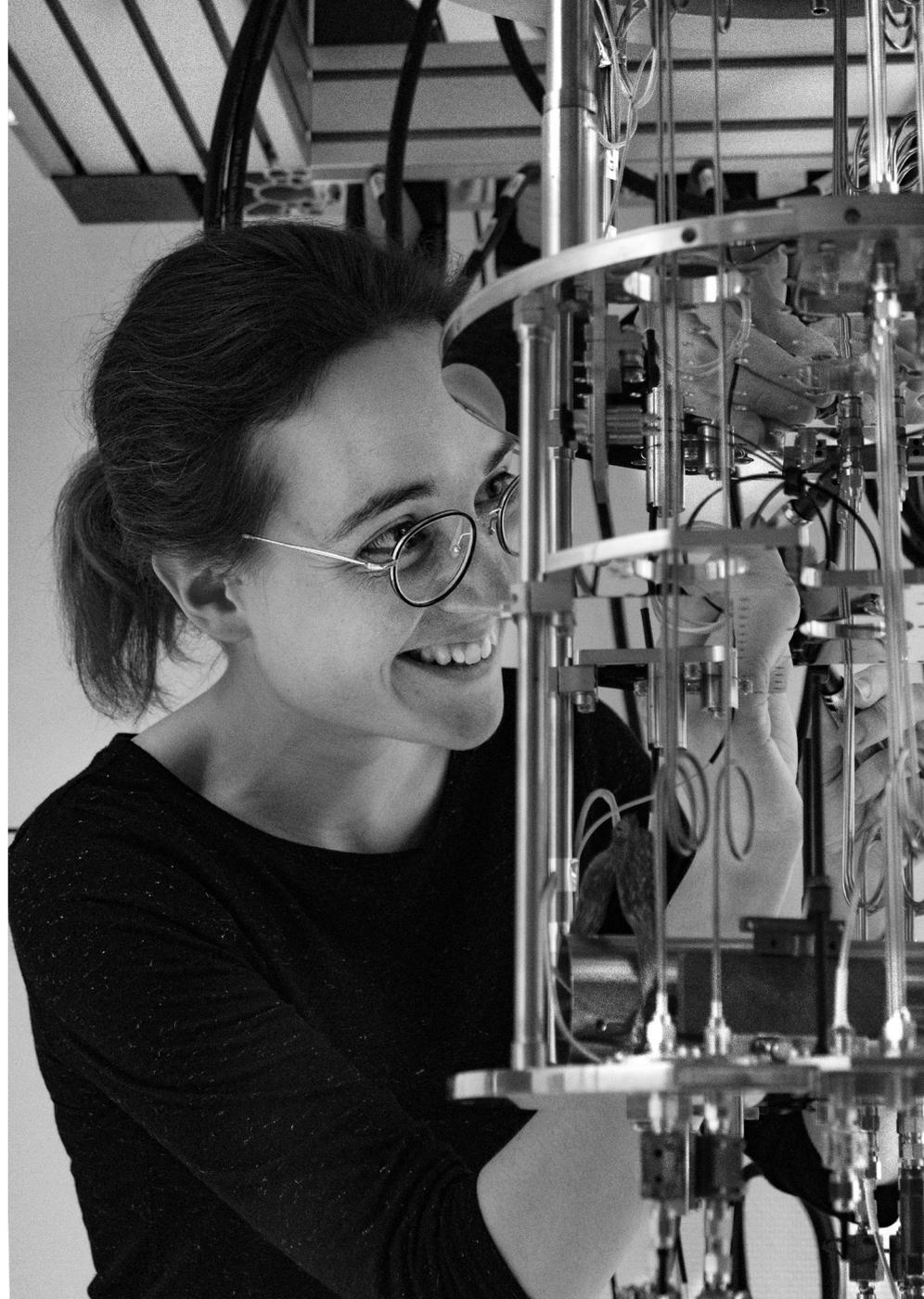
Le comportement de la matière à l'échelle de l'atome ne cesse de défier notre intuition. Pourtant, depuis le début du XXe siècle, les physiciens parviennent très bien à le décrire grâce à la mécanique quantique. Dès mon initiation à cette théorie, j'ai été fascinée à la fois par sa subtilité et par son rôle fondateur dans l'essor de technologies qui ont transformé notre société. Aujourd'hui encore, elle ouvre de nouvelles perspectives aux enjeux colossaux avec la course mondiale vers l'ordinateur quantique.

