

Les exploratrices de l'infiniment petit

Innovation. Ces chercheuses pourraient bien remettre la France et l'Europe en tête de la révolution quantique.

PAR GUILLAUME GRALLET

Peut-on encore être étonné par la physique quantique, cette exploration de l'infiniment petit dont on s'est rendu compte – ô surprise – qu'elle n'obéit pas aux mêmes règles que celles que nous appréhendons au quotidien ? Ce champ de recherche, à l'origine d'un bouillonnement intellectuel, qui, au début du XX^e siècle, a mobilisé la crème des chercheurs du monde entier, de Niels Bohr à Albert Einstein, en passant par l'Autrichien Erwin Schrödinger, la Franco-Polonoise Marie Curie ou encore l'Allemand Max Planck, a conduit à s'intéresser à l'interaction entre la lumière et la matière, à l'échelle la plus microscopique possible.

Étourdissante découverte en effet que ce monde où les échanges d'énergie se font avec des quanta, des niveaux d'énergie déterminés par la fréquence de la lumière. Un feuillet on électrons, photons et atomes ont les rôles principaux. « Comprendre leur interaction a joué un rôle crucial dans la création des transistors, des GPS, des lasers, des panneaux solaires photovoltaïques ou de la fibre optique », explique le consultant Olivier Ezratty, auteur du livre en libre accès *Comprendre l'informatique quantique*. Surtout, elle est au cœur de recherches qui pourraient avoir des applications aussi différentes que la création de nouvelles molécules thérapeutiques, participer à la mise au point de matériaux supraconducteurs, ou encore repousser les limites de la me-

sure de précision. D'ici quelques années, le GPS atteindra une précision inédite, jusqu'à 0,3 mm, ce qui sera très précieux non seulement pour mesurer la dérive des continents, mais aussi la fonte des glaces ou la résistance d'un gratte-ciel.

Ce monde totalement contre-intuitif a fait naître des joutes verbales restées dans l'Histoire. Dont celle-ci : en 1927, Niels Bohr, s'appuyant sur un dessin griffonné sur un tableau, se vit, dans un salon de l'hôtel Métropole à Bruxelles, interpellé par Einstein : « *Laissons un moment l'incertitude et les probabilités de côté... Dieu ne joue pas aux dés, M. Bohr !* » Et le Danois de rétorquer : « *Mais qui êtes-vous, M. Einstein, pour savoir ce que Dieu fait ou ne fait pas ?* » Le débat reprit avec la même vigueur durant plusieurs jours devant le Français Louis de Broglie !

Bonne nouvelle, un peu moins de cent ans plus tard, la France possède des compétences de tout premier plan dans ce domaine ! Ainsi du spécialiste du stockage d'informations par des électrons, Albert Fert, et de Serge Haroche,

lui aussi Prix Nobel, qui, naviguant entre l'optique, l'électricité et le magnétisme, s'est attaché à montrer le rôle essentiel que les interrogations sur la lumière ont joué dans l'élaboration de notre représentation de l'univers. Ou d'Alain Aspect, qui, en 1982, démontrait expérimentalement le principe de l'intrication quantique, qui veut que, dans certains cas, deux particules, même éloignées l'une de l'autre, prennent instantanément la même valeur.

Ce principe est à l'origine de la seconde révolution quantique, qui comprend plusieurs grands domaines d'applications, de la promesse d'un ordinateur plus puissant que n'importe quel supercalculateur actuel à des télécommunications sécurisées, ou encore une lecture ultrafine des variations des champs gravitationnels, qui pourrait permettre, par exemple, une meilleure représentation des sous-sols – utile dans la recherche des matières premières ou en archéologie. En astronomie, on entrevoit la découverte de nouvelles exoplanètes grâce au traitement de données déjà collectées mais inexploitable à ce jour. Et la relève est bien là, comme le montrent les neuf scientifiques que nous avons décidé de mettre en avant pour la qualité de leurs recherches. Des femmes qui, installées dans toute la France, venues d'Italie, de Russie ou d'Iran, ont envie d'en découdre ! Des hussardes de l'innovation, dont certaines sont à l'origine de start-up, comme VeriQloud, lancée par Elham Kashefi, directrice de

L'interaction entre lumière et matière est une des clés de l'innovation scientifique et technologique.

- Alexia Auffèves -

«La science est la mère des technologies»

Mission Directrice de recherche CNRS à l'Institut Néel de Grenoble et coordinatrice de Quantum Engineering Grenoble (QuEnG), qui fédère les acteurs de l'écosystème quantique grenoblois. Enseignante à l'université Grenoble-Alpes.

