


n° 84

AVRIL 2026

Revue de la Société
Française de Physique
www.refletsdelaphysique.fr

de la **PHYSIQUE** *reflets*



Les simulateurs quantiques

SFP Société
Française
de Physique

cnrs

Dynamique des fluides
**Les lois étranges
de la nanofluidique**

Physique du désordre
**Localisation d'Anderson
des atomes**

Physique des solides
**Propriétés optiques
de feuillet atomiques**

Du nouveau dans *Reflets de la Physique*

Dans son éditorial du précédent numéro de *Reflets de la Physique*, la présidente de la SFP Élisabeth Giacobino faisait part de la réflexion stratégique actuellement en cours à la SFP. Celle-ci vise à adopter une stratégie ciblant au mieux la communauté de la physique de façon à défendre la science et son rôle dans la société. Notre revue, *Reflets de la Physique*, a évidemment un rôle important à jouer dans cette démarche et son comité de rédaction a travaillé ces derniers mois pour imaginer quelques évolutions et actions nouvelles destinées à l'accompagner. La décision a été prise d'introduire dans la revue des nouveautés que nous présentons ici et dont certaines se concrétisent dans ce numéro. Cette réflexion a également été inspirée par les retours des lecteurs et lectrices collectés lors de la dernière enquête de lectorat (voir *Reflets de la Physique* 68 (2021) 48).

La première responsabilité de la SFP pour atteindre ses objectifs est de consolider, voire d'augmenter le nombre de ses adhérents. Celui-ci se caractérise par un déficit marqué chez les jeunes et au sein des entreprises. Aussi, la place des jeunes physiciens et physiciennes dans la revue va être développée, avec l'introduction dès le prochain numéro d'une « page Jeunes », s'appuyant sur le « réseau Jeunes » de la SFP. Ce sera un espace d'expression, de visibilité et de structuration pour la nouvelle génération. En ce qui concerne les entreprises, *Reflets de la Physique* va amplifier la publication d'articles sur des sujets touchant à l'ingénierie et à l'industrie. Les entreprises partenaires des organismes de recherche seront sollicitées pour qu'elles publient des articles sur les travaux menés conjointement. Cela concernera les grandes entreprises industrielles autant que les *start-ups*.

Une deuxième condition pour atteindre les objectifs stratégiques est le développement d'un sentiment d'appartenance à la communauté des physiciens et physiciennes. Parce qu'elle est distribuée à tous les membres de la SFP, notre revue a là un rôle important à jouer et ses rubriques *Au sein et autour de la SFP* et *Reflets de la Physique et ses lecteurs* s'y prêtent bien. À partir du prochain numéro, nous allons y créer un espace de dialogue sous la forme d'un courrier des lecteurs, qui est annoncé dans ce numéro, page 74, et qui sera animé et modéré par Michèle Leduc. Des sujets d'intérêt général (le métier de physicien, l'enseignement de la physique, physique et société...) pourront y être abordés, mais les lecteurs et lectrices seront également invités à réagir à tel ou tel article publié dans un précédent numéro. Par ailleurs, nous allons amplifier la collaboration avec les sections locales de la SFP, dont le réseau constitue la base de la circulation de l'information. Elles seront encouragées à proposer pour publication les initiatives locales qu'elles organisent et à diffuser leurs bonnes pratiques. Une correspondante des sections locales a été nommée au sein du comité de rédaction de *Reflets de la Physique*, en la personne de Titaina Gibert.

L'ouverture à d'autres champs disciplinaires est une troisième condition. Elle se manifeste, dès ce numéro, par un rapprochement entre *Reflets de la Physique* et *L'Actualité Chimique*, revue de la Société Chimique de France. Il se traduit par la publication d'informations sur le sommaire de la revue partenaire, la reprise d'articles, la préparation de dossiers ou de numéros en commun et par une participation croisée aux comités de rédaction. Au-delà, *Reflets de la Physique* doit s'ouvrir vers les autres composantes de la vie intellectuelle et de la société. Nous prévoyons la publication d'articles « à double regard » coécrits par un·e physicien·ne et par un·e spécialiste d'un autre domaine, philosophe, artiste, économiste...

Nous espérons que cette évolution de notre revue marquera une nouvelle étape positive et satisfera vos attentes en tant que lecteurs et lectrices.

Stefano Panebianco,
président du comité de rédaction de *Reflets de la Physique*, et
Hervé Arribart,
rédacteur en chef de *Reflets de la Physique*

Sommaire

- 2 **Éditorial. Du nouveau dans *Reflets de la Physique***
Stefano Panebianco et Hervé Arribart

Sciences et technologies quantiques

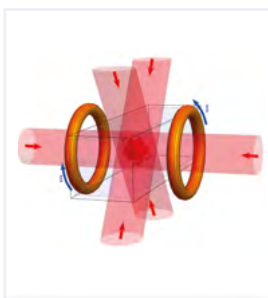
- 4 **La simulation quantique : une introduction**
Michèle Leduc
- 7 **Calcul et simulation quantiques avec des matrices d'atomes de Rydberg**
Thierry Lahaye
- 12 **Des atomes ultrafroids piégés dans des champs optiques superoscillants**
David Wilkowski et Vincent Mancois

Avancées de la recherche

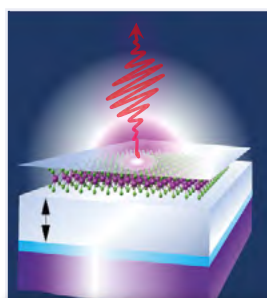
- 17 **SMILE : La magnétosphère terrestre bientôt dévoilée grâce aux rayons X**
Dimitra Koutroumpa
- 22 **Une croix d'Einstein révèle un halo de matière noire**
Pierre Cox
- 26 **Localiser les atomes dans le désordre**
Nicolas Cherroret
- 30 **Invariance du temps de parcours des ondes dans les systèmes complexes**
Sylvain Gigan et Matthieu Davy
- 34 **Contrôle des propriétés optiques de feuillets atomiques**
Xavier Marie, Cédric Robert et Thierry Amand
- 41 **Les lois étranges de l'infiniment petit fluide**
Nikita Kavokine et Lydéric Bocquet

Hommage à Pierre Radvanyi

- 47 **Les multiples facettes d'un personnage hors du commun**
Monique Bordry et Michel Spiro
- 48 **Le double exil de Pierre Radvanyi**
D'après l'article écrit par Pierre Radvanyi
- 50 **Un scientifique sans cesse en quête de nouveaux horizons**
Thierry Hennino
- 54 **Pierre Radvanyi à la Société Française de Physique**
Madeleine Veyssié
- 56 **Pierre Radvanyi et la diffusion de la culture scientifique**
Renaud Huynh



Localiser les atomes dans le désordre p.26



Propriétés optiques de feuillets atomiques p.34

En couverture : Une matrice constituée de 600 atomes de rubidium individuellement piégés dans des pinces optiques, utilisée pour des applications de simulation quantique. La distance entre deux atomes voisins est de 6 microns. (Voir article page 7)



© Thierry Lahaye, LOF, CNRS et IOGS.

Histoire des sciences

- 58 **Joseph Pérès (1890-1962) Mathématicien, mécanicien, dans son siècle**
François Charru

Au sein et autour de la SFP

- 64 **La physique de la maternelle au collège avec *La main à la pâte***
David Jasmin
- 68 **Hommage à Bart van Tiggelen**
- 70 **Vie de la SFP**
- 72 **Prix scientifiques**

Reflets de la Physique et ses lecteurs

- 74 **Note de lecture**

Comité de rédaction

Président : Stefano PANEBIANCO

Membres : Hervé ARRIBART - Michel BELAKHOVSKY - Christian BRACCO - Jean-Marie BROM - David CÉBRON - Christian CHARDONNET - Nicolas DELERUE - Magali DELEUIL - Jean FARAGO - Titaina GIBERT - François GRANER - Jean-Pierre HULIN - François JULIEN - Michèle LEDUC - Arnaud LE PADELLEC - Gladys MASSIERA - Philippe MENDELS - Charles de NOVION - Marios PETROPOULOS - Virginie PONSINET - Sophie REMY - Pascale ROUBIN

Ce numéro a été préparé avec la participation de CNRS Physique.

Directeur de la publication : Pierre CHAVEL

Rédacteur en chef : Hervé ARRIBART

Réalisation graphique : Laetitia MORIN - laetitiamorin@free.fr

Suivi de rédaction : Agathe CYMER

Communication : Alexis BARDEUR - communication@sfphysique.fr

Service publicité : Bernadette DUFOR - bernadette.dufour@edpsciences.org

Dépôt légal : 2^e trimestre 2026 - ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777

© Société Française de Physique - Édité à 3000 exemplaires

Imprimé par DUPLIPRINT, 733 rue Saint-Léonard, 53100 Mayenne

Société Française de Physique, 33 rue Croulebarbe, 75013 Paris

Tél. : 01 44 08 67 10

e-mail : secretariat@sfphysique.fr - Serveur : www.sfphysique.fr

Reflets de la Physique

Contact : reflets@sfphysique.fr - Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

La simulation quantique : une introduction

Michèle Leduc (michele.leduc@lkb.ens.fr),

Laboratoire Kastler Brossel, École normale supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

Cet article poursuit les analyses proposées par *Reflets de la Physique* sur les sciences et technologies quantiques à l'honneur dans le cadre de la célébration des 100 ans de la physique quantique lancée en février 2025. Après une introduction historique sur la physique quantique d'Elisabeth Jacobino (n°81), un entretien avec Sara Ducci sur la communication quantique (n°82), un résumé des interprétations de la mécanique quantique par Franck Laloë (n°83), voici un point sur la simulation quantique.

Cet article vient dans ce numéro de *Reflets de la Physique* en complément de ceux de Thierry Lahaye sur le calcul et la simulation quantiques avec des matrices d'atomes de Rydberg, page 7, et de David Wilkowski et Vincent Mancois sur les atomes ultrafroids piégés dans des champs optiques superoscillants, page 12.

Il se présente comme un panorama très général des objectifs et des méthodes de ce riche domaine de la physique où s'impliquent avec succès un nombre important de laboratoires et de startups en France.

Les objectifs de la simulation quantique

Pour présenter l'ambition de ce pilier fondamental des technologies quantiques, citons l'introduction d'un article paru dans *Reflets de la Physique* en 2022^(a) :

« La compréhension de la matière, des objets, plus généralement des systèmes physiques qui nous entourent peut se révéler ardue. C'est notamment le cas des systèmes à N corps, présentant des propriétés émergentes : le comportement de l'ensemble ne se déduit pas de celui des constituants élémentaires seuls. Ces systèmes sont multiples, des noyaux aux naines blanches, en passant par les supraconducteurs, et pour beaucoup d'entre eux, comprendre leur comportement est d'un intérêt majeur, scientifique et technologique ».

Dans cet article de référence, les auteurs soulignent les limites des observations pour comprendre ces systèmes à N corps : ainsi, pour la matière à l'état solide, on ne peut faire que des mesures d'ensemble et non pas sur chaque particule constituant le matériau. Certes, on peut envisager des simulations numériques, mais la complexité du calcul croît de façon polynomiale avec N, et encore plus dramatiquement

(exponentiellement) avec N dans le monde quantique, où chaque particule peut occuper plusieurs états simultanément d'après le principe de superposition. Les supercalculateurs modernes ne peuvent décrire l'état d'un tel système au-delà de quelques dizaines de particules. Appréhender sa dynamique temporelle reste largement hors de portée ou requiert d'importantes simplifications. La simulation numérique classique étant limitée à de faibles valeurs de N, il peut être profitable de la remplacer par la méthode alternative qu'est la simulation quantique.

Voici le moment de citer Richard Feynman qui en énonça le principe au début des années 1980 :

"I'm not happy with all the analyses that go with just the classical theory, because nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy."^(b)

L'idée de base de la simulation quantique est simple : elle consiste à utiliser un système quantique contrôlable pour imiter le comportement du système d'intérêt réel, lui aussi quantique, mais beaucoup plus complexe. Le système « simulateur » est



Richard Feynman en 1984.

façonnable et contrôlable à loisir, car ses constituants élémentaires peuvent être facilement manipulés et observés. Il se comporte comme le système original, est régi par les mêmes équations, mais présente l'avantage que le physicien a sur lui un contrôle total.

La méthode est utilisée pour comprendre les propriétés de molécules en chimie quantique, de certains éléments en biologie, de matériaux exotiques comme ceux qui servent pour la communication quantique

ou la physique de l'état solide. Pour la matière condensée, différents phénomènes macroscopiques peuvent ainsi être caractérisés, comme des transitions de phase, par exemple en magnétisme (apparition du ferro ou antiferromagnétisme). Un intérêt particulier s'attache aux matériaux supraconducteurs à basse température, qui font depuis des décennies l'objet de recherches toujours sujettes à de grandes frustrations. Le Graal est de comprendre suffisamment leurs propriétés pour imaginer la composition et la structure de nouveaux matériaux qui seraient supraconducteurs à température ambiante (la limite actuelle est de -135°C à pression atmosphérique). Le problème difficile à résoudre est celui des corrélations quantiques qui existent entre les constituants élémentaires du matériau, en particulier les électrons.

Au-delà de ces exemples en physique ou en chimie où l'application est directe, la simulation quantique peut aussi être appropriée pour la résolution de problèmes d'optimisation à multiples paramètres corrélés, qui reviennent à trouver le minimum d'un estimateur et qu'on peut calquer par analogie sur un problème physique, notamment un système de *spins* en interaction. Ces problèmes se retrouvent partout dans l'industrie (optimisation de réseaux, par exemple) ou dans la banque et dans l'assurance (minimisation de risques). En témoignent les nombreuses collaborations entre grandes compagnies (Airbus, Thales, EDF, Crédit Agricole...) et *start-ups* (Pasqal, Quandela, WeLinq...).

Comment mettre en œuvre la simulation quantique ?

Un dossier spécial dans un numéro de *Nature Physics* cite quelques plateformes de simulation quantique avec des atomes neutres, des ions, des photons et des circuits supraconducteurs (la liste n'est pas exhaustive)^(c). Ces plateformes ne sont pas vraiment en concurrence ; chacune fournit des éléments complémentaires et leurs visions s'enrichissent les unes les autres. D'une façon générale, et quelle que soit la nature de la plateforme de simulation, il faut commencer par une mise en perspective de la méthode en énonçant les caractéristiques d'un système quantique qui va servir de simulateur^(d):



[...] la simulation quantique [...] consiste à utiliser un système quantique contrôlable pour imiter le comportement du système d'intérêt réel, lui aussi quantique, mais beaucoup plus complexe.



- Le simulateur quantique possède un système de bosons ou/et de fermions avec ou sans degré de liberté interne. Les particules sont piégées dans un réseau ou au moins confinées dans une région de l'espace. Le système dans son ensemble possède un grand nombre de degrés de liberté.
- Le simulateur quantique doit pouvoir se préparer (approximativement) dans un état quantique connu, idéalement un état pur, bien que dans certains cas il puisse être intéressant d'étudier la dynamique d'un mélange statistique.
- Il faut pouvoir mettre en œuvre des interactions avec des champs extérieurs ou entre les différentes particules, et ceci avec des paramètres accordables. Les interactions peuvent être locales (c'est-à-dire entre particules voisines) ou à longue portée. Le simulateur peut comporter un réservoir s'il s'agit de simuler la dynamique de systèmes ouverts.
- Il faut pouvoir faire des mesures sur le système, soit en sondant quelques sites particuliers sur un réseau, soit par une mesure collective qui ne sonde pas les sites individuels. Idéalement, il faudrait pouvoir faire une seule mesure et pouvoir la répéter.
- La vérification de la simulation quantique est impossible, sauf si on peut la comparer à la solution trouvée classiquement (mais alors quel est l'intérêt de faire une simulation quantique ?). Toutefois, on peut, par exemple, augmenter le taux de confiance en faisant fonctionner le simulateur pour des problèmes dont les solutions sont connues et augmenter progressivement la taille du système ou la durée de la simulation.