La thèse que je poursuis au sein de mon laboratoire du CEA de Saclay me plonge dans cette effervescence : il s'agit de détecter, par résonance magnétique, un atome unique qui pourra servir de support à une information dite « quantique ». Pour cela, nous concevons puis fabriquons des circuits supraconducteurs qui permettront d'atteindre ce niveau de sensibilité record.

Au quotidien, c'est un travail d'expérimentateur très varié, allant de la nano-fabrication aux mesures micro-ondes, réalisé avec une poignée de chercheurs enthousiastes. L'objectif est ambitieux, le chemin semé d'embûches, mais c'est toujours une grande satisfaction que d'observer et de comprendre, par nos expériences, les prédictions de la mécanique quantique.

Marianne Le Dantec





## Tracking Down the Single Atom

The behaviour of matter at the atomic scale continuously challenges our intuition. However, since the beginning of the 20th century, physicists have been able to describe it very well thanks to quantum mechanics. From the moment I was introduced to this theory, I was fascinated both by its subtlety and by its founding role in the development of technologies that have transformed our society. Even today, it opens up new perspectives on prominent issues with the global race towards the quantum computer.

The thesis that I am working on in my laboratory at CEA-Saclay brings me to the core of excitement: the aim is to detect a single atom by magnetic resonance and use it as a medium for so-called 'quantum' information. To do this, we design and manufacture superconducting circuits that can allow us to reach this ultimate level of sensitivity.

On a day-to-day basis, this is a very varied experimental task, ranging from nanofabrication to microwave measurements, carried out with a team of enthusiastic researchers. The objective is ambitious, the path full of pitfalls, but it is always a great satisfaction to observe and understand the predictions of quantum mechanic through our experiments.

Marianne Le Dantec

Marianne Le Dantec  
PhD candidate in the Quantronic Group  
Service de Physique de l'État Condensé(SPEC)  
Gif-sur-Yvette





## En suivant le photon

Comment la lumière interagit-elle avec la matière ? C'est un sujet que j'ai découvert dès mes premières années de thèse. Depuis, cela fera trente ans, j'explore ce processus fondamental, le photon à la rencontre de l'électron ! Et on sait désormais façonner la matière à l'échelle nanométrique, voire atomique, où les propriétés physiques sont régies par les lois de la mécanique quantique.

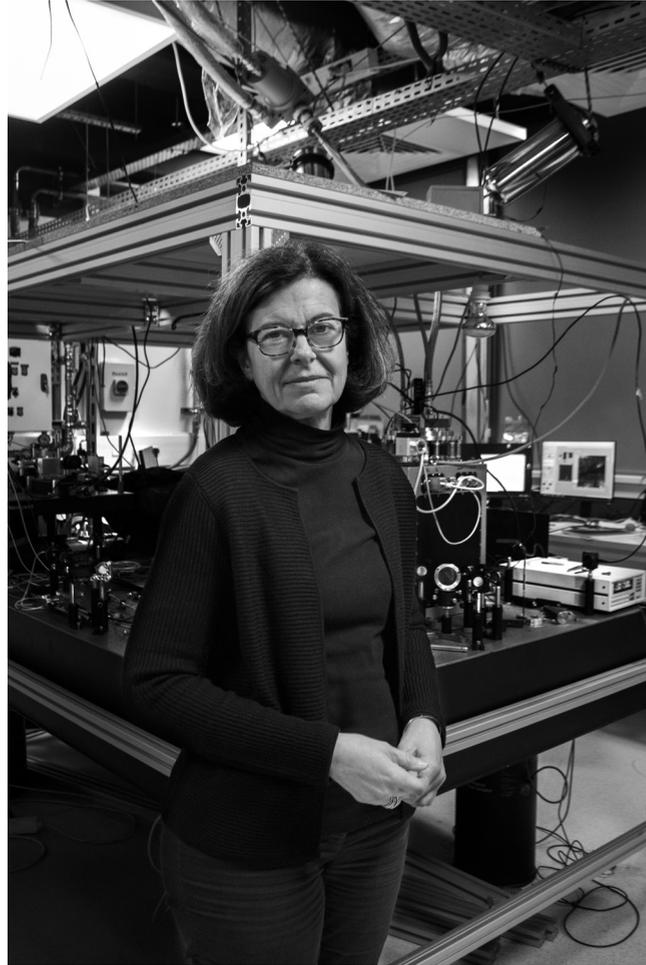
Le photon est alors non seulement une sonde puissante pour révéler ces propriétés étonnantes mais aussi un outil pour les manipuler et créer de nouvelles fonctionnalités. La matière quantique peut émettre des photons uniques et identiques à la demande, ou encore devenir le support de bits quantiques.