Parcours ENS Lyon, agrégée de physique, licence en philosophie et thèse de physique quantique dans le groupe de Serge Haroche au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS Paris en optique quantique.

Recherche et applications Théoricienne de l'optique quantique et de la thermodynamique, elle veut s'assurer que la consommation d'énergie sera raisonnable au gré de l'augmentation de leur puissance.

Vision Il faut continuer à financer la recherche fondamentale et développer le couplage à l'industrie en respectant les logiques et les temps propres de chacune – en s'inspirant par exemple du Center for Quantum Technologies de Singapour.

La licenciée en philosophie souhaite développer de nouvelles synergies grenobloises autour des questions d'éthique de l'innovation.

Auteurs préférés Fred Vargas, qui



met en scène un commissaire atypique et contemplatif: Adamsberg résout les énigmes en «*pelletant les nuages*», ce qui lui permet de capturer les intuitions distillées par son inconscient. Étienne Klein, qui met en garde contre les dangers de l'ultra-crépitarisme, la récente tendance généralisée à se prendre pour un expert.

recherche au CNRS. Elles animent des écosystèmes quantiques régionaux, comme Alexia Auffèves à Grenoble et Eleni Diamanti à Paris. Elles pilotent des projets stratégiques, comme Maud Vinet sur la filière des ordinateurs quantiques à base de composants en silicium. Leurs travaux sont sur le point de bouleverser aussi bien l'ingénierie, la fabrication de semi-conducteurs, ou encore la cybersécurité.

Recherche fondamentale. Ces combattantes de l'inconnu s'attaquent aux défis scientifiques les plus ardues, comme la mise au point, par Virginia D'Auria, de télécommunications sécurisées, en s'appuyant sur la lumière, «*un vecteur idéal pour le transport de l'information*». Combattante de l'improbable également, Hélène Perrin, qui exploite «*des phénomènes physiques très peu accessibles à notre intuition quotidienne: un photon peut ainsi être à la fois bleu et rouge tant que l'on ne cherche pas à connaître sa couleur...*» «*Un électron peut passer par deux chemins à la fois*», confirme la chercheuse Pascale Senellart, qui, avec la start-up Quandelà, crée des sources de photons de qualité unique au monde, ce qui permettra de mettre un jour au point des ordinateurs quantiques. Certes, il existe encore des défis – de taille – à relever. La mise au point d'un tel ordinateur implique des calculs à une température proche de la plus basse qui puisse exister ($-273,15\text{ °C}$) et pour une durée ne dépassant même pas un millième de seconde. ■■■

- Elvira Shishenina -

«Résoudre des problèmes parfois impossibles»

Mission Responsable de la recherche et applications en calculs quantiques chez BMW et présidente de QuantX, le groupement des polytechniciens des technologies quantiques.

Parcours Née à Mamontovo, en Sibérie, diplômée en mathématiques de l'université d'État de Novossibirsk. Thèse de doctorat en mathématiques à l'Inria.

Recherche et applications Résoudre plus vite et parfois avec plus de précision des problèmes parfois impossibles à résoudre classiquement. L'amélioration dans les simulations des systèmes moléculaires et des processus physiques, dans le raisonnement des systèmes d'IA et de protection des données permettra de créer des nouveaux matériaux pour le stockage durable de l'énergie, de construire des systèmes auto-

nomes intelligents plus performants et d'assurer une communication sécurisée.



- Elham Kashefi -

Rétablir la confiance et la vie privée

Mission Directrice de recherche CNRS au laboratoire LIP6 de Sorbonne Université, professeure d'informatique quantique à l'école d'informatique de l'université d'Édimbourg.

Parcours Née en Iran, études de mathématiques à Téhéran, doctorat en informatique à l'Imperial College de Londres en 2003.

Recherche Étudie le vaste champ des logiciels quantiques (simulation, modélisation, vérification) couvrant toutes sortes de plateformes technologiques de qubits (photons, supraconducteurs, ions piégés, atomes froids) et de télécommunications quantiques.

Applications La mise au point d'un Internet et de télécommunications sécurisées grâce aux technologies quantiques. Elle a cofondé VeriQloud pour mettre au point de telles solutions.

Vision Cette infrastructure de télécommunications doit permettre de rétablir la confiance et la vie privée.