Les plateformes pour la simulation quantique

Avec des atomes froids^(e,f)

Les atomes froids sont des gaz très dilués, à des températures proches du zéro absolu, confinés dans des pièges immatériels faits de lasers et de champs magnétiques, parfaitement isolés de leur environnement. Du fait des interférences entre les ondes atomiques, les atomes en nombre important (des milliers, voire des centaines de milliers) peuvent constituer des échantillons macroscopiques. Les interactions entre particules peuvent dépendre de leur état interne (l'orientation de leur *spin*) et on peut les faire varier à volonté avec des champs magnétiques (résonances de Feshbach). La disposition des atomes peut être libre, par exemple dans une boîte optique en 2D^(a), ou bien ordonnée dans des réseaux optiques. De tels réseaux sont faits d'ondes stationnaires de lumière où les atomes se piègent dans des sites adjacents, reproduisant en pratique un système de *spins* localisés en réseau. Une alternative consiste à piéger les atomes froids un par un avec des pinces optiques en contrôlant très précisément leur position. Les atomes froids portés par laser dans des états de Rydberg très excités ont entre eux des interactions fortes à longue portée. Ils fournissent depuis quelques années des systèmes de simulation quantique très prometteurs (voir l'article de T. Lahaye, page 7). Les systèmes à atomes froids sont avant tout employés pour simuler le magnétisme quantique, la dynamique non linéaire et la physique des matériaux fortement corrélés.

>>>

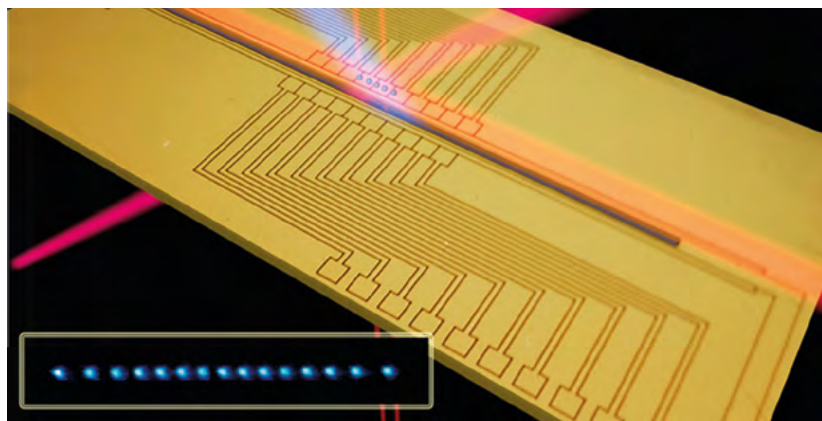


Image d'ions calcium en ligne, refroidis et contrôlés dans un piège électromagnétique (on parle de piège de Paul). Au sein du piège, deux ions voisins sont séparés par 10-20 μm . Le piège est réalisé sur une puce électronique, où des fils parcourus par des courants créent les champs électriques et magnétiques nécessaires au piégeage. Les ions à l'intérieur du piège sont détectés par fluorescence à l'aide d'un faisceau laser (ici en bleu). Le système sert pour la simulation et le calcul quantiques. (Courtoisie : Rainer Blatt, IQOQI, Innsbruck.)

>>>

Avec des ions^(g)

Les ions piégés sont plutôt utilisés pour simuler la dynamique des *qubits* dans un système de calcul quantique. On utilise des ions dans le vide, maintenus en place par des pièges électromagnétiques et on les manipule avec des lasers. Les ions sont alignés en chaîne et vibrent autour de leur position d'équilibre. On code un *qubit* pour la simulation sur les deux états internes de l'ion (par exemple deux niveaux d'énergie électronique, qui sont stables). On détecte leur état par leur fluorescence. On crée artificiellement des interactions entre les ions avec des lasers qui couplent l'état interne de l'ion avec son mouvement. Les modes de vibration étant collectifs, les interactions effectives ion-ion se propagent sur toute la chaîne. On programme les lasers en fonction de la physique qu'on veut simuler, de telle sorte que le système obéisse à un Hamiltonien cible, par exemple le modèle d'Ising ou celui de Heisenberg.

La simulation peut être simplement analogique (le Hamiltonien construit ressemble au vrai), et on observe alors l'évolution naturelle du système, ou numérique (l'évolution est décomposée en séquences stroboscopiques). Le contrôle des interactions à longue portée est ultraprécis, mais le système a une taille limitée (une centaine d'ions). La méthode est bien adaptée à la simulation de la dynamique des *qubits* dans un ordinateur quantique et en général à celle des systèmes hors d'équilibre.

Avec des photons^(h)

On peut utiliser des photons comme porteurs de l'interaction quantique, avec l'avantage qu'ils sont facilement manipulables et qu'ils interagissent très peu avec l'environnement. Un photon peut coder un *qubit* par sa polarisation ou par le chemin qu'il prend, A ou B, ou par ses modes spatiaux ou orbitaux. Les sources sont des photons uniques ou des paires de photons

intriqués. Pour obtenir une interaction effective entre ces photons, on peut les faire passer dans des interféromètres ou des circuits optiques intégrés où leurs amplitudes de probabilité interfèrent, ou bien les envoyer dans un milieu non linéaire où les interactions entre particules matérielles génèrent une interaction effective entre photons. Comme avec les ions, la simulation peut être analogique pour reproduire un Hamiltonien donné ou bien numérique avec les circuits intégrés. L'avantage de ces méthodes est la faible décohérence et un fonctionnement à température ambiante.

Avec des circuits supraconducteurs⁽ⁱ⁾

Le principe est le même que pour le simulateur quantique à base d'ions piégés. Un circuit supraconducteur est constitué d'électrodes en matériaux supraconducteurs, gravées sur une puce, qui se comporte quantiquement (il présente des niveaux d'énergie discrets). Il est fait d'un métal supraconducteur comme l'aluminium et fonctionne à température très basse. Au cœur de chaque *qubit*, on trouve une jonction Josephson qui introduit une non-linéarité quantique et permet au circuit de fonctionner en *qubit* sur deux états distincts. Le pilotage et la mesure sont effectués par des impulsions micro-ondes. Ces *qubits* sont des briques de base du calcul quantique. Utilisés en réseau pour constituer un système simulateur, les *qubits* sont réglés pour imiter les interactions dans le système réel que l'on simule. Comme avec les ions, la simulation peut être analogique ou numérique. On les utilise beaucoup pour simuler le magnétisme quantique et ils sont prometteurs pour la chimie quantique. Leurs résultats sont très précis, mais ils sont très sensibles au bruit et à la décohérence. Leur utilisation comme simulateur est aussi, comme pour les ions, limitée par le nombre réduit de tels éléments qu'on peut faire fonctionner en réseau.

Pour conclure

Citons de nouveau l'article de Yefsah et Sayrin :

« Le caractère disruptif de la simulation quantique consiste à élucider les mystères de la physique quantique en la mettant elle-même à contribution, ce que d'aucuns appellent la seconde révolution quantique ». ■

- (a) T. Yefsah et C. Sayrin, « Simulation quantique avec des atomes froids. Comment manipuler et sonder des systèmes à l'échelle de l'atome individuel », *Reflète de la Physique* **71** (2022) 8-15.
- (b) On peut traduire approximativement par : « Je ne me satisfais pas de toutes ces modélisations qui reposent uniquement sur la physique classique, parce que la nature n'est pas classique, bon sang, et si vous voulez faire une simulation de la nature, vous avez intérêt à ce qu'elle soit quantique, et ma foi c'est un problème merveilleux parce que ça n'a pas l'air si facile. »
- (c) *Nature Physics* **8** (2012), 2 avril 2012
- (d) Nous reprenons ici des éléments de l'article des théoriciens I. Cirac et P. Zoller : *Nature Physics* **8** (2012) 264-267
- (e) I. Bloch, J. Dalibard et S. Nascimbène, *Nature Physics* **8** (2012) 267-276
- (f) Voir le chapitre 4 rédigé par B. Laburthe-Tolra, T. Lahaye et H. Perrin dans *le livre Atomes, ions, molécules ultrafroids et technologies quantiques*, EDP Sciences (2020).
- (g) R. Blatt and C. Ross, *Nature Physics* **8** (2012) 277-284
- (h) A. Aspuru-Guzik and P. Walther, *Nature Physics* **8** (2012) 285-292
- (i) A. A. Houck, H. E. Türeci and J. Koch, *Nature Physics* **8** (2012) 292-299

Calcul et simulation quantiques avec des matrices d'atomes de Rydberg

Thierry Lahaye (thierry.lahaye@institutoptique.fr)

CNRS, Université Paris-Saclay & Institut d'Optique, Laboratoire Charles Fabry, 2 avenue Augustin Fresnel, 91120 Palaiseau

Les technologies quantiques, c'est-à-dire l'utilisation, en vue d'applications pratiques, des phénomènes emblématiques de la physique quantique que sont superpositions cohérentes et états intriqués, connaissent un essor spectaculaire. Elles promettent en effet à terme de révolutionner un certain nombre de domaines, comme la métrologie, les communications sécurisées ou la manière de réaliser certains calculs. Depuis quelques années, l'utilisation de matrices d'atomes de Rydberg pour ce type d'application connaît un essor considérable.

Les technologies quantiques reposent sur des systèmes physiques, ou « plateformes », que l'on peut contrôler à l'échelle de l'objet quantique individuel, jouant le rôle de *bits* quantiques (*qubits*), et que l'on cherche à assembler en des systèmes de plus en plus complexes, tout en gardant un très bon contrôle, afin d'effectuer des opérations quantiques. Parmi ces plateformes, les ions piégés et les circuits supraconducteurs ont longtemps fait la course en tête, en termes de qualité des opérations effectuées et de nombre de *qubits* (plusieurs dizaines).

Cependant, depuis une dizaine d'années, une nouvelle approche s'est développée. Elle repose sur l'utilisation de matrices d'atomes, confinés individuellement dans des pièges de lumière appelés « pinces optiques », et que l'on fait interagir en les excitant par laser dans des « états de Rydberg ». Cette approche est longtemps restée un domaine de niche, mais aujourd'hui, des dizaines de groupes développent ces systèmes, qui connaissent des progrès fulgurants. Après un bref rappel historique, les outils de base du domaine seront décrits, et quelques exemples d'expériences récentes seront donnés. Il est évidemment hors de question de viser ici à l'exhaustivité : on trouvera quelques références parmi des centaines de travaux publiés.

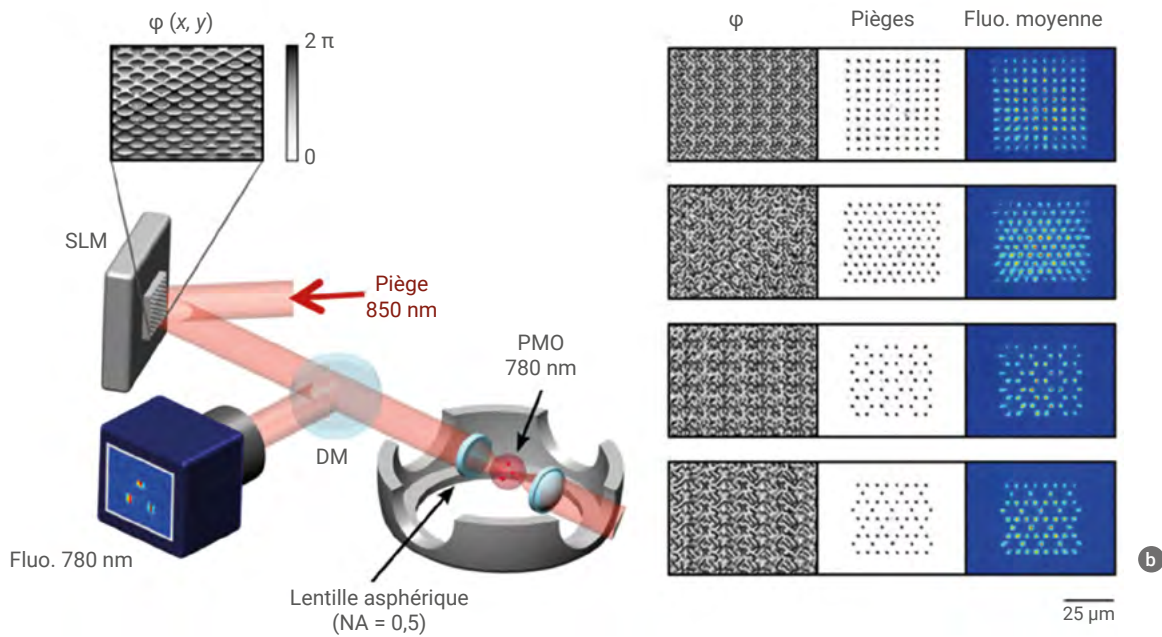
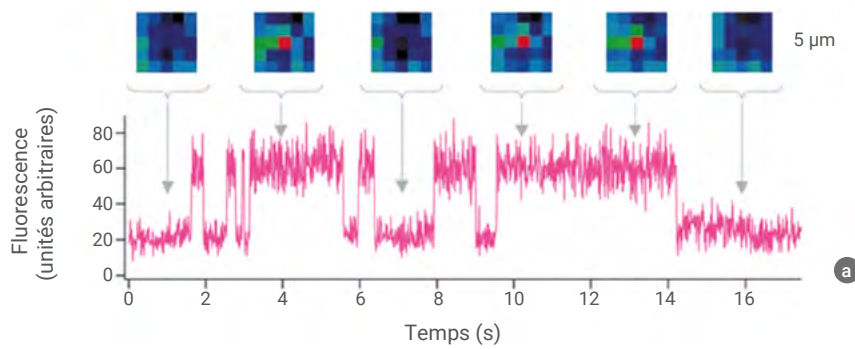


Des articles fondateurs aux « jeunes pousses » actuelles

La naissance de cette plateforme remonte à deux articles pionniers, publiés il y a 25 ans. Le premier [1], en 2000, issu des travaux de Peter Zoller, Misha Lukin, et collègues, est une étude théorique proposant d'utiliser les interactions existant entre atomes de Rydberg pour réaliser des portes quantiques robustes. Le second, expérimental [2], est la démonstration, en

2001 dans le groupe de Philippe Grangier à l'Institut d'Optique, du piégeage d'un atome individuel dans un piège de lumière microscopique, premier pas vers la réalisation de la proposition précédente. Aujourd'hui, plusieurs entreprises, dont la jeune pousse Pasqal que nous avons fondée avec A. Browaeys, A. Aspect, G.-O. Raymond et C. Jurczak, commercialisent des « processeurs quantiques » à plusieurs centaines de *qubits* [3] (voir photo ci-dessus).

>>>



1. Matrices d'atomes individuels.

(a) Signal de fluorescence d'un atome unique dans une pince optique [1].

(b) En utilisant un modulateur spatial de lumière (SLM), on peut obtenir des matrices de pièges avec des géométries quasiment arbitraires [4].

(c) Pour obtenir une matrice ordonnée, on part d'une matrice chargée aléatoirement, et on réarrange les atomes.