Mais quel travail de longue haleine, plusieurs années pour penser une expérience, la réaliser, observer et interpréter les résultats. C'est être armé de patience, être prêt à surmonter les échecs et les frustrations éventuelles, persévérer, s'obstiner. Des qualités qu'on attribue aux femmes, du fait de leur nature bien évidemment... Qui en tous cas font d'elles d'excellentes chercheuses !

Valia Voliotis



Valia Voliotis  
Professor at Sorbonne Université  
Institut des NanoSciences de Paris  
Paris



## Following the Photon

How does light interact with matter? I discovered this topic in my early years of thesis work. Ever since, for thirty years, I have explored this fundamental process, the photon meeting the electron! And we now know how to shape matter at the nanometric or even atomic scale, where the physical properties are governed by the laws of quantum mechanics.

The photon is therefore not only a powerful probe for revealing these amazing properties but also a tool for manipulating them and creating new functionalities. Quantum matter can emit single, identical photons on demand, or become the carrier of quantum bits.

But what a long job: several years to think up an experiment, carry it out, observe and interpret the results. It means being armed with patience, being ready to overcome failures and possible frustrations, persevering and being obstinate. These are qualities that are attributed to women, because of their nature, of course... which in any case make them excellent researchers!

Valia Voliotis



Saïda Guellati-Khélifa  
Professeure au Conservatoire National des Arts et Métiers  
Laboratoire Kastler Brossel  
Paris



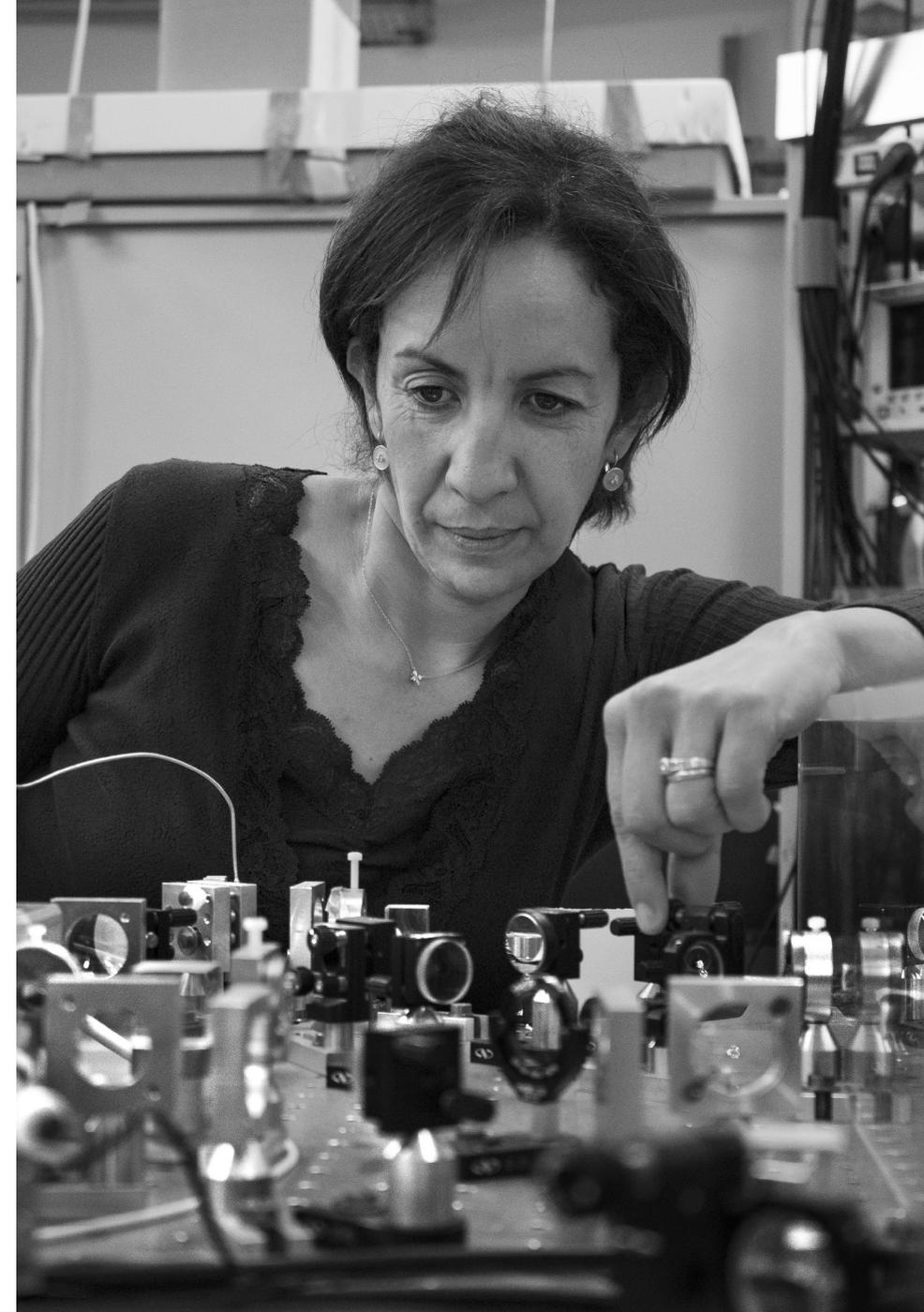
## Le (n+1)<sup>ième</sup> chiffre après la virgule