■■■ Si elles peuvent mener leurs rêves jusqu'au bout, ces chercheuses ont la capacité de remettre l'Europe au centre du jeu. «*On ne fera ni un Google ni un Amazon européen. C'est regrettable, mais cela ne sert à rien de regarder vers le passé*», explique l'économiste Nicolas Bouzou, pour qui «*l'issue est de se développer sur des sujets qui ne sont pas préemptés par les Américains et par les Chinois*». Il cite l'exemple des ordinateurs quantiques, sur lesquels le commissaire européen Thierry Breton, un passionné du sujet, travaille actuellement. D'où l'intérêt de l'ouverture internationale de nos chercheuses: Eleni Diamanti est impliquée dans les projets de la grande initiative du Quantum Flagship européen basé sur les communications quantiques, et Maud Vinet pilote le projet de recherche européen sur les ordinateurs quantiques à base de composants en silicium.

Les chercheuses ont d'ailleurs leur avis sur notre organisation, qu'elles aimeraient moins bureaucratique. «*L'ampleur des tâches administratives s'est accrue depuis quinze ans*», regrette ainsi Hélène Perrin. Tout comme moins centralisée. «*Il est primordial de décloisonner le plus possible les savoirs*», expliquent de concert Virginia D'Auria et Alexia Auffèves. L'idée est enfin de miser sur la recherche fondamentale, qui donnera des résultats sur le long terme. «*La science est la mère de toutes les technologies*», rappelle Alexia Auffèves.

Découvrez les parcours de ces dignes héritières de Marie Curie, qui assistait elle aussi aux rencontres de Bruxelles avant d'être invitée par Hoover à visiter la Maison-Blanche en 1929. Les recherches actuelles autour de l'intrication quantique, un phénomène dans lequel deux particules présentent des états dépendants l'un de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare, laissent entrevoir une possibilité de téléportation... Comme une invitation à suivre le voyage hardi de ces quadras vers l'inconnu ■

Leurs travaux vont bouleverser l'ingénierie, la fabrication de semi-conducteurs, la cybersécurité.

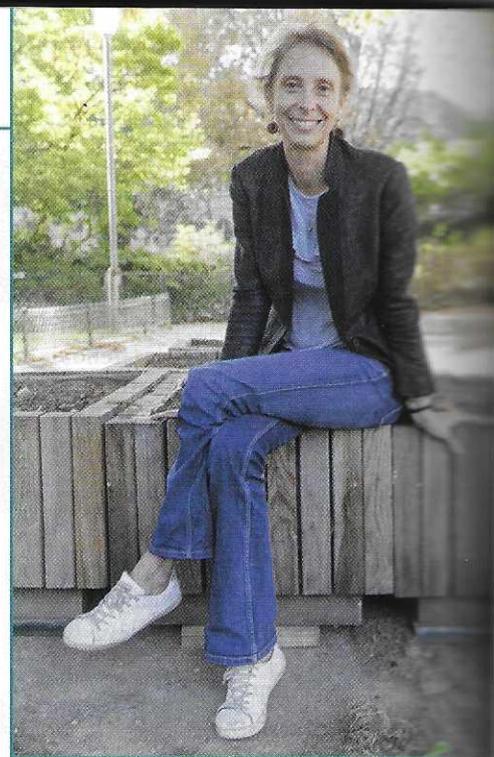
- Maud Vinet -

Le pari du silicium

Mission Responsable du projet d'accélérateur quantique sur silicium au sein du CEA de Grenoble. Elle pilote aussi un projet du Quantum Flagship européen dévolu aux qubits silicium qui regroupe 19 laboratoires de recherche et entreprises en Europe autour de la création de puissants calculateurs quantiques.

Parcours Thèse de physique de l'université de Grenoble, après un diplôme d'ingénieur de l'École nationale supérieure de physique de Grenoble, auparavant responsable de l'équipe d'intégration des transistors avancés au sein du CEA-Leti. Elle a aussi travaillé chez IBM à New York en partenariat avec STMicroelectronics.

Recherche et applications Promeut la filière des qubits silicium, qui est une bonne candidate pour réaliser des ordinateurs quantiques en valorisant la filière



de la microélectronique française. **Vision** De nombreux champs disciplinaires doivent interagir pour construire un accélérateur quantique capable de résoudre des problèmes du quotidien. Promeut la diversité d'expression de points de vue, de compétences et de sensibilité.

- Eleni Diamanti -

« Appréhender les problèmes avec un angle différent »

Mission Directrice de recherche CNRS au laboratoire d'informatique LIP6 de Sorbonne Université à Paris. Codirige la fédération de recherche PCQC (Paris Centre for Quantum Computing).

Parcours Née en Grèce, génie électrique et informatique

à la polytechnique d'Athènes, thèse à l'université Stanford aux États-Unis. En France depuis 2006. **Recherche** Travaille sur le futur de réseaux de communication reliant des systèmes quantiques (serveurs, postes de travail, processeurs, capteurs) via des liens sécurisés, afin d'ouvrir la voie à des applications concernant le calcul délégué ou encore la protection des télécommunications sur de longues distances.