>>>

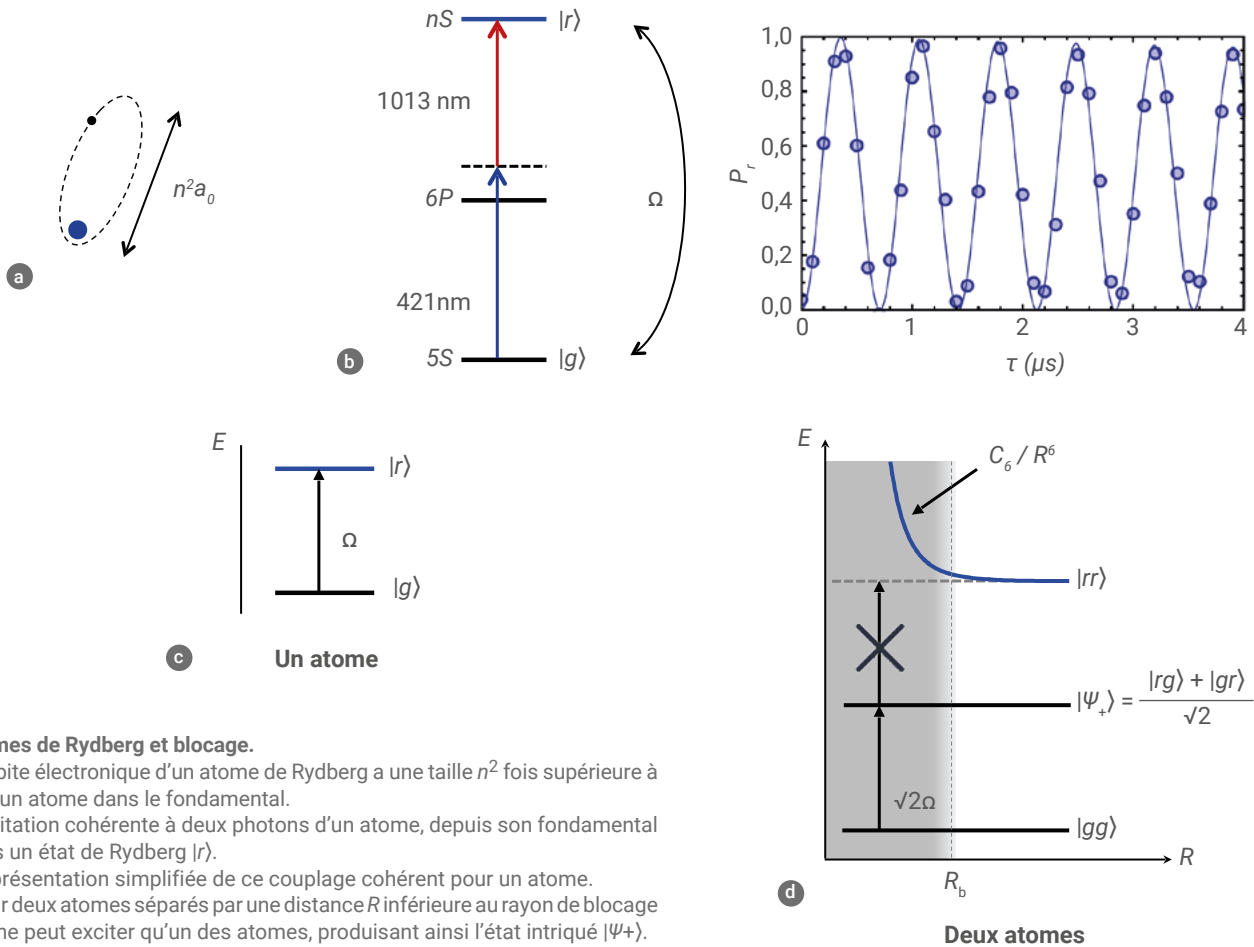
Matrices d'atomes individuels

Pour piéger des atomes individuels, on part d'un nuage d'atomes refroidi par des lasers quasi résonants. On focalise au sein de ce nuage un laser très désaccordé par rapport aux transitions atomiques, qui constitue un piège (dit « dipolaire ») micrométrique. Un atome froid du nuage peut entrer, à un moment aléatoire, dans ce piège initialement vide. Il reste alors confiné dans

cette pince, et émet de la lumière quasi résonante qui est collectée sur une caméra. Si un deuxième atome entre dans le piège, des collisions assistées par la lumière portent la paire atomique dans un état moléculaire excité, qui se désexcite presque immédiatement, entraînant la perte des deux atomes. Ainsi, la pince peut contenir au plus un atome. À un instant donné, on a une probabilité $\sim 1/2$ d'avoir un atome piégé,

ce qui se traduit par un signal de fluorescence d'allure télégraphique (figure 1a). On réalise ainsi une source « non déterministe » d'atomes individuels.

La deuxième étape consiste à créer un grand nombre de pinces optiques, arrangées selon une géométrie désirée, comme un réseau régulier. Pour cela, on imprime une phase bien choisie sur le front d'onde du faisceau de piégeage, grâce à un modulateur



2. Atomes de Rydberg et blocage.

- (a) L'orbite électronique d'un atome de Rydberg a une taille n^2 fois supérieure à celle d'un atome dans le fondamental.
- (b) Excitation cohérente à deux photons d'un atome, depuis son fondamental $|g\rangle$ vers un état de Rydberg $|r\rangle$.
- (c) Représentation simplifiée de ce couplage cohérent pour un atome.
- (d) Pour deux atomes séparés par une distance R inférieure au rayon de blocage R_b , on ne peut exciter qu'un des atomes, produisant ainsi l'état intriqué $|\Psi_+\rangle$.

spatial de lumière (SLM), qui est un réseau de phase contrôlé par ordinateur [4]. Dans le plan focal, on a alors une matrice de pinces, séparées de quelques microns ; chaque piège contient soit un, soit zéro atome, avec une probabilité proche de 1/2 (figure 1b). On obtient donc, à chaque répétition de l'expérience, une configuration aléatoire, ce qui est rédhibitoire pour beaucoup d'applications qui requièrent une géométrie fixée.

Ce verrou a été levé en 2016 par notre équipe et par le groupe de Misha Lukin, à Harvard. L'idée est simple : partant d'une matrice de $2N$ pinces, on la charge (aléatoirement) avec N atomes, on « gèle » le chargement en dispersant le nuage d'atomes froids qui l'entoure, et on image la fluorescence de cette configuration désordonnée. Un programme informatique détermine en temps réel comment déplacer les atomes à l'aide d'une pince optique mobile afin d'obtenir toujours la même configuration finale ordonnée (figure 1c). En 2016, nous obtenions des matrices contenant une

cinquante d'atomes ; depuis, l'utilisation de meilleurs algorithmes et de nouvelles techniques optiques permet d'atteindre des matrices contenant environ un millier d'atomes.

Les atomes de Rydberg

À ce stade, les atomes étant dans leur état fondamental et séparés les uns des autres par quelques micromètres, ils n'interagissent pas. Pour remédier à cela, on les excite par laser vers des états de nombre quantique principal n élevé, entre 50 et 100. Ces « états de Rydberg » (figure 2a) possèdent des propriétés exceptionnelles : une très grande orbite électronique ($> 1\mu\text{m}$), un grand moment dipolaire électrique, une durée de vie longue (quelques centaines de microsecondes), mais aussi des interactions intenses et ajustables. Par exemple, deux atomes, séparés par une distance R et portés dans le même état de Rydberg de nombre quantique n , interagissent via une interaction de van der Waals en C_6/R^6 , où $C_6 \propto n^{11}$: les

interactions sont très fortes même pour des séparations de plusieurs micromètres.

Expérimentalement, on obtient ces états de Rydberg grâce à une excitation laser, par exemple avec une transition à deux photons (figure 2b) qui permet d'obtenir des oscillations de Rabi entre le fondamental $|g\rangle$ et l'état de Rydberg choisi $|r\rangle$, avec des fréquences d'oscillations de l'ordre du MHz.

Si, pour un atome isolé (figure 2c), ce couplage cohérent conduit à des oscillations de Rabi, il n'en est plus de même pour deux atomes proches, en raison du phénomène de « blocage de Rydberg » (figure 2d). En effet, si les deux atomes sont à une distance R inférieure au rayon de blocage R_b , défini par $\hbar\Omega = C_6/R_b^6$, alors l'état doublement excité $|rr\rangle$ n'est plus résonant avec les lasers d'excitation. On n'excite alors qu'un atome sur les deux, créant la superposition symétrique $|\Psi_+\rangle$ des états $|rg\rangle$ et $|gr\rangle$, ce qui donne un état intriqué. C'est ce phénomène qui permet de réaliser des portes quantiques, comme nous allons le voir.

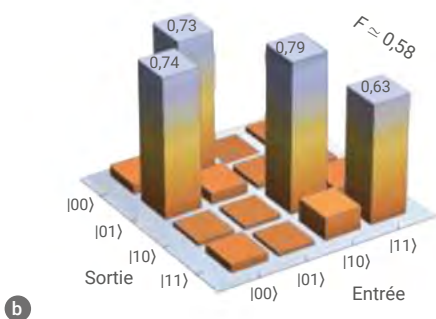
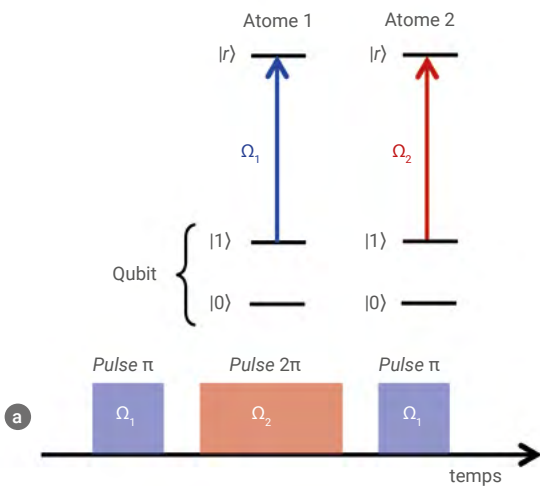
>>>

>>>

Portes quantiques utilisant le blocage de Rydberg

La figure 3a présente le principe de la porte à deux *qubits* proposée dans l'article pionnier [1]. On encode les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ d'un *qubit* dans deux niveaux hyperfins du fondamental de l'atome, et on suppose que chaque atome peut être éclairé, indépendamment, par un laser résonnant qui couple l'état $|1\rangle$, mais pas l'état $|0\rangle$, à l'état de Rydberg $|r\rangle$. Si on se rappelle le fait bien connu que la fonction d'onde d'un système à deux niveaux qui effectue une rotation de 2π change de signe, il est facile de se convaincre qu'en appliquant la séquence temporelle représentée sur la figure 3a (impulsion π sur le premier atome, impulsion 2π sur le second, et nouvelle impulsion π sur le troisième), les états à deux atomes se transforment ainsi :

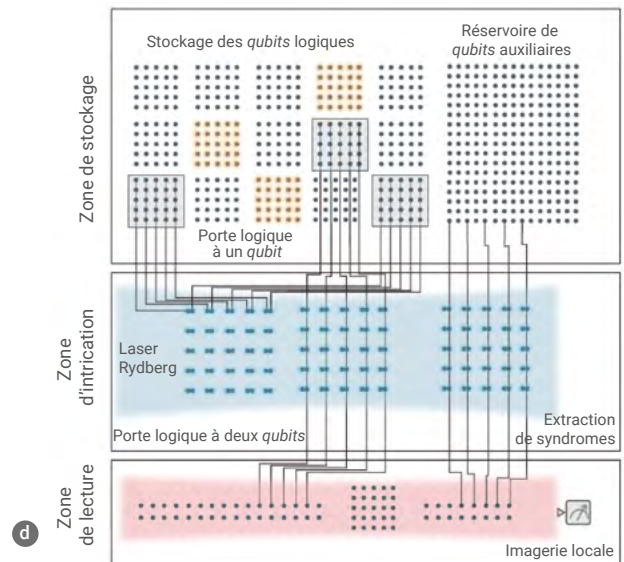
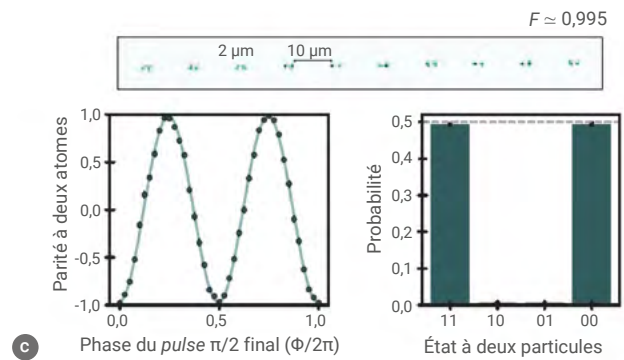
$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle, & |01\rangle &\rightarrow -|01\rangle, \\ |10\rangle &\rightarrow -|10\rangle, & |11\rangle &\rightarrow -|11\rangle. \end{aligned}$$



Ceci constitue la table de vérité d'une porte « C-phase », porte à deux *qubits* universelle, équivalente à une porte logique « C-not » (modulo des rotations locales à un *qubit*). La première relation vient simplement du fait qu'un atome dans $|0\rangle$ ne « voit » pas le laser et n'est donc pas affecté par ces impulsions ; le signe – apparaissant dans les deuxième et troisième relations est dû à la rotation de 2π évoquée plus haut, qui n'affecte qu'un seul atome ; enfin la dernière relation résulte pleinement du phénomène de blocage : la première impulsion porte le premier atome dans $|r\rangle$ ce qui rend l'excitation du deuxième impossible. Sans blocage, on aurait $|11\rangle \rightarrow |11\rangle$, et on ne pourrait pas intriquer les atomes.

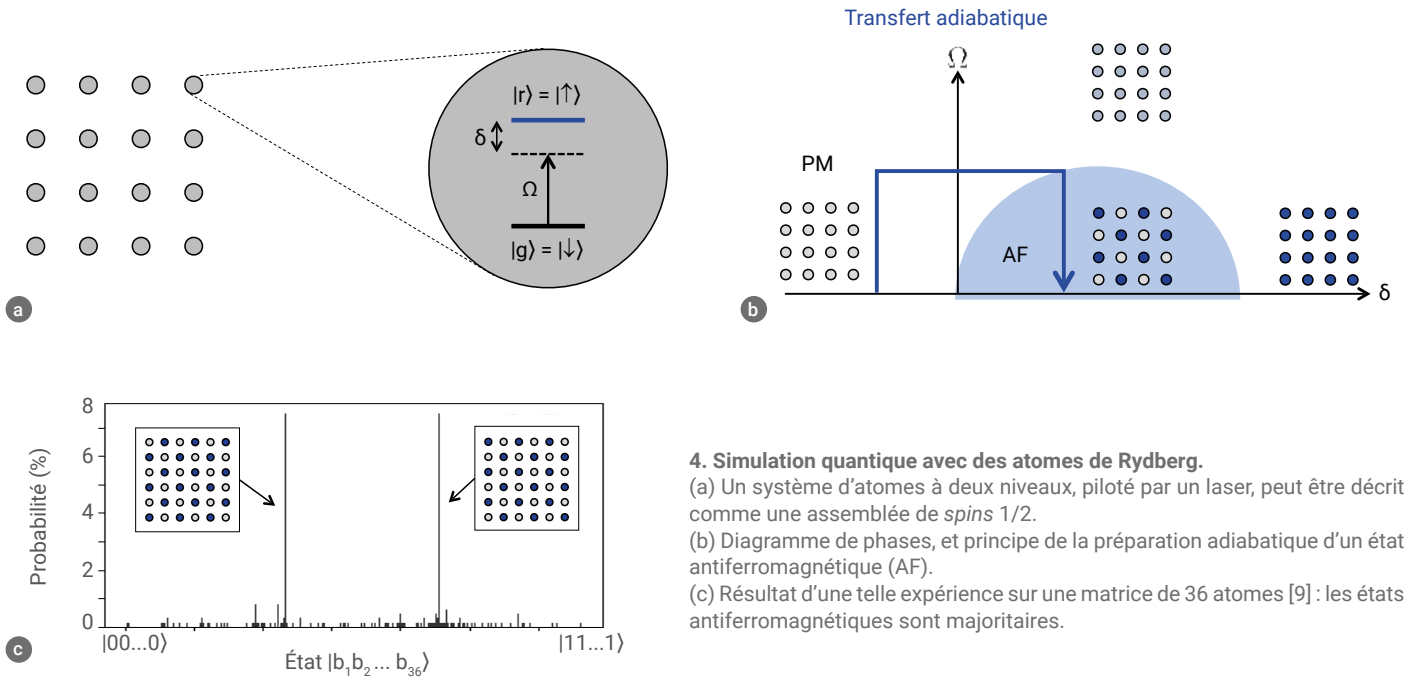
Expérimentalement, les premières démonstrations du blocage de Rydberg avec deux atomes ont été obtenues en 2009, à l'Institut d'Optique et à l'Université

du Wisconsin ; la première porte à deux *qubits*, obtenue par Saffman en 2010 [5] avait cependant une fidélité modérée de 0,58 (figure 3b). Mais, comme souvent, l'obtention de ce premier résultat a stimulé plusieurs groupes à se lancer dans le domaine, qui avec des raffinements techniques (lasers, espèces atomiques...), qui avec de nouveaux protocoles... Cela a permis d'augmenter considérablement les fidélités obtenues ; par exemple, en 2023, le groupe de Lukin à Harvard a démontré (figure 3c) des fidélités de 0,995 pour des portes à deux *qubits* effectuées en parallèle sur des paires d'atomes de rubidium [6]. Enfin, récemment, de premières démonstrations en vue du calcul quantique résilient aux erreurs (FTQC) ont été faites (figure 3d) avec des *qubits* logiques et une architecture en zones permettant de stocker, d'intriquer, et de lire les *qubits* de manière optimisée [7].



3. Portes quantiques avec des atomes de Rydberg.

- (a) Principe de la porte proposée dans l'article fondateur [1].
- (b) Première démonstration expérimentale d'une porte C-not, en 2010, par le groupe de Mark Saffman [5], avec une fidélité de 0,58. L'axe z représente la probabilité d'observer un état donné des deux atomes (00, 01, 10 ou 11) en sortie pour les différents états possibles en entrée de la porte.
- (c) En 2023, des fidélités de 0,995 sont atteintes à Harvard [6].
- (d) Architecture en trois zones (stockage en blanc, intrication en bleu et lecture en rouge) pour la démonstration d'un processeur à *qubits* logiques [7] ; les traits pleins montrent les trajectoires suivies par les atomes pour effectuer une porte quantique.