Les découvertes majeures de la physique ont été révélées par un désaccord minime entre l'expérience et les prédictions théoriques. Un exemple marquant est l'écart de 1 % observé en 1947 entre les valeurs théorique et expérimentale du moment magnétique de l'électron. Ce fut l'un des indices qui ont conduit les physiciens à comprendre que le « vide physique » est le siège d'événements fugaces consistant en la création et l'annihilation de particules et d'antiparticules.

L'interprétation de ce résultat a contribué au fondement de l'électrodynamique quantique, le « joyau de la physique » selon Richard Feynman. Ainsi, la quête de la précision n'est pas un vice de physiciens pinailleurs, loin de là, mais plutôt une aventure passionnante autant sur le plan expérimental que théorique. Nous construisons des expériences pointues tout en étant à l'affût de nouvelles méthodes pour affiner et purifier nos gestes sur l'expérience. Nous cherchons en même temps à comprendre des phénomènes physiques souvent très subtils pour rendre nos mesures encore plus exactes.

La quête de la précision est un jeu d'énigme passionnant, dont l'objectif est de scruter des failles dans l'extraordinaire édifice théorique construit par des générations de physiciens. L'histoire a montré que la nouvelle physique et même les secrets les mieux gardés de la nature se cachent toujours derrière la valeur du (n+1)<sup>ième</sup> chiffre après la virgule.

Saïda Guellati-Khélifa





## The $(n+1)^{\text{th}}$ Digit After the Decimal

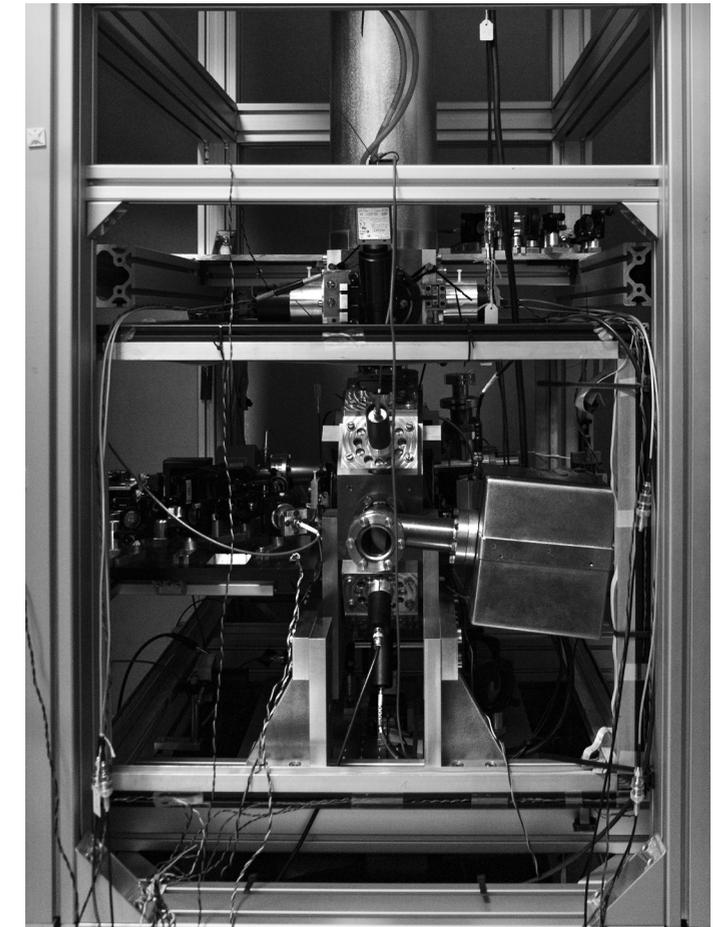
Saïda Guellati-Khélifa  
Professor at Conservatoire National des Arts et Métiers  
Laboratoire Kastler Brossel  
Paris