Vision «*Il y a de très bonnes forces et de bons moyens pour la recherche en France.*» Pourtant, celle qui a adoré *L'Anomalie* d'Hervé Le Tellier regrette le fait qu'il y ait «*beaucoup trop de bureaucratie*» dans notre pays. «*Il est important de réfléchir à une vraie valorisation du travail des chercheurs et aux moyens pour pérenniser leurs efforts*», explique celle qui aime appréhender les problèmes «*avec un angle différent. C'est enrichissant et stimulant pour tout le monde*».



- Hélène Perrin -

Comprendre les superfluides

Mission Directrice de recherche CNRS au laboratoire de physique des lasers (LPL) de l'université Sorbonne Paris Nord.

Parcours École polytechnique, puis thèse au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS Paris.
Recherche Étudie la dynamique superfluide des gaz quantiques, qui se manifeste à une température proche du zéro absolu, lorsque la vitesse des atomes devient ultrafaible (environ 1 mm/s).
Applications Les atomes froids assurent la synchronisation des horloges de tous les ordinateurs (communications, transports...) et permettront de simuler (quantiquement) de futures molécules innovantes pour la chimie.

Vision La recherche en physique quantique allie des concepts théoriques pouvant heurter notre intuition.

Déclat La rencontre du Pr Jean Dalibard, avec qui elle a fait son stage de fin d'études.



- Virginia D'Auria -

« Une mauvaise note m'a donné envie d'étudier la physique »

Mission Maîtresse de conférences à l'université Côte d'Azur (UCA), affectée à l'Institut de physique de Nice, un laboratoire UCA-CNRS.

Parcours Doctorat de l'université de Naples, puis chercheuse en postdoctorat au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS Paris.

Recherche et applications Jouer sur la lumière est un vecteur idéal pour le transport de l'information quantique. Rassembler en une seule puce plusieurs fonctions optiques sert à la mise en œuvre de télécommunications sécurisées.



Vision La recherche actuelle s'appuiera aussi sur la cryogénie, l'ultravide, le laser ou le câblage supraconducteur.
Déclat Après une mauvaise note, elle a dû se mettre à étudier la physique sérieusement et a découvert que cela la passionnait énormément.

Combats Très sensible à l'importance de la culture scientifique auprès de non-spécialistes, qui permet une approche éclairée et sereine.

- Pascale Senellart -

« La pression internationale de plus en plus forte »

Mission Directrice de recherche CNRS au Centre de nanosciences et nanotechnologies du CNRS et de l'université Paris-Saclay. Cofondatrice de la start-up Quandela.

Parcours École polytechnique, doctorat de physique quantique de l'université Pierre-et-Marie-Curie, puis passée par Schlumberger, Thales, au CNRS depuis 2002.

Recherche et applications Étudie des composants semi-conducteurs produisant des photons pour générer et manipuler des bits quantiques optiques, avec, à la clé, des ordinateurs quantiques et des télécommunications quantiques. Elle a cocréé Quandela pour commercialiser les composants issus de ses travaux.

Déclat Enfant, elle habitait en banlieue orléanaise et se rendait le week-end chez ses grands-parents vignerons à Quincy, dans le Cher. En chemin, elle passait devant la station de radioastronomie de Nançay, avec ses immenses radiotélescopes: elle y a effectué un stage de troisième, pendant lequel elle a attrapé le virus de la recherche.

Vision La pression internationale est de plus en plus forte et les moyens distribués aux laboratoires de plus en plus faibles. Tous les chercheurs passent maintenant un temps incroyable à réaliser une quantité toujours plus grande de travail administratif. Par ailleurs: la valeur d'un étudiant n'est pas déterminée à 18 ou 20 ans!



- Jacqueline Bloch -

« Allier des concepts contraires à l'intuition à des technologies de pointe »

Mission Directrice de recherche CNRS au C2N, professeure chargée de cours à l'École polytechnique, membre de l'Académie des sciences.

Parcours Cette fille de physiciens a suivi des cours de l'ESPCI, titulaire d'un DEA de physique du solide.

Recherche Simulation des propriétés de la matière avec des réseaux de piège à lumière. Conception de nouveaux dispositifs photoniques tels que des microlasers, des circuits pour la lumière qui sont insensibles au désordre, ce qui aidera pour la création de capteurs quantiques ultraprécis.

Vision Une recherche interdisciplinaire allie des concepts contraires à l'intuition à des technologies de pointe très concrètes. « Il est très important de valoriser et de reconnaître le travail d'équipe. »