4. Simulation quantique avec des atomes de Rydberg.

(a) Un système d'atomes à deux niveaux, piloté par un laser, peut être décrit comme une assemblée de *spins* 1/2.

(b) Diagramme de phases, et principe de la préparation adiabatique d'un état antiferromagnétique (AF).

(c) Résultat d'une telle expérience sur une matrice de 36 atomes [9] : les états antiferromagnétiques sont majoritaires.

La simulation quantique

Ces matrices d'atomes ne sont pas seulement utilisées pour le calcul quantique ; elles permettent aussi de mener, sur des systèmes contrôlés, des études de physique quantique à N corps (en particulier sur les modèles de *spins* qui décrivent le magnétisme) : c'est ce que l'on appelle la simulation quantique [8].

Illustrons cela sur le modèle d'Ising en champ transverse [9]. Une matrice carrée d'atomes (figure 4a), éclairés par un laser couplant le fondamental $|g\rangle$ et l'état de Rydberg $|r\rangle$, dans lequel ils interagissent via l'interaction de van der Waals, est formellement décrite par le même Hamiltonien qu'un système de *spins* 1/2 interagissant par des couplages d'Ising, une fois qu'on identifie les états $|g\rangle=|\downarrow\rangle$ et $|r\rangle=|\uparrow\rangle$. Les paramètres du laser (pulsation de Rabi Ω et désaccord δ à résonance) jouent le rôle d'un champ magnétique extérieur.

La figure 4b illustre le « diagramme de phases » du système en fonction des paramètres laser. Lorsque Ω et δ sont grands par rapport aux interactions, le système est paramagnétique (PM) : les *spins* s'alignent avec le champ. En revanche, lorsque les interactions dominent mais que l'on maximise le nombre d'excitations Rydberg, un ordre antiferromagnétique (AF) apparaît (dôme bleuté), car, à cause du blocage, on ne peut avoir deux atomes adjacents excités. Expérimentalement, on prépare cet état

(dit « de Néel ») en faisant varier lentement les paramètres laser, pour « suivre adiabatiquement » l'état fondamental à partir de l'état paramagnétique, facile à préparer. La figure 4c montre le résultat sur un petit système de 36 atomes : après l'expérience, on mesure l'état des *spins* ; parmi les 2^{36} états possibles *a priori*, on obtient en majorité les deux états de Néel. Ces systèmes d'atomes de Rydberg permettent d'étudier, outre le modèle d'Ising, bien d'autres Hamiltoniens habituellement rencontrés en magnétisme quantique.

Conclusion

Ainsi, l'utilisation de matrices d'atomes de Rydberg pour les technologies quantiques est aujourd'hui en pleine expansion, non seulement dans le monde académique, mais aussi dans l'industrie avec plusieurs jeunes pousses qui développent à la fois la technologie et les applications, au-delà de la recherche fondamentale. Prédire une telle explosion de ces activités il y a quinze ans aurait été bien difficile ! ■



1. D. Jaksch *et al.*, "Fast Quantum Gates for Neutral Atoms", *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 2208.
2. N. Schlosser *et al.*, "Sub-poissonian loading of single atoms in a microscopic dipole trap", *Nature* **411** (2001) 1024.
3. L. Henriet *et al.*, "Quantum Computing with Neutral Atoms", *Quantum* **4** (2020) 327.
4. F. Nogrette *et al.*, "Single-Atom Trapping in Holographic 2D Arrays of Microtraps with Arbitrary Geometries", *Phys. Rev. X* **4** (2014) 021034.
5. L. Isenhower *et al.*, "Demonstration of a Neutral Atom Controlled-NOT Quantum Gate", *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 010503.
6. S. Evered *et al.*, "High-fidelity parallel entangling gates on a neutral-atom quantum computer", *Nature* **622** (2023) 268.
7. D. Bluvstein *et al.*, "Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays", *Nature* **626** (2024) 58.
8. A. Browaeys et T. Lahaye, "Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms", *Nature Phys.* **16** (2020) 132.
9. P. Scholl *et al.*, "Quantum simulation of 2D antiferromagnets with hundreds of Rydberg atoms", *Nature* **595** (2021) 233.

Des atomes ultrafroids piégés dans des champs optiques superoscillants : vers de nouveaux simulateurs quantiques

David Wilkowski⁽¹⁾ (david.wilkowski@ntu.edu.sg) et Vincent Mancois⁽²⁾ (vincent.mancois@ntu.edu.sg),

(1) Université Côte d'Azur, IRL Maulab, Nanyang Technological University, 21 Nanyang Link, 637371 Singapore

(2) Centre for Quantum Technologies, Nanyang Technological University, Singapore

Un champ est dit superoscillant lorsque son intensité présente des variations spatiales locales plus rapides que celles données par la composante de Fourier la plus élevée. En utilisant cette propriété surprenante, des atomes ultrafroids ont été piégés dans des pinces optiques dont la taille et l'espacement sont plus petits que ceux imposés par la limite de diffraction du système optique. De telles structures optiques ouvrent la voie vers de nouveaux types de simulateurs quantiques où chaque atome et chaque piège de lumière pourront être contrôlés individuellement.

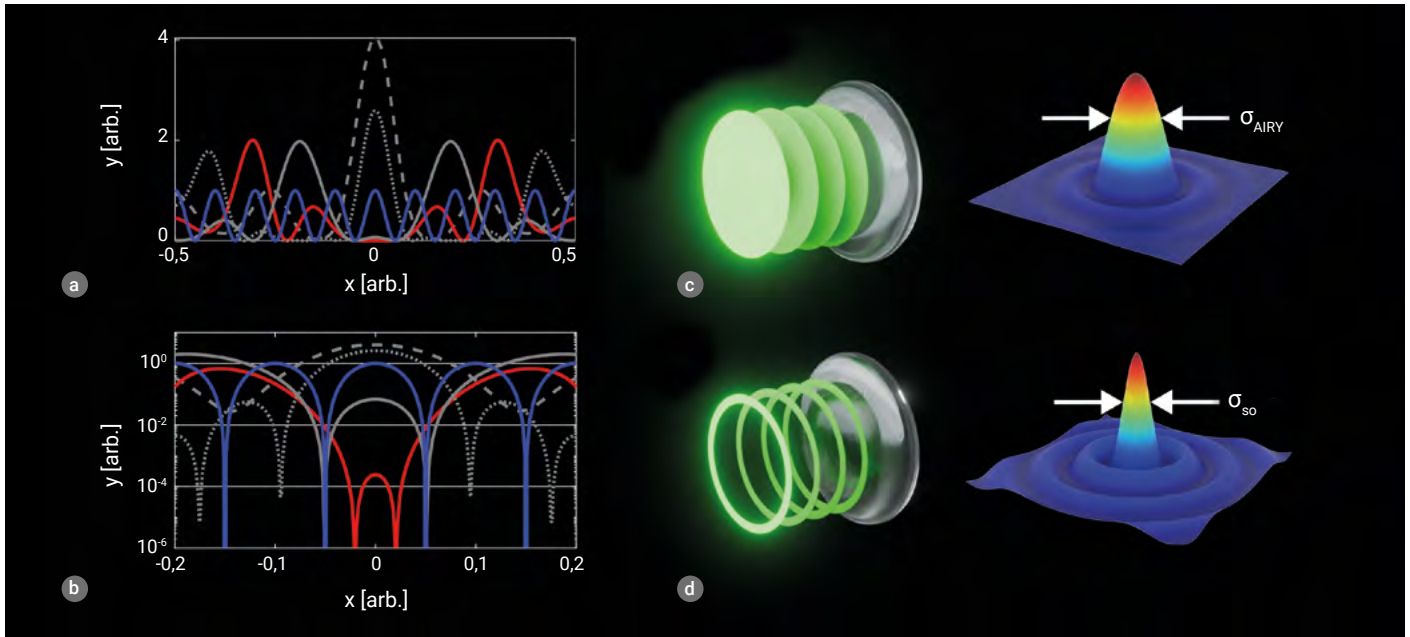
Le premier condensat de Bose-Einstein, dû notamment aux travaux de E. Cornell, W. Ketterle, et C. Wieman (prix Nobel de Physique 2001) a été observé en 1995, donnant une preuve expérimentale directe et indiscutable à une prédiction alors vieille de 70 ans. Ce tour de force n'aurait pu avoir lieu sans le développement, quelques années auparavant, des techniques de refroidissement par laser (S. Chu, W. Phillips et C. Cohen-Tannoudji récompensés par le prix Nobel de Physique 1997). Depuis lors, ce qu'on appelle plus généralement le domaine des gaz ultrafroids a révolutionné la physique atomique, lui ouvrant de nouveaux horizons vers la métrologie de haute précision, l'étude de systèmes fortement corrélés et les ordinateurs quantiques. Ces applications requièrent non seulement le refroidissement mais aussi le piégeage des atomes. Pour cela, des pièges optiques ont été développés à l'aide de faisceaux lasers très désaccordés en fréquence par rapport aux résonances atomiques. Ici les points d'équilibre mécanique stable correspondent

aux maximums d'intensité. En utilisant par exemple une onde optique stationnaire, l'arrangement périodique des pièges permet aux atomes d'y simuler la dynamique des électrons dans une structure cristalline, ouvrant la voie aux simulateurs quantiques avec des gaz ultrafroids. On peut aussi piéger les atomes un par un, dans des pinces optiques faites de faisceaux laser fortement focalisés. L'avantage des pinces optiques réside dans leur arrangement pouvant être contrôlé à volonté et non plus limité aux structures périodiques des réseaux optiques. Le groupe d'Antoine Browaeys à l'Institut d'optique a par exemple assemblé une Tour Eiffel miniature avec des atomes de Rubidium.

Parallèlement à la physique atomique, une autre discipline de la physique, plus ancienne encore, s'est considérablement transformée au cours des trente dernières années. Il s'agit de l'optique qui a bénéficié d'avancées technologiques majeures grâce au contrôle de la cohérence temporelle et spatiale des sources lumineuses. On peut

penser par exemple aux progrès réalisés dans les sources laser en termes de couverture et de finesse spectrales et d'asservissement en fréquence, mais également à l'introduction de nouveaux matériaux optiques aujourd'hui largement répandus. La lumière structurée, qui fait appel à la manipulation en phase et en amplitude d'un faisceau laser par des modulateurs spatiaux de lumière (SLM pour *spatial light modulators*), est en plein essor. Les avancées touchent des domaines très variés comme l'imagerie biomédicale (propagation dans des milieux complexes et turbides), la microscopie subdiffRACTIVE et la génération de faisceaux lumineux ayant des propriétés topologiques non triviales comme la lumière twistée, ou les skyrmions optiques qui sont des structures topologiques imprimées sur la polarisation de la lumière.

Pour le moment, l'utilisation de lumière structurée pour manipuler des atomes ultrafroids n'en est qu'à ses balbutiements. Néanmoins, certaines applications existent déjà, notamment pour contrôler le profil des



1. (a) Tracés sur une période de l'intensité $y(x) = f(x)^2$ pour différents tirages des coefficients a_n : solutions usuelles (en gris), solution superoscillante (en rouge) et harmonique la plus élevée (en bleu).
 (b) Zoom près de l'origine en échelle logarithmique du tracé de la figure 1a. Les solutions usuelles (en gris) montrent une variation proche de la composante de Fourier la plus élevée (en bleu) ou plus lente qu'elle. La solution superoscillante (en rouge) varie plus rapidement car elle atteint des minima locaux sur des distances plus petites que la composante de Fourier la plus élevée.
 (c) Si une onde plane incidente (en vert) est focalisée par une lentille mince (sans aberration), on observe un disque d'Airy au foyer de la lentille.
 (d) Si seulement un anneau extérieur incident (en vert) est éclairé, le lobe central au foyer de la lentille est plus petit que le disque d'Airy $\sigma_{\text{so}} < \sigma_{\text{AIRY}}$. C'est un effet superoscillant en optique.

faisceaux laser utilisés par les ordinateurs quantiques à atomes neutres. Dans cet article, nous détaillons une autre application récente de la lumière structurée consistant à générer et à contrôler des pinces optiques au niveau de la longueur d'onde optique à l'aide d'un effet appelé superoscillation. Nous espérons que dans un futur proche, ces avancées permettront le développement de nouveaux simulateurs quantiques plus polyvalents et plus performants que ceux qui existent aujourd'hui.

Les champs superoscillants

Si l'on observe l'évolution spatiale ou temporelle d'un signal, il est généralement admis que les oscillations les plus rapides sont imposées par la composante de Fourier ayant la fréquence la plus élevée. Considérons par exemple un signal simple composé de cinq harmoniques $f(x) = \sum_{n=1:5} a_n \cos(2\pi nx)$, tel que $\sum_{n=1:5} a_n^2 = 1$. Sur la figure 1a, nous présentons l'intensité du champ, c'est-à-dire l'ampli-

tude au carré pour trois tirages aléatoires des coefficients a_n (tracés en gris). Nous observons que les variations autour de l'origine des tirages sont en effet plus lentes que la composante de Fourier de plus haute fréquence qui correspond à l'harmonique $n = 5$, ici tracée en bleu. Néanmoins il existe aussi des solutions plus rares, dite « superoscillantes », variant localement plus rapidement. Une de ces solutions est tracée en rouge. Le caractère superoscillant de la solution en rouge autour de l'origine est révélé en traçant le signal en échelle logarithmique, comme sur la figure 1b. On voit que la solution superoscillante atteint des minima locaux plus rapidement que l'harmonique $n = 5$.

Les champs électromagnétiques peuvent-ils également présenter des variations spatiales rapides et sont-ils utilisables ? La réponse est oui, comme le montre l'exemple simple suivant que nous allons utiliser tout au long de cet article. Considérons un instrument d'optique équivalent à une lentille idéale, c'est-à-dire qui focalise un champ

lumineux sans aberrations. Si l'instrument d'optique est éclairé de manière homogène, nous obtenons, en appliquant la théorie de la diffraction de Fraunhofer, un disque d'Airy dont la taille du lobe central est $\sigma_{\text{AIRY}} \approx \lambda/2 NA$ où λ est la longueur d'onde de la lumière et $NA = n \sin\theta$ est l'ouverture numérique de la pupille d'entrée de l'instrument d'optique (voir figure 1c), définie comme le produit de l'indice de réfraction n du milieu ambiant (l'air dans notre cas) par le sinus du demi-angle d'acceptance. La taille d'Airy correspond *grosso modo* à la composante transverse de Fourier la plus élevée pouvant être transmise par l'instrument d'optique. Notons que, dans cet exemple, le spectre de Fourier est continu et non plus discret comme dans l'exemple précédent correspondant aux figures 1a et 1b. En plaçant maintenant un filtre de phase et/ou d'amplitude afin de structurer la lumière juste avant l'instrument optique, des chercheurs ont montré que le lobe central de diffraction peut devenir superoscillant c'est-à-dire réduit en taille par rapport au

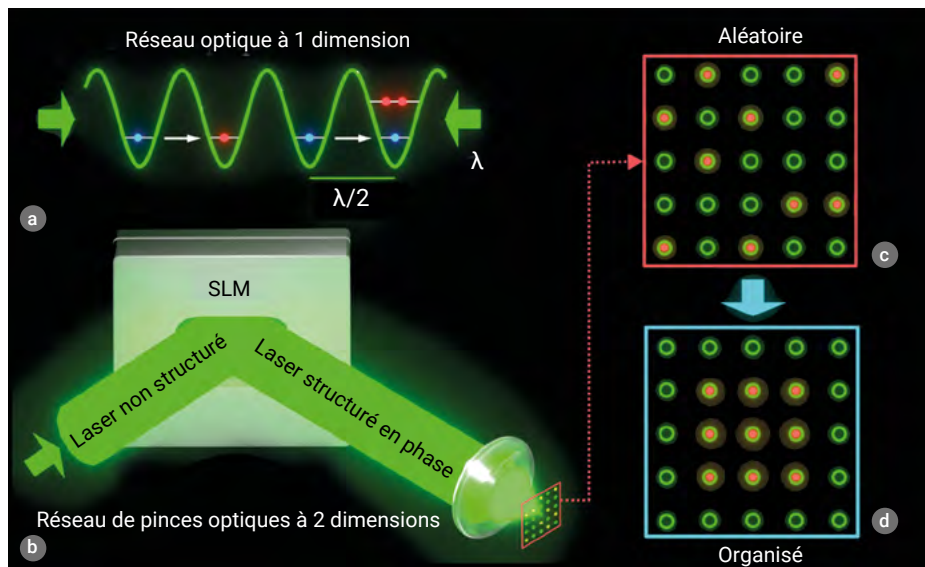
>>>

>>>

disque d'Airy. Ce point est illustré sur la figure 1d, où nous avons simplement considéré un disque opaque couvrant la partie centrale de la pupille d'entrée. L'ouverture de l'instrument d'optique correspond donc à un mince anneau externe donnant un lobe superoscillant plus petit que le disque d'Airy. Une réduction encore plus importante de la taille du lobe central peut être obtenue à l'aide d'un masque plus sophistiqué.