Major discoveries in physics were born from a slight disagreement between experiment and theoretical predictions. A prominent example is the 1% discrepancy observed in 1947 between the theoretical and experimental values of the electron's magnetic moment. This was one of the clues that led physicists to understand that transient events occur in the 'physical vacuum', namely the creation and annihilation of particles and antiparticles.

The interpretation of this result contributed to the foundation of quantum electrodynamics, the "jewel of physics" according to Richard Feynman. So the quest for precision is not a latent defect of nitpicking physicists. On the contrary it is rather an exciting adventure both experimentally and theoretically. We build cutting-edge experiments while at the same time we look for new methods to refine and improve our handling of experiment. At the same time, we seek to understand physical phenomena, often very subtle ones, in order to make our measurements even more accurate.

The quest for precision is an exciting puzzle game, the aim of which is to look for cracks in the extraordinary theoretical edifice built by generations of physicists. History has shown that new physics and even the best kept secrets of nature are always hidden behind the value of the  $(n+1)$  the digit after the decimal point.

Saïda Guellati-Khélifa



# Les laboratoires et leurs tutelles

## **Laboratoire de Physique des Lasers (LPL)**

Université Sorbonne Paris Nord  
CNRS

## **Laboratoire Kastler Brossel (LKB)**

École normale supérieure (PSL)  
Collège de France (PSL)  
Sorbonne Université  
CNRS

## **Laboratoire Charles Fabry**

Institut d'optique Graduate School  
Partenariat avec l'Université Paris-Sud  
CNRS

## **Laboratoire Système de Référence Temps-Espace (SYRTE)**

Laboratoire National de Métrologie et d'Essai (LNE)  
Observatoire de Paris  
Université PSL  
Sorbonne Université  
CNRS

## **Laboratoire d'Informatique de Sorbonne Université (LIP6)**

Sorbonne Université  
CNRS

## **Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques**

Université de Paris  
CNRS

## **Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N)**

Université Paris-Saclay  
CNRS

## **Laboratoire de Traitement et Communication de l'Information (LTCI)**

Télécom Paris  
Institut Mines Télécom  
Institut Polytechnique de Paris  
CNRS

## **Service de Physique de l'État Condensé (SPEC)**

Université Paris-Saclay  
CEA  
CNRS

## **Institut des NanoSciences de Paris (INSP)**

Sorbonne Université  
CNRS

# SIRTEQ

## Le réseau des technologies quantiques en Île-de-France

Les chiffres parlent : 32 laboratoires, 112 équipes, 850 chercheurs répartis dans toute l'Île-de-France, voici ce qu'est SIRTEQ, où les recherches vont de la physique atomique et moléculaire à l'optique, de la physique de la matière condensée aux nanosciences, en passant par l'informatique, les mathématiques et l'ingénierie. Ce vaste réseau gravite, on l'a vu, autour des technologies quantiques envisagées comme une des clefs de rupture face aux défis sociétaux du futur. En retour, ces recherches appliquées ouvrent sur des études fondamentales autour de projets collaboratifs, débouchant sur des innovations remarquables dans un contexte international pourtant ultra-compétitif.

SIRTEQ prend en compte des enjeux de civilisation tels que la liberté et la sécurité des communications mondiales, utilisant toutes les ressources de la mécanique quantique appliquée au domaine de la lumière, jouant délibérément des interfaces, entre disciplines comme entre les mondes académique et industriel. SIRTEQ s'attache aussi au transfert des savoirs pour développer la curiosité et le goût des sciences dans le public, ce vivier où jeunes gens et jeunes filles se forment à leur métier de demain.