Notons que la limite de diffraction n'est pas violée par la présence de lobes superoscillants, mais modifiée par rapport au cas standard d'un éclairage homogène. Précisons aussi que ce lobe superoscillant est localisé dans le champ lointain. Il ne résulte donc pas d'un effet de champ proche, connu également pour produire des résolutions spatiales en dessous de la limite de diffraction (microscopie SNOM, *scanning near-field optical microscopy* en anglais, par exemple).

Intéressons-nous maintenant à la distribution en intensité de la lumière diffractée. En comparant les profils des figures 1c et 1d, nous voyons que le lobe central de la figure de diffraction du champ superoscillant est en effet plus petit que celui du disque d'Airy mais qu'il possède aussi des anneaux de diffraction satellites plus intenses. En effet, tout rétrécissement du lobe central superoscillant se fait au profit des anneaux satellites, une propriété qui peut sérieusement limiter les domaines d'application des champs superoscillants. Néanmoins, des techniques d'imagerie par transmission super-résolues, c'est-à-dire avec des résolutions spatiales en dessous de la limite de diffraction ont été mises en place à l'aide de lobes lumineux superoscillants. Par une structuration judicieuse de la lumière, les anneaux satellites, pouvant limiter la résolution spatiale de l'appareil optique, ont été éloignés du lobe central afin d'être filtrés après transmission *via* une image intermédiaire. En plus de l'imagerie super-résolue, les lobes superoscillants ont récemment été utilisés comme pinces optiques, soit pour des billes diélectriques ou bien pour des atomes ultrafroids. Comme l'intensité maximale est souvent le facteur limitant, l'intérêt des pinces superoscillantes réside dans un meilleur confinement spatial des objets piégés. Nous discuterons par la suite le confinement d'atomes ultrafroids



2. (a) Un réseau de lumière est réalisé en utilisant deux faisceaux lasers contra-propageant de même longueur d'onde λ . Le pas du réseau d'intensité est $\lambda/2$. Les atomes qui sont dans un état d'énergie donné peuvent se déplacer d'un piège de lumière à l'autre par effet tunnel (illustré par atome bleu devenant rouge). Si un atome rencontre un autre atome, les deux vont interagir, ce qui déplace les niveaux d'énergie dans le piège et modifie ainsi les propriétés de transport des atomes dans le réseau. (b) Une autre méthode pour obtenir un réseau de pièges périodique consiste en un réseau de pinces optiques obtenu en structurant en phase un faisceau laser (*via* un SLM) qui est ensuite focalisé sur les atomes par une lentille. La lentille effectuée une transformée de Fourier du champ émis par le SLM. (c) Les pinces optiques (cercles verts) sont peuplées par des atomes ultrafroids (points rouges) de manière aléatoire. (d) Les atomes peuvent être réarrangés pour former, par exemple, des réseaux sans défauts.

dans plusieurs pinces optiques superoscillantes et leurs applications en simulation quantique.

Les simulateurs quantiques à atomes ultrafroids

Nous voulons comprendre comment les lobes superoscillants peuvent aider à réaliser des simulateurs quantiques à atomes ultrafroids. Pour bien appréhender leur intérêt, commençons par présenter les techniques actuellement utilisées, leurs avantages et leurs limitations.

Au début des années 2000, les physiciens ont commencé à utiliser les atomes ultrafroids comme simulateurs quantiques, essentiellement pour analyser des transports de charge et de *spin* en matière condensée. Le schéma typique consiste à refroidir un gaz d'atomes, d'abord par des techniques de refroidissement par laser et ensuite par évaporation pour atteindre des températures extrêmement basses, de l'ordre de quelques dizaines de nanokelvins. Ainsi, le gaz atteint un régime de dégéné-

rescence quantique, où ses propriétés physiques et statistiques sont principalement déterminées par le caractère symétrique (bosons) ou antisymétrique (fermions) des fonctions d'onde lorsqu'on intervertit les états de deux particules. Le gaz est ensuite transféré dans un réseau optique construit à l'aide d'ondes laser stationnaires. Le pas du réseau étant petit (la longueur d'onde divisée par deux), les atomes peuvent se déplacer d'un piège à l'autre par effet tunnel, c'est-à-dire en traversant la barrière de potentiel entre deux pièges en un temps suffisamment court pour pouvoir être observés dans les expériences. Les atomes interagissent fortement lorsque deux ou plusieurs atomes coexistent dans un même piège (voir figure 2a). Ce type d'expériences a permis des avancées remarquables, notamment dans la compréhension des transitions de phase quantiques et topologiques. Néanmoins, le chargement aléatoire des atomes dans le réseau optique ainsi que des processus résiduels de chauffage limitent le champ d'application des simulateurs quantiques à atomes sur réseau à

ondes stationnaires. Par exemple, la simulation de problèmes impliquant des interactions sans contact (interaction *via* le moment magnétique des particules, par exemple), ou bien la simulation de problèmes liés à la physique des hautes énergies (théories de jauge sur réseau), ou encore la création contrôlée d'états quantiques impliquant plusieurs particules sont difficiles, voire impossibles à réaliser.

Vers 2015, poussé notamment par la recherche sur les ordinateurs quantiques, un nouveau type de réseau à atomes ultrafroids construit à partir de pinces optiques s'est rapidement développé. Ici, un faisceau laser intense est réfléchi par un SLM (voir figure 2b). Ce dernier génère un hologramme qui transforme, au foyer d'une lentille, le faisceau en une multitude de faisceaux laser secondaires et focalisés, formant un réseau de pinces optiques (représenté par des cercles vides sur la figure 2c). Chaque pince peut piéger un atome (point rouge) ou rester inoccupée. De plus, chaque atome peut être refroidi jusqu'à l'énergie du point zéro (énergie minimale autorisée par la mécanique quantique) de la pince optique. Enfin, les atomes peuvent être déplacés, permettant une réorganisation arbitraire de leur agencement afin par exemple de créer un réseau sans défaut (voir figure 2d). Ce nouveau dispositif expérimental lève les limitations des réseaux optiques des premières expériences. Malheureusement, pour éviter les effets d'interférences, les pinces optiques sont généralement séparées d'une distance bien supérieure à leur taille. Cette dernière parvient déjà difficilement à atteindre une taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière, à cause de l'ouverture numérique finie du système optique. Ainsi, les atomes dans les réseaux de pinces optiques sont incapables de dif-

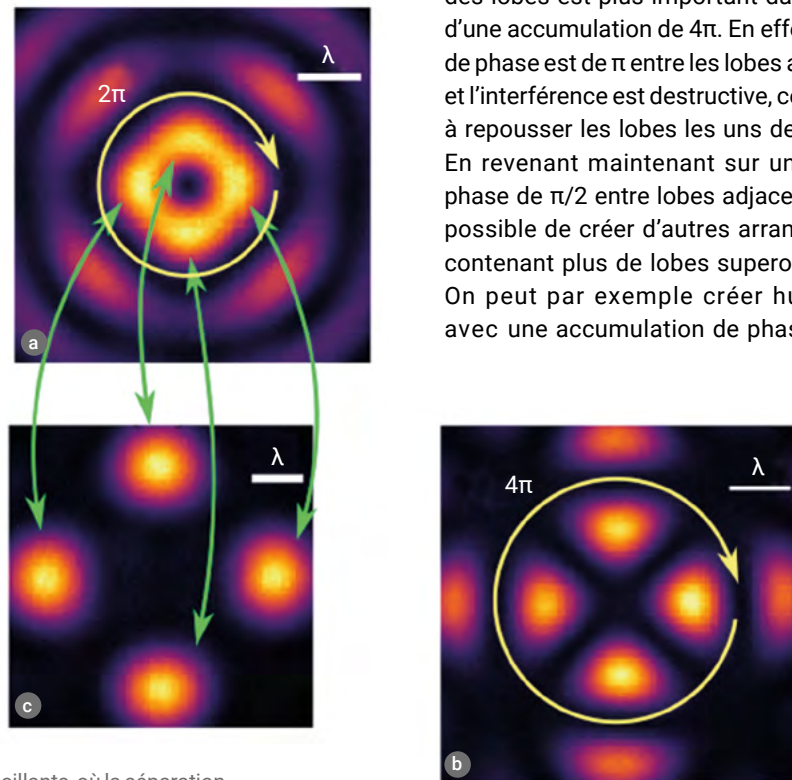
fuser de piège en piège, c'est-à-dire que l'effet tunnel entre pinces optiques est négligeable, limitant leur intérêt comme simulateurs quantiques aux problèmes sans transport.

Atomes piégés dans des lobes superoscillants

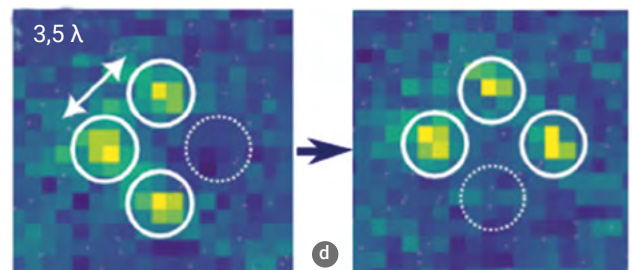
Ainsi s'est posée naturellement la question de savoir s'il était possible de générer plusieurs lobes superoscillants qui soient suffisamment proches afin de permettre le passage par effet tunnel d'un atome d'un lobe vers un des lobes voisins. Notre équipe de recherche a répondu par l'affirmative à cette question, en montrant que quatre lobes superoscillants peuvent être séparés par des distances inférieures à la limite de diffraction standard, c'est-à-dire donnée par

un éclairage homogène du système optique. Comme les lobes sont très proches, les effets d'interférence jouent un rôle prépondérant, et doivent être maîtrisés. En pratique, cela est possible en choisissant convenablement le masque de phase et d'amplitude imprimé à l'entrée du système optique. L'influence des interférences, ou plus précisément de la phase relative entre les lobes, est illustré sur les figures 3a et 3b. Sur la figure 3a, nous avons choisi un saut de phase de $\pi/2$ entre lobes adjacents. Ainsi, si nous effectuons le tour des quatre lobes, la phase s'accumule jusqu'à 2π ce qui explique la structure en anneaux sous-jacente. Pour des raisons de symétrie, l'accumulation de phase est nécessairement un multiple de 2π . Un autre cas, correspondant à une accumulation de 4π est indiqué sur la figure 3b. En comparant les deux figures, on s'aperçoit que l'écartement des lobes est plus important dans le cas d'une accumulation de 4π . En effet, le saut de phase est de π entre les lobes adjacents et l'interférence est destructive, ce qui tend à repousser les lobes les uns des autres. En revenant maintenant sur un saut de phase de $\pi/2$ entre lobes adjacents, il est possible de créer d'autres arrangements contenant plus de lobes superoscillants. On peut par exemple créer huit lobes avec une accumulation de phase de 4π .

>>>



3. (a) Lumière structurée donnant quatre lobes superoscillants, où la séparation des lobes dépend de la phase accumulée sur une boucle qui est ici de 2π .
 (b) Dans cet autre exemple, la phase accumulée est de 4π , donnant des lobes plus espacés et donc moins favorables pour le transport des atomes par effet tunnel.
 (c) Pinces optiques standard utilisées pour le chargement des atomes. Les pinces non superoscillantes et superoscillantes sont reliées de manière univoque comme schématisé par les flèches vertes ; on peut donc transférer les atomes des pinces optiques vers les lobes superoscillants et *vice versa*.
 (d) Imagerie de fluorescence indiquant la présence d'un atome dans une pince. L'image de gauche correspond à la configuration initiale et celle de droite à la configuration finale où les atomes sont passés par les lobes superoscillants. On voit un réarrangement des atomes indiquant qu'un ou plusieurs atomes ont sauté d'un lobe à un de ses voisins.



« Contrairement aux réseaux optiques obtenus avec des ondes stationnaires [...], les réseaux de pinces optiques superoscillantes permettent un chargement et un arrangement déterministes des atomes. »

>>>

Continuant ainsi, douze lobes vont correspondre à une accumulation de phase de 6π et ainsi de suite. Notons que l'on conserve ici une symétrie de rotation, propre aux lobes superoscillants. Pour le moment, la génération de réseaux superoscillants avec d'autres symétries (de translation par exemple) reste un problème ouvert.

Si la création de lobes superoscillants proches les uns des autres est possible, le chargement déterministe des atomes dans ces structures ne semble *a priori* pas facile en raison de leur faible taille qui ne permet pas une résolution spatiale de la lumière de fluorescence émise par les atomes (voir figures 3a et 3b). Pour résoudre ce problème, on peut préalablement charger les atomes dans des pinces optiques non superoscillantes bien séparées, comme cela est indiqué pour quatre pinces sur la figure 3c. La présence d'atomes dans les pinces optiques est détectée par imagerie de fluorescence. À titre d'exemple, l'image de la figure 3d de gauche indique clairement que trois pinces optiques sont occupées chacune par un atome, la quatrième, à droite, étant vide. Le masque de phase est ensuite déformé continûment pour obtenir l'une ou l'autre des structures sur les figures 3a et 3b. Ici, les pinces non superoscillantes et superoscillantes sont reliées de manière univoque comme cela est schématisé par les flèches vertes. Après un certain temps, on revient aux pinces optiques non superoscillantes bien séparées et on effectue une seconde mesure du nombre et de la distribution des atomes dans les pinces optiques. Par exemple, l'image de fluorescence de la figure 3d de droite indique que les atomes se sont déplacés notamment parce que la pince optique de droite est maintenant peuplée par un atome. L'expérience décrite dans la figure 3 a été effectuée dans un

régime où la température du gaz (environ 30 microkelvins) est trop élevée pour que les effets quantiques puissent dominer les fluctuations thermiques classiques. La prochaine étape consisterait à réduire la température du gaz, avant la phase superoscillante, afin que les atomes soient principalement dans l'état fondamental des pièges.

En conclusion, nous avons présenté dans cet article une nouvelle approche pour manipuler des atomes ultrafroids à l'aide de réseaux de pinces optiques superoscillantes. Ces dernières peuvent être suffisamment proches pour permettre le passage des atomes d'une pince à l'autre par effet tunnel. Ainsi les pinces optiques superoscillantes permettraient de développer de nouveaux simulateurs quantiques à atomes ultrafroids pour des problèmes en matière condensée (supraconduction à haute température critique, transition de

phase quantique ...) ou en physique des hautes énergies (théorie des champs de jauge sur réseau). Contrairement aux réseaux optiques obtenus avec des ondes stationnaires, qui sont actuellement les systèmes couramment utilisés, les réseaux de pinces optiques superoscillantes permettent un chargement et un arrangement déterministes des atomes. De plus, le réseau, contrôlé par un SLM, peut être dilaté avant et après la phase superoscillante pour permettre une lecture précise de la population atomique des pinces optiques. Ainsi, l'expérience décrite dans la figure 3, nous indique la marche à suivre. Elle consiste à mesurer le réarrangement des atomes après un temps d'interaction dans les pinces superoscillantes. On peut ainsi accéder aux corrélations spatiales des atomes qui fournissent des informations essentielles pour comprendre l'évolution quantique du système. Cette dernière peut être certainement prédite pour des simulateurs à quatre atomes, mais devient beaucoup plus difficile, voire extrêmement complexe si plusieurs dizaines d'atomes interagissent dans les pinces optiques. En plus des applications en simulation quantique, les pinces optiques superoscillantes permettent la création d'états quantiques séparables qui évolueraient ensuite, via des interactions entre atomes bien contrôlées, vers des états quantiques plus complexes par exemple d'intérêt métrologique ou pour l'information quantique. ■

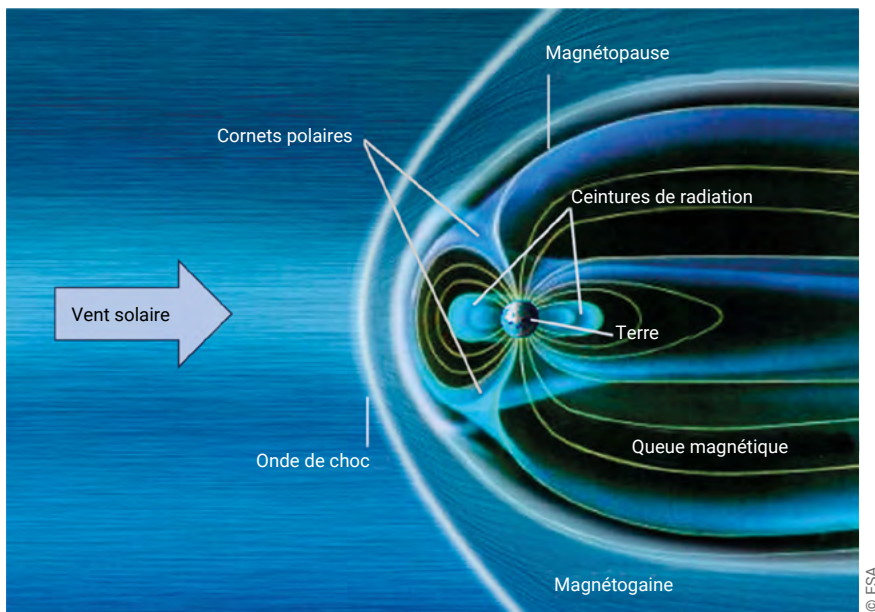


- Principes du refroidissement d'atomes par laser : https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_cooling ; Jean Dalibard, cours 'Atomes froids'
- Les condensats de Bose-Einstein : "Bose-Einstein condensate" - Wikipedia ; M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, *Science* **269** (1995) 198.
- Géométries diverses de pinces optiques : D. Barredo, V. Lienhard, S. de Léséleuc, T. Lahaye, and A. Browaeys, *Nature* **561** (2018) 79.
- Simulations quantiques avec des atomes ultrafroids : I. Bloch, J. Dalibard, and S. Nascimbène, *Nature Physics* **8** (2012) 267.
- Ordinateurs quantiques à atomes neutres : D. Barredo, S. de Léséleuc, V. Lienhard, T. Lahaye, and A. Browaeys, *Science* **354** (2016) 1021 ; "Neutral atom quantum computer" - Wikipedia
- Principes fondamentaux des superoscillations : M. V. Berry and S. Popescu, *J. Phys. A Math. Gen.* **39** (2006) 6965.
- Application des champs optiques superoscillants : N. I. Zheludev and G.-H. Yuan, *Nature Reviews Physics* **4** (2022) 16.
- Atomes dans des pinces optiques superoscillantes : H. M. Rivy S. A. Aljunid, E. Lassalle, N. I. Zheludev, and D. Wilkowski, *Comm. Phys.* **6** (2023) 155 ; K. Lim, V. Mancois, H. Wu, Y. Shen, and D. Wilkowski, *Phys. Rev. A* **112** (2025) L051307.

SMILE : La magnétosphère terrestre bientôt dévoilée grâce aux rayons X

Dimitra Koutroumpa (dimitra.koutroumpa@latmos.ipsl.fr),
Laboratoire Atmosphères Observations Spatiales (UVSQ, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS),
11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt

La magnétosphère est un vaste bouclier magnétique qui entoure notre planète et la protège des particules chargées émises par le Soleil, appelées vent solaire. L'interaction entre champ magnétique terrestre et vent solaire relève du domaine de la météorologie spatiale. Celle-ci varie en fonction de l'activité solaire et peut impacter les technologies spatiales, les réseaux de communication, et même la vie sur Terre. Pour mieux comprendre ce bouclier invisible, une mission spatiale sino-européenne, nommée SMILE (pour *Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer*), utilisera une technique innovante d'imagerie aux rayons X. Elle permettra ainsi pour la première fois d'observer la magnétosphère et d'étudier de façon globale sa dynamique face au forçage du vent solaire.



1. Schéma simplifié du couplage magnétosphère terrestre-vent solaire. Le vent solaire s'écoule de gauche à droite. Il est ralenti et chauffé au niveau de l'onde de choc, puis dévié à la magnétopause. L'espace entre ces limites constitue la magnétogaine. La magnétosphère, représentée par les lignes du champ magnétique terrestre, est déformée par la pression du vent solaire : comprimée du côté jour et étirée dans la queue magnétique du côté nuit. Aux pôles, les lignes ouvertes forment les cornets polaires, permettant l'entrée des particules solaires. Celles-ci peuvent être piégées, formant les ceintures de radiation.

La magnétosphère et son rôle pour la météo de l'espace

La magnétosphère, bulle de plasma qui domine l'environnement spatial de la Terre, est formée par l'interaction entre le champ magnétique terrestre, celui du Soleil et le vent solaire – un flux de particules chargées émises par le Soleil. Sa structure complexe comprend plusieurs zones (fig. 1). La magnétopause est la limite extérieure où la pression du vent solaire s'équilibre avec celle du champ terrestre. En amont, le vent solaire supersonique est brusquement ralenti et chauffé, formant une onde de choc et une zone de plasma plus chaud et dense : la magnétogaine. Sous l'effet de la pression du vent solaire, la magnétosphère est comprimée côté jour et étirée côté nuit, formant une longue queue magnétique. Aux pôles, les cornets polaires correspondent aux régions de lignes ouvertes du dipôle terrestre, facilitant l'entrée des particules solaires.

En théorie, la magnétopause – et la magnétosphère dans son ensemble, hormis les cornets polaires – est étanche au vent solaire. Toutefois, lorsque la direction du

>>>

>>>

champ magnétique solaire, entraîné par le vent solaire, s'oppose à celle du champ terrestre, leurs lignes se reconnectent, libérant de l'énergie et modifiant la dynamique du plasma [1]. Des particules solaires pénètrent alors la magnétosphère, et peuvent être piégées et accélérées, notamment dans les ceintures de radiation.

La fréquence et l'intensité des phénomènes de reconnexion sont corrélées avec l'activité solaire, qui suit un cycle d'environ 11 ans. Durant le maximum d'intensité, des éruptions solaires et des éjections de masse coronale (CME) peuvent produire des perturbations majeures dans l'environnement terrestre : orages géomagnétiques, aurores intenses, perturbations de satellites, coupures radio et dysfonctionnements électriques au sol. Ces phénomènes constituent la météo de l'espace, dans laquelle la magnétosphère joue un rôle central.

Jusqu'à récemment, l'étude de la magnétosphère reposait surtout sur des mesures *in situ* du plasma. Des missions en constellation – utilisant plusieurs satellites identiques en vol coordonné – telles que Cluster,

Themis et MMS ont révolutionné notre compréhension de la physique magnétosphérique et de la reconnexion. Leurs mesures multipoints, réalisées en formations 3D tétraédriques espacées typiquement de 10 à 600 km ont permis de sonder les échelles ioniques et électroniques. Cependant, les mesures *in situ* restent très localisées dans l'espace et le temps et exigent des observations sur plusieurs années pour reconstruire globalement la forme et position de la magnétopause.

Quelques missions ont utilisé la télédétection pour des mesures UV ou de particules neutres énergétiques, mais majoritairement pour l'imagerie aurorale (IMAGE, TWINS, POLAR). Une exception notable est IMAGE, qui a fourni les premières mesures directes à distance de la magnétopause grâce au *Radio Plasma Imager*, confirmant sa forme et son mouvement. Toutefois, ces mesures radio ne donnaient la position de la frontière que dans une seule direction à un instant t , d'où le besoin de multiples observations unidirectionnelles pour reconstruire la surface complète.

Émissions X par échange de charge : nuisance ou opportunité ?

Pour obtenir une vision globale de la forme et de la position de la magnétopause en s'affranchissant des contraintes spatio-temporelles des mesures *in situ*, une nouvelle technique de télédétection a été envisagée : l'imagerie par rayons X.

Cette approche s'inspire de la détection inattendue des comètes aux rayons X par le satellite ROSAT en 1996 (<https://cutt.ly/heasarc-nasa-hyakutake>). Les comètes étant froides, leur émission X fut initialement une surprise, mais fut vite interprétée comme l'émission X par échange de charge du vent solaire qui interagit avec les neutres cométaires [2] (voir encadré).

Les mêmes émissions sont produites autour des planètes, où le vent solaire interagit avec la couche externe de l'atmosphère (appelée exosphère). Pour la Terre, les premières observations ont aussi eu lieu avec ROSAT, durant le sondage du ciel effectué en 1990-1991, avant même la détection des

ÉMISSION X PAR ÉCHANGE DE CHARGE

L'émission X par échange (ou transfert) de charge (en anglais *Solar Wind Charge-exchange X-rays* ou SWCX) est produite quand les ions multichargés du vent solaire (par exemple l'oxygène ou le carbone) entrent en collision avec les atomes neutres d'une comète ou d'une atmosphère. Minoritaires dans le vent solaire, ces ions sont formés dans la couronne solaire et transportés avec le vent solaire. Lors des collisions avec des particules neutres (a), les ions capturent des électrons dans des niveaux électroniques excités (b). Leur désexcitation produit des photons X dans la gamme d'énergie 0,1 - 2 keV (c).

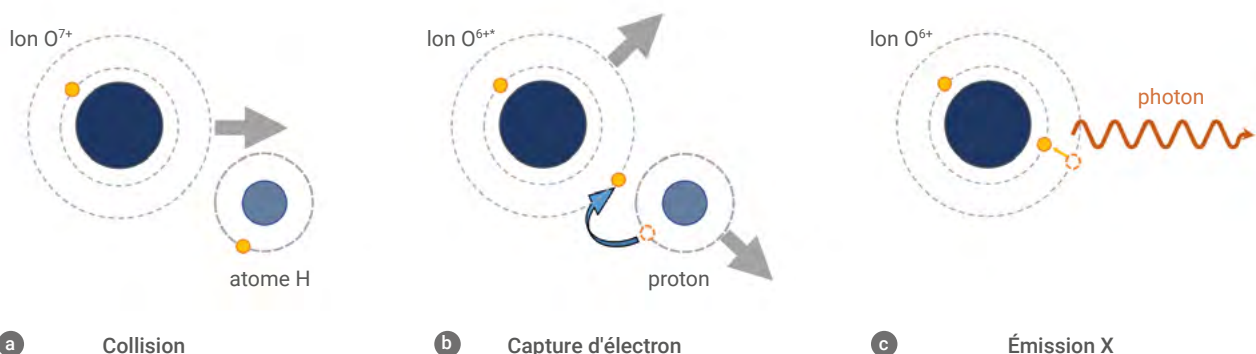
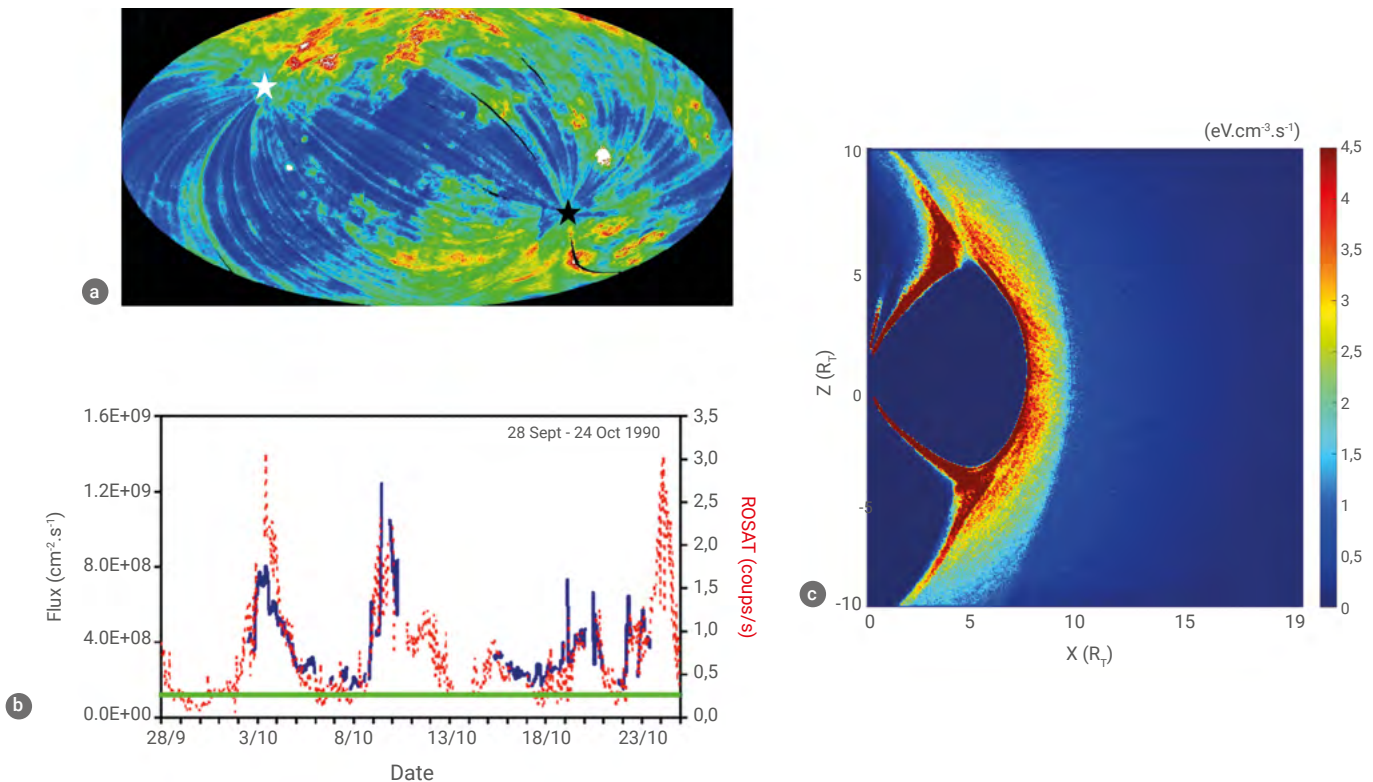


Schéma du mécanisme d'émission par échange de charge.

(a) L'ion (ex. O^{7+} , bleu foncé) entre en collision avec un atome d'hydrogène terrestre (bleu clair). Les cercles pointillés indiquent les niveaux électroniques (électrons en jaune) et les flèches grises les vitesses.

(b) L'atome H cède son électron, capté sur un niveau excité de l'ion devenu O^{6+} .

(c) Lors de la désexcitation vers l'état fondamental, l'électron émet un photon X.



2. (a) Carte X (0,1 – 0,4 keV) issue du sondage ROSAT, en coordonnées galactiques, avec le centre galactique au milieu [3]. L'échelle de couleur indique l'intensité (bleu = faible, rouge = forte). Les stries vertes reliant les pôles écliptiques nord (étoile blanche) et sud (étoile noire) proviennent de l'émission SWCX terrestre et du mode de balayage de ROSAT (grands cercles perpendiculaires à l'axe Soleil – Terre).

(b) Le signal ROSAT (rouge, coups/s) suit étroitement les variations du vent solaire (bleu, particules/cm²/s), d'après [4]. La ligne horizontale verte indique la correction empirique appliquée au niveau minimal quasi constant.

(c) Coupe d'émissivité SWCX (eV.cm⁻³.s⁻¹) dans le plan méridional (XZ), calculée avec le code particule-test du laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS) [5]. La Terre se situe à la position (0,0), le pôle nord est vers +Z. Le vent solaire arrive de droite à gauche : la production SWCX, quasi nulle dans le vent non perturbé, augmente à l'onde de choc (~10 R_T), atteint son maximum à la magnétopause (~7 R_T) et dans les cornets. À l'intérieur de la magnétopause, l'émission est nulle, à cause de l'absence d'ions du vent solaire.

comètes. À l'époque, ce signal terrestre, très variable et parfois plus intense que l'émission du ciel profond visée (fig. 2a), était traité comme un bruit parasite qui faussait l'interprétation des processus qui avaient réellement lieu dans les cibles astrophysiques. Son origine, d'abord inconnue, fut rapidement corrélée aux variations du vent solaire (fig. 2b). Les astrophysiciens appliquèrent alors une correction empirique au niveau minimum quasi stable pour l'éliminer et obtenir des cartes aux rayons X propres.

L'intensité SWCX (*Solar Wind Charge-exchange X-rays*) est proportionnelle à la quantité de neutres et au flux ionique, d'où sa forte corrélation avec le vent solaire. Dès lors, et grâce à l'interprétation des observations cométaires, les spécialistes du vent solaire et des plasmas spatiaux identifièrent l'émission SWCX comme un outil potentiel pour étudier l'interaction vent solaire-planètes, en particulier pour la Terre.