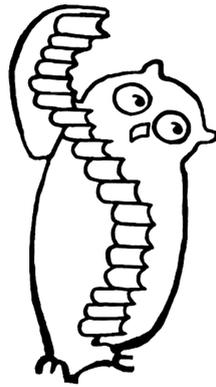
## The network of quantum technologies in Île-de-France

*The figures speak for themselves: 32 laboratories, 112 research groups, 850 researchers all over the Ile-de-France region. Such is SIRTEQ, with research ranging from atomic and molecular physics to optics, from condensed matter physics to nanoscience, via computer science, mathematics and engineering. SIRTEQ's vast network revolves around quantum technologies, which are viewed as key to breakthroughs in future societal challenges. Conversely, applied research in the area opens up basic studies around collaborative projects, leading to remarkable innovations in a highly competitive international context.*

*SIRTEQ involves issues such as freedom and security of global communications, using all the resources of quantum mechanics and light, deliberately playing with the interfaces between disciplines and between the academic and industrial worlds. SIRTEQ is also committed to the transfer of knowledge, stimulating curiosity and a taste for science in the public, notably among young men and women who are training for their future careers.*

# Index

Amy-Klein Anne	32
Belabas Nadia	36
Diamanti Eleni	25
Ducci Sara	29
Guellati-Khélifa Saïda	56
Lartaux Angélique	21
Le Dantec Marianne	48
Parigi Valentina	17
Perrin Hélène	12
Sinatra Alice	44
Voliotis Valia	53
Zaquine Isabelle	40
<i>Pour le SIRTEQ</i>	
El Ouazzani Hasnaa	8
Leduc Michèle	4



## Table des matières

Michèle Leduc – <i>Les technologies quantiques au féminin</i> .....	4
Hasnaa El Ouazzani - <i>Les multiples facettes de la recherche</i> .....	8
Hélène Perrin – <i>Dernières nouvelles des bulles</i> .....	12
Valentina Parigi – <i>Lumière dans le noir</i> .....	17
Angélique Lartaux – <i>Petit pas par petit pas</i> .....	21
Eleni Diamanti – <i>Crypter la lumière</i> .....	25
Sara Ducci – <i>Photons intriqués sur puce</i> .....	29
Anne Amy-Klein – <i>En attente de l'imprévu</i> .....	32
Nadia Belabas – <i>Mes états multimodes rêvés et agiles</i> .....	36
Isabelle Zaquine – <i>Moments de lumière</i> .....	40
Alice Sinatra – <i>Théorie et pratique</i> .....	44
Marianne Le Dantec – <i>Traquer l'atome unique</i> .....	48
Valia Voliotis – <i>En suivant le photon</i> .....	53
Saïda Guellati-Khélifa – <i>Le (n+1)ième chiffre après la virgule</i> .....	56
Laboratoires .....	60
SIRTEQ .....	62
Index .....	63



Jean-François Dars (photos) et Anne Papillault (mise en page) ont longtemps été documentaristes au CNRS. Par la suite ils ont réalisé et publié (Éditions Belin) *Les Déchiffreurs* avec les mathématiciens gravitant autour de l'IHÉS puis *Le plus grand des hasards*, avec une constellation de physiciens quantiques, ainsi que *Au cœur des atomes froids* avec l'IFRAF (Éditions Rue d'Ulm). Depuis 2011 ils produisent sur leur site web ([www.lbx.fr](http://www.lbx.fr)) une série de brefs romans-photos de la recherche : les *Histoires courtes*.

*Jean-François Dars (photographer) and Anne Papillault (designer) were long-time documentary filmmakers at CNRS. Later and independently, they directed and published Les Déchiffreurs (Éditions Belin) with the group of mathematicians interacting around IHÉS, as well as Le plus grand des hasards with a constellation of quantum physicists. With IFRAF, they also directed and published Au cœur des atomes froids (Éditions Rue d'Ulm). Since 2011, they have also produced over a hundred short "photo novels of research and researchers": Histoires courtes, freely available on their website [www.lbx.fr](http://www.lbx.fr).*

Imprimé par XXXX ???, Espagne  
Dépôt légal : mois ??? 2021