Les ions du vent solaire étant généralement exclus de la cavité magnétosphérique (à l'intérieur de la magnétopause), l'émission SWCX y est quasi nulle. Dans le vent solaire non perturbé (en amont de l'onde de choc), la densité ionique est suffisante mais la densité des neutres trop faible (cette densité varie comme l'inverse du cube du rayon terrestre). En revanche, dans la magnétopause, où les ions sont comprimés contre la magnétopause, la densité des neutres reste assez élevée. Ainsi, dans cette région, l'émission SWCX se retrouve amplifiée. De même, dans les cornets polaires, les ions pénètrent facilement le long des lignes de champ ouvertes et atteignent des couches atmosphériques plus denses, augmentant à nouveau l'émission. Nous obtenons ainsi un nouveau diagnostic, complémentaire des mesures *in situ*, qui permet de cartographier la magnétopause et les cornets polaires et d'étudier leurs variations temporelles (fig. 2c).

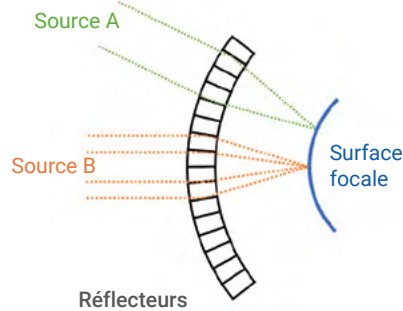
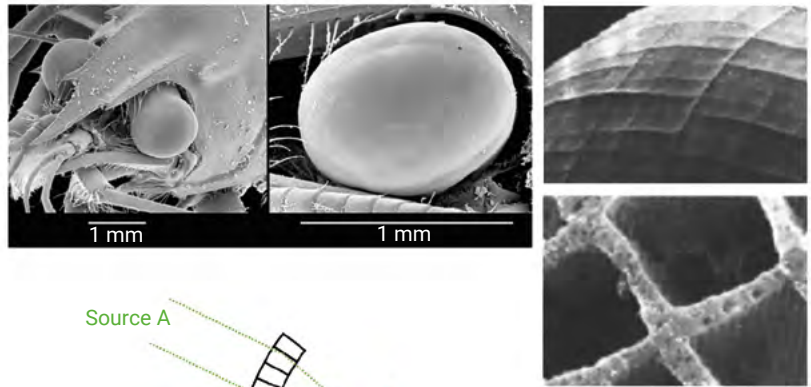
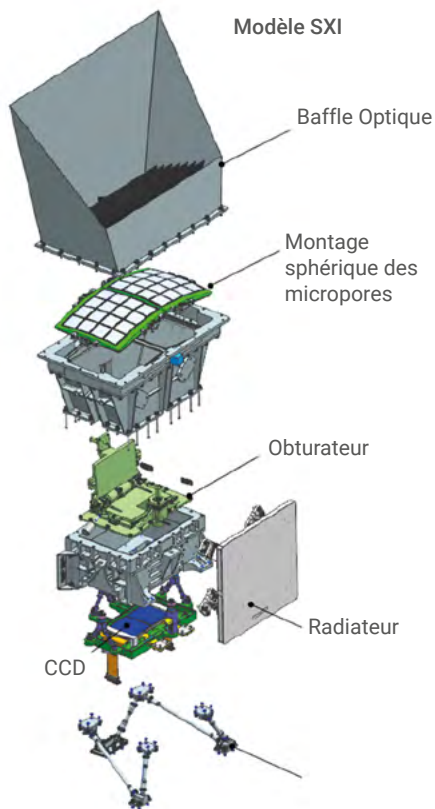
Plusieurs projets ont été proposés à la NASA (MagEX, STORM) et à l'ESA (AXIOM et AXIOM-C) afin d'exploiter cette technique de cartographie X du champ magnétique terrestre. Ces efforts ont conduit en 2015 à la sélection de SMILE, mission conjointe entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et l'Académie des sciences chinoise (CAS).

La mission SMILE

La charge utile de SMILE comprend deux instruments de télédétection – le spectro-imageur *Soft X-ray Imager* (SXI) et un imageur ultraviolet auroral (*Ultraviolet aurora Imager* - UVI) – ainsi qu'un ensemble de détecteurs *in situ* regroupant un analyseur d'ions légers (*Light Ion Analyser* - LIA) et un magnétomètre (MAG) pour surveiller les propriétés du plasma dans le vent solaire et la magnétopause.

SXI (fig.3 à gauche) est un télescope à grand champ, utilisant la technologie

>>>



3. Gauche : éclaté du modèle SXI montrant les principaux éléments : baffle optique, tubes à micropores, obturateur, radiateur et CCD [6].
Droite : vues à différentes échelles d'un œil de homard illustrant les micropores (Photo : ESA/J.Camp), avec en bas le schéma du principe de fonctionnement.

>>>

d'optique à micropores, pour cartographier la position, la forme et l'évolution de la magnétopause et des cornets polaires via l'émission SWCX. Il intègre deux grandes caméras CCD (*Charge-Coupled Device*) sensibles aux rayons X couvrant la gamme 0,2–2,5 keV permettant une caractérisation spectrale de l'émission [6].

Le système d'optique à micropores est aussi appelé *lobster-eye* (œil de homard), car la même géométrie se retrouve dans les yeux des crustacés (fig. 3 à droite). Les yeux du homard sont constitués de pores carrés microscopiques parallèles, disposés sur une sphère, qui réfléchissent la lumière sous un angle d'incidence faible – comme des ricochets – vers différents points de la surface focale. En combinant ces points, le homard peut voir l'objet dans son ensemble. Optimale en faible luminosité, la méthode se dégrade en forte lumière : les réflexions multiples génèrent du bruit. Elle est particulièrement adaptée aux faibles rapports signal/bruit, comme dans le domaine des rayons X.

Ce système a été testé pour la première fois en vol avec le prototype STORM (*Sheath Transport Observer for Redistribution of Mass*) lors du lancement de la fusée suborbitale DXL en 2012 [7]. Grâce à cette technologie, SXI dispose d'un large champ

de vue ($15,5^\circ \times 26,5^\circ$) pour une taille relativement modeste – 85 cm avec son baffle, pour 32 kg environ – alors que l'ensemble de la plateforme SMILE mesure 3,5 m de long pour environ 700 kg. À titre de comparaison, ROSAT offrait un champ de vue de seulement 2° , pour une longueur totale d'environ 5 m et une masse de 2,4 tonnes, tandis que le télescope spatial XMM-Newton possède un champ de vue d'environ $30'$, pour une longueur totale d'environ 10 m et une masse de 3,8 tonnes.

UVI est une caméra UV pour imager les aurores boréales. Elle reliera les processus aux frontières de la magnétosphère (vus par SXI) à ceux affectant les particules chargées précipitant dans l'ionosphère. Basée sur un capteur numérique CCD, elle opère entre 155 et 175 nm, avec un champ de vue de $10^\circ \times 10^\circ$. Sa résolution sera de 150 km à l'apogée, avec quatre miroirs à revêtement mince pour focaliser la lumière. La résolution temporelle atteindra 60 s.

LIA déterminera les propriétés et le comportement des ions du vent solaire et de la magnétogaine en mesurant la distribution 3D des vitesses des protons et des particules alpha. Il comprend deux analyseurs électrostatiques montés de part et d'autre de la plateforme. Il échantillonne la distribution 3D complète sur 4π et mesure les ions

d'énergie comprise entre 0,2 et 20 keV, avec une résolution temporelle jusqu'à 0,25 s.

MAG mesurera l'orientation et l'amplitude du champ magnétique du vent solaire et détectera les chocs et discontinuités le long de l'orbite de la sonde. Deux capteurs triaxiaux seront installés sur une perche de 3 m, espacés de ~ 80 cm, avec l'électronique sur le corps principal. Cette configuration permet un fonctionnement en gradiomètre et la soustraction précise du champ propre du satellite. MAG mesurera les trois composantes du champ magnétique.

La mission utilise un satellite stabilisé sur trois axes, placé sur une orbite très elliptique et inclinée (apogée de $\sim 20 R_T$ et 73° d'inclinaison), d'une période d'environ 51 heures. Les opérations ont lieu au-dessus d'une altitude de 50 000 km, lorsque le satellite se trouve hors des ceintures de radiation. Cela permet de maximiser les observations continues de la magnétogaine diurne avec SXI et des aurores boréales avec UVI à chaque orbite (fig. 4 à gauche). Pendant l'essentiel de l'orbite de SMILE, les CCD de SXI opèrent en mode comptage de photons, fournissant pour chaque photon X détecté son temps d'arrivée, son énergie et sa position sur le détecteur.

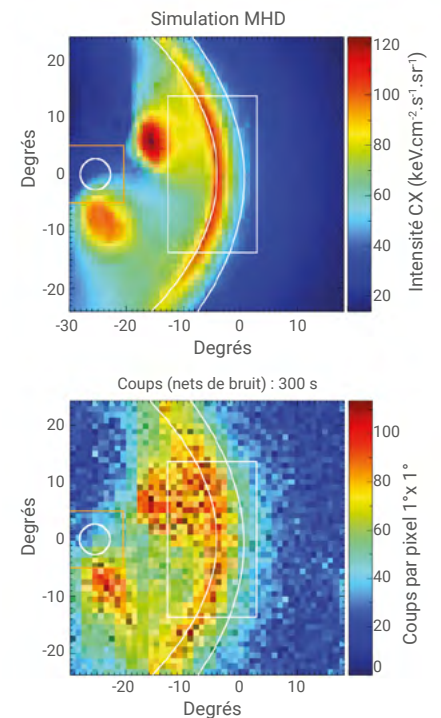
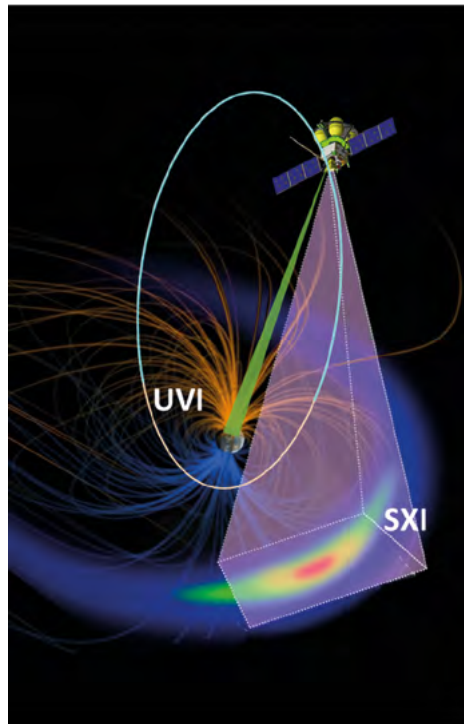
Un groupe de travail international (UK, France, Chine, USA, Autriche, Finlande) pilote les activités de simulation afin de prédire le signal SWCX et d'évaluer la capacité de SXI à satisfaire les exigences scientifiques : détection de la magnétopause et des cornets polaires. Le groupe emploie des codes magnétosphériques (MHD, hybrides, particule-test, cinétiques) pour modéliser en 3D la production SWCX, prédire les variations des frontières magnétosphériques selon les conditions de vent solaire et développer des méthodes d'extraction de la magnétopause et des cornets polaires. Les volumes simulés sont intégrés le long de la ligne de visée de SXI depuis différentes positions orbitales, combinés au signal du fond du ciel et le bruit de particules, puis traités par un simulateur de SXI afin de générer images et spectres associés selon la réponse instrumentale (fig. 4 à droite). Les résultats montrent que SXI pourra localiser la magnétopause subsolaire avec une précision d'environ $0,5 R_T$, pour un vent solaire typique ($\sim 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) et un temps d'intégration de 5 minutes.

Conclusion

SMILE est prévu pour une durée nominale de 3 ans, extensible jusqu'à 7 ans avant désorbitation. Son lancement, prévu au printemps 2026 juste après le maximum du cycle solaire, lui permettra d'observer une large variété de phénomènes solaires énergétiques, d'étudier la réponse de la magnétosphère et de caractériser les émissions SWCX terrestres.

Ce type d'émission X est observé depuis plus de 35 ans dans divers environnements (comètes, Mars, Terre, Jupiter, milieu interplanétaire). En orbite terrestre, il a toujours été considéré comme une nuisance pour les observations astrophysiques lointaines, car il est extrêmement variable et difficilement prévisible. Avec SMILE, il devient pour la première fois l'objet central d'une mission dédiée, ouvrant des perspectives majeures pour l'héliophysique, la météo de l'espace et l'astrophysique.

L'auteure remercie Steve Sembay, Qiuyu Xu, Simona Nitti, Ronan Modolo, Jenny Carter et Colin Forsyth ainsi que le CNES qui finance les travaux de simulation des équipes françaises associées à SMILE. ■



4. Gauche : Vue d'artiste de SMILE, avec un modèle des lignes du champ magnétique terrestre (source S. Nitti, NASA). La phase active des instruments est surlignée en bleu clair sur l'orbite. Le champ de vue SXI (pyramide pâle) cible les émissions SWCX de la magnétogaine diurne. Celui de UVI (faisceau vert) vise l'empreinte du cornet polaire nord. Droite : Carte d'intensité SWCX (en $\text{keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$) issue de simulations MHD (haut) et image issue du simulateur SXI (bas), nette de bruit (en coups/pixel), pour le cas d'un CME impactant la Terre. Le vent solaire s'écoule de droite à gauche. Les régions de la magnétopause (arc rouge) et des cornets polaires (ovales rouge-orangé) se détachent nettement. Les courbes blanches indiquent la magnétopause (interne) et l'onde de choc (externe). Le champ de vue SXI réel (rectangle blanc) ne couvre qu'une partie de l'image. Le cercle blanc marque la Terre et le rectangle orange le champ de vue UVI. Images tirées de [8].



- 1• L. Rezeau et G. Belmont, *Reflète de la Physique* **59** (2018) 20-25, <https://doi.org/10.1051/refdp/201859020>
- 2• T.E. Cravens, *Geophysical Research Letters* **24**, 1 (1997) 105-108, <https://doi.org/10.1029/96GL03780>
- 3• S.L. Snowden et al., *The Astrophysical Journal* **691**, 1 (2009) 372-381, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/1/372>
- 4• T.E. Cravens et al., *Journal of Geophysical Research* **106**, A11 (2001) 24883-24892, <https://doi.org/10.1029/2000JA000461>
- 5• Q. Xu et al., *JGR: Space Physics* **130** (2005) e2025JA034416, <https://doi.org/10.1029/2025JA034416>
- 6• S. Sembay et al., *Earth and Planetary Physics* **8**, 1 (2024) 5-14, <https://doi.org/10.26464/epp2023067>
- 7• M.R. Collier et al., *Rev. Sci. Instrum.* **86** (2015) 071301, <https://doi.org/10.1063/1.4927259>
- 8• G. Branduardi-Raymont et C. Wang, "The SMILE Mission", *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics* **95** (2022), <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.03757>

Une croix d'Einstein exceptionnelle révèle un halo de matière noire

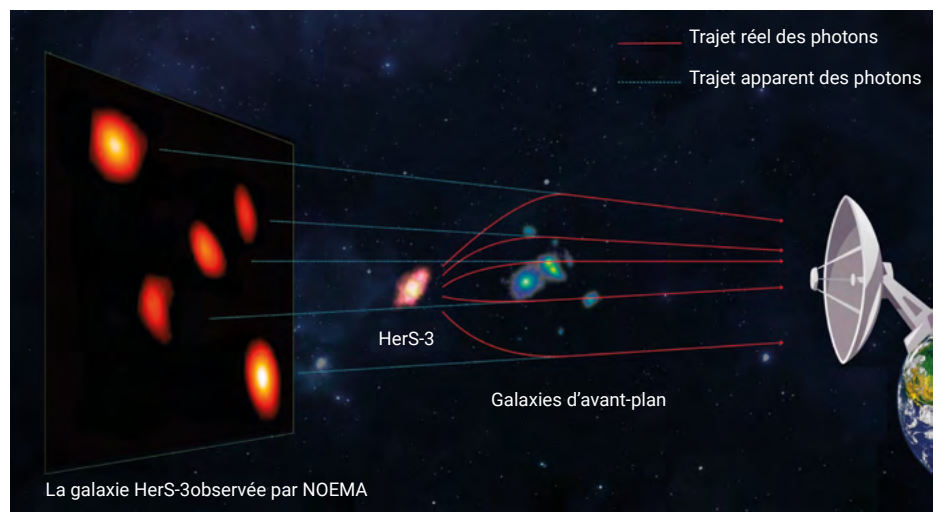
Pierre Cox (pierre.cox@iap.fr), Institut d'Astrophysique de Paris, 98b boulevard Arago, 75014 Paris

Le phénomène d'amplification gravitationnelle permet d'observer des galaxies aux confins de l'Univers en traçant avec une grande précision leurs morphologies et leurs conditions physiques. Récemment, grâce aux observations obtenues avec deux interféromètres, le *Northern Extended Millimeter Array* (NOEMA, Institut de Radioastronomie Millimétrique – IRAM, France) et le *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA, Chili), une galaxie dans l'univers lointain s'est révélée être gravitationnellement amplifiée en une croix d'Einstein contenant une cinquième image en son centre. Cette configuration, qui n'a jamais été vue jusqu'à maintenant, ne peut s'expliquer que par la présence d'un halo massif de matière noire associé au groupe de galaxies d'avant-plan qui amplifie la lumière de la source. Cette découverte a mis en lumière un laboratoire unique pour sonder la matière noire et mieux comprendre l'évolution des galaxies.

Une amplification gravitationnelle se produit lorsque la lumière d'une galaxie lointaine passe par une galaxie massive (ou un groupe de galaxies), qui déforme l'espace-temps. La trajectoire de la lumière de la source d'arrière-plan est infléchi, la rendant plus brillante et produisant de multiples images, des arcs ou un anneau. L'amplification qui en résulte permet d'étudier en détail les galaxies de l'Univers primordial.

Pour un alignement presque parfait et une distribution elliptique de la masse de la lentille, la galaxie d'arrière-plan apparaîtra comme un système avec quatre images. L'archétype de tels systèmes est la croix d'Einstein où les quatre images distinctes forment une croix avec un grand degré de symétrie. Trouver des croix d'Einstein reste un défi observationnel et, à ce jour, la majorité d'entre elles ont été détectées par des observations faites dans les domaines optique et proche infrarouge [1, 2].

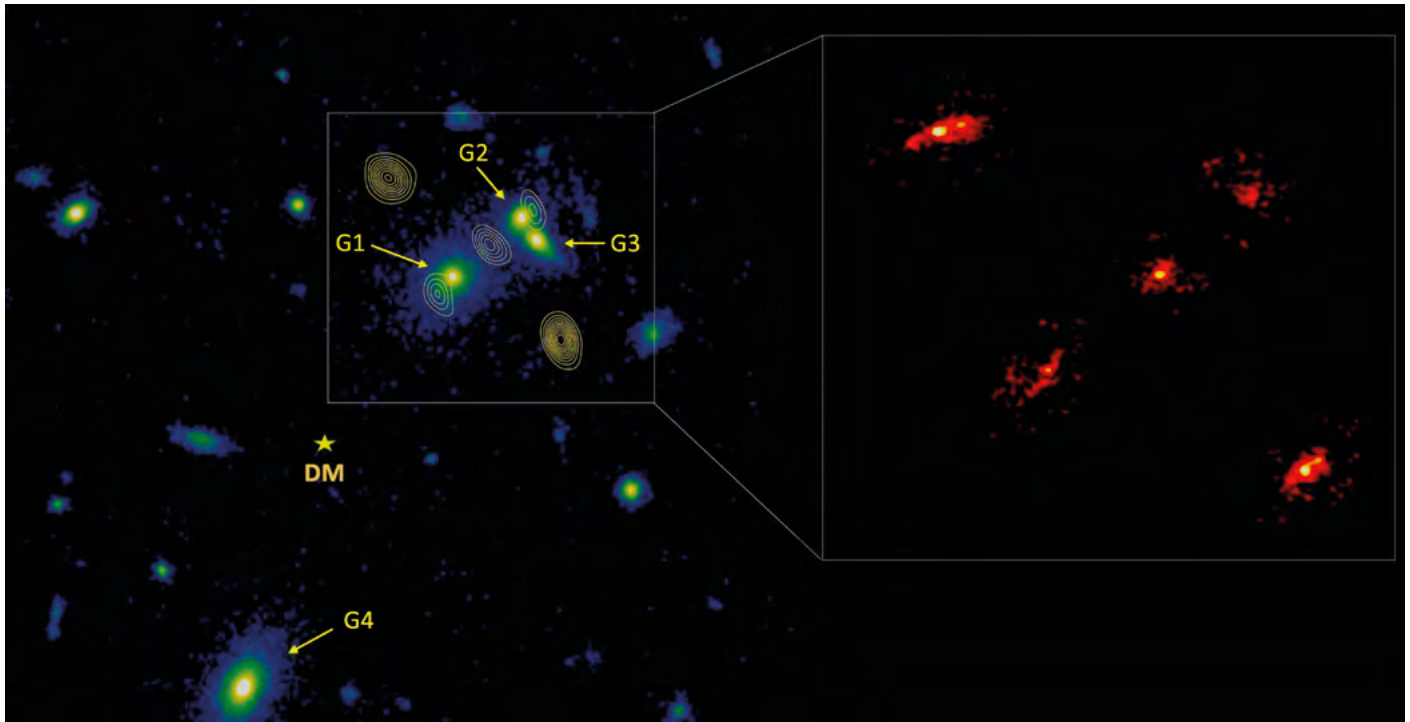
Les premiers calculs d'amplification gravitationnelle appliqués à des étoiles (lentille et source amplifiée) ont été publiés par O. Chwolson en 1924 [3] et, une décennie plus tard, par A. Einstein [4] qui remarquait dans son article « qu'il n'y avait pas grande chance de pouvoir observer ce



1. Représentation de l'amplification gravitationnelle de la galaxie HerS-3 par le groupe de galaxies d'avant-plan, montrant le trajet réel des photons (en rouge) et le trajet apparent (en bleu). La masse des galaxies du groupe et de son halo de matière noire agit comme une lentille gravitationnelle en déviant la lumière émise par HerS-3. Pour l'observateur, la galaxie lointaine apparaît comme une croix d'Einstein avec une cinquième image en son centre. © Nicolás Lira Turpaud (ALMA Observatory), adapté de Cox et al. (2025).

phénomène ». Une année plus tard, en 1937, F. Zwicky [5] soulignait que des nébuleuses extragalactiques (soit des galaxies) « offraient une bien meilleure chance que les étoiles pour observer les effets de lentille gravitationnelle ». Quarante années s'écoulerent avant la première découverte dans le visible d'un quasar lointain amplifié en

deux images distinctes [6]. Peu de temps après cette découverte, en 1985, le troisième objet amplifié, de nouveau un quasar lointain, se révélait être amplifié en quatre images distinctes, formant une croix parfaite et connue depuis sous le nom de croix d'Einstein [1].



2. À gauche : la galaxie HerS-3, amplifiée gravitationnellement dans une croix d'Einstein, avec une cinquième image centrale, telle qu'observée par NOEMA dans le continuum millimétrique (contours jaunes), superposée à l'image proche infrarouge du HST, identifiant les quatre galaxies (G1 à G4) du groupe de galaxies d'avant-plan. L'étoile jaune indique la position du halo de matière noire (DM) associé au groupe.

À droite : morphologie détaillée de chacune des cinq images de la croix d'Einstein révélées par ALMA. Adapté de Cox *et al.* (2025).

De nombreux cas de galaxies gravitationnellement amplifiées ont été découverts dans le domaine submillimétrique, en observant des galaxies riches en poussières et lumineuses dans l'infrarouge lointain. La grande majorité de ces systèmes sont amplifiés par des galaxies d'avant-plan sphériques et apparaissent comme des anneaux d'Einstein complets ou partiels, ou bien des arcs étendus [7]. De rares cas d'anneaux d'Einstein ont aussi été observés dans le domaine optique, comme récemment avec le télescope spatial Euclid [8].

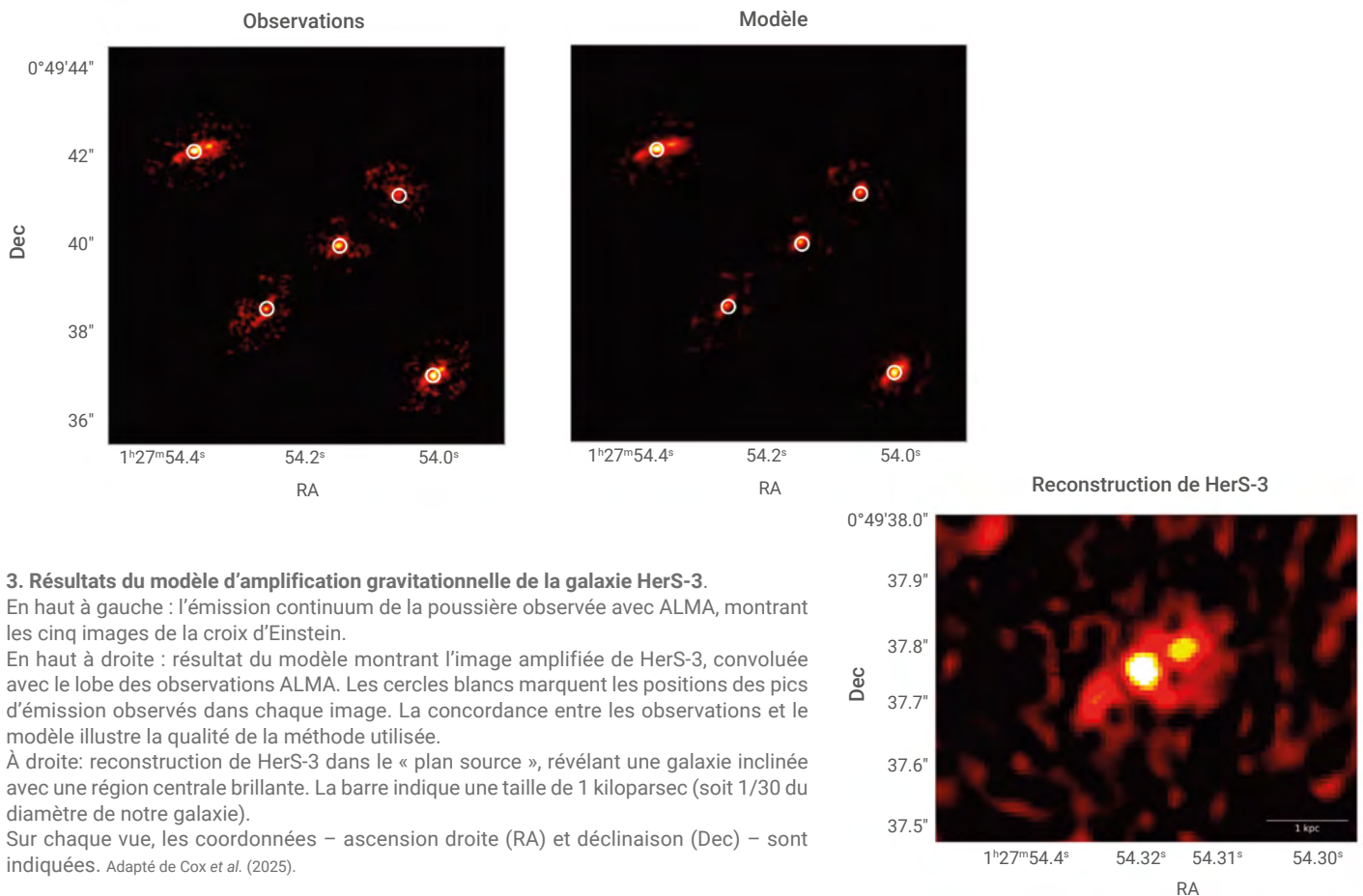
Les lignes de visée le long desquelles sont observées des galaxies gravitationnellement amplifiées constituent de puissants laboratoires astrophysiques qui permettent de contraindre les propriétés de la matière noire dans les galaxies, les groupes et les amas de galaxies d'avant-plan. Les théories actuelles suggèrent que la matière noire, qui représente environ 80 % de la masse de l'Univers, est constituée de particules encore inconnues qui n'interagissent pas avec la lumière visible. Cependant, en raison de sa masse importante, la matière noire peut être identifiée par son influence gravitationnelle.

Lorsque NOEMA a observé la galaxie HerS-3, située à 11,6 milliards d'années-lumière, cinq images distinctes sont apparues, produisant une croix presque parfaite (fig. 1). Cette croix d'Einstein, un phénomène déjà rare est, dans ce cas, encore plus extraordinaire en raison de la présence d'une cinquième image centrale. Chacune des cinq images est détectée dans plusieurs raies d'émission moléculaire, observées avec NOEMA à des fréquences (décalées vers le rouge) identiques, indiquant que les images tracent la même galaxie lointaine et sont donc le résultat d'une amplification gravitationnelle. Les observations réalisées avec ALMA ont permis, grâce à la meilleure résolution angulaire, de révéler la morphologie détaillée de chaque image (fig. 2). La remarquable configuration de lentille de HerS-3 est aussi la première détection d'une croix d'Einstein aux longueurs d'onde submillimétrique. La lumière de HerS-3 est déviée le long de la ligne de visée par quatre galaxies massives (fig. 2) qui sont au cœur d'un groupe plus vaste contenant au moins dix autres galaxies, situées à 7,8 milliards d'années-lumière de la Terre, et qui ont été identifiées dans le proche-infrarouge par le *Hubble Space Telescope* (HST).

>>>

“
Le système de HerS-3, avec sa croix d'Einstein contenant une cinquième image centrale, est un laboratoire astrophysique unique, créé par l'Univers lui-même.

”



3. Résultats du modèle d'amplification gravitationnelle de la galaxie HerS-3.

En haut à gauche : l'émission continuum de la poussière observée avec ALMA, montrant les cinq images de la croix d'Einstein.

En haut à droite : résultat du modèle montrant l'image amplifiée de HerS-3, convoluée avec le lobe des observations ALMA. Les cercles blancs marquent les positions des pics d'émission observés dans chaque image. La concordance entre les observations et le modèle illustre la qualité de la méthode utilisée.

À droite: reconstruction de HerS-3 dans le « plan source », révélant une galaxie inclinée avec une région centrale brillante. La barre indique une taille de 1 kiloparsec (soit 1/30 du diamètre de notre galaxie).

Sur chaque vue, les coordonnées – ascension droite (RA) et déclinaison (Dec) – sont indiquées. Adapté de Cox et al. (2025).



- 1• J. Huchra, M. Gorenstein, S. Kent et al., *Astronomical Journal* **90** (1985) 691.
- 2• D. Stern, S. G. Djorgovski, A. Krone-Martins, et al., *Astrophysical Journal* **921** (2021) 42.
- 3• O. Chwolson, *Astronomische Nachrichten* **221** (1924) 329.
- 4• A. Einstein, *Science* **84** (1936) 506.
- 5• F. Zwicky, *Physics Review* **51** (1937) 679.
- 6• D. Walsh, R. F. Carswell et R. J. Weymann, *Nature* **279** (1979) 381.
- 7• ALMA Partnership, C. Vlahakis, T. R. Hunter et al., *Astrophysical Journal Letters* **808** (2015) L4.
- 8• C.M. O'Riordan, L.J. Oldham, A. Nersesian et al., *Astronomy & Astrophysics* **694** (2025) A145.

Cette étude est présentée dans l'article intitulé "HerS-3: An Exceptional Einstein Cross Reveals a Massive Dark Matter Halo" publié dans l'*Astrophysical Journal* : Cox, Butler, Keeton et al., *Astrophysical Journal Letters* **991** (2025) 53 <https://cutt.ly/iopscience-iop-org-pdf>

>>>

Afin de reconstituer les propriétés intrinsèques de la galaxie lointaine HerS-3 et d'explorer les caractéristiques du groupe de galaxies en avant-plan, un modèle d'amplification gravitationnelle, qui simule la façon dont la gravité courbe la lumière de galaxies, a été appliqué. En ne prenant en compte que les quatre galaxies massives visibles et situées à proximité de HerS-3 au centre du groupe de galaxies, les modèles n'ont pas pu reproduire de manière précise les propriétés de chacune des cinq images de la croix d'Einstein.

L'absence dans le champ d'une autre galaxie visible à la même distance et proche du groupe a ouvert la possibilité d'une autre composante massive et invisible : un halo de matière noire associé au groupe de galaxies. En ajoutant cette composante massive, située au centre de masse du groupe (fig. 2), le modèle reproduit avec une grande précision les propriétés de chacune des cinq images, à savoir leurs positions, leurs orientations et leurs morphologies (fig. 3). La masse estimée du halo de matière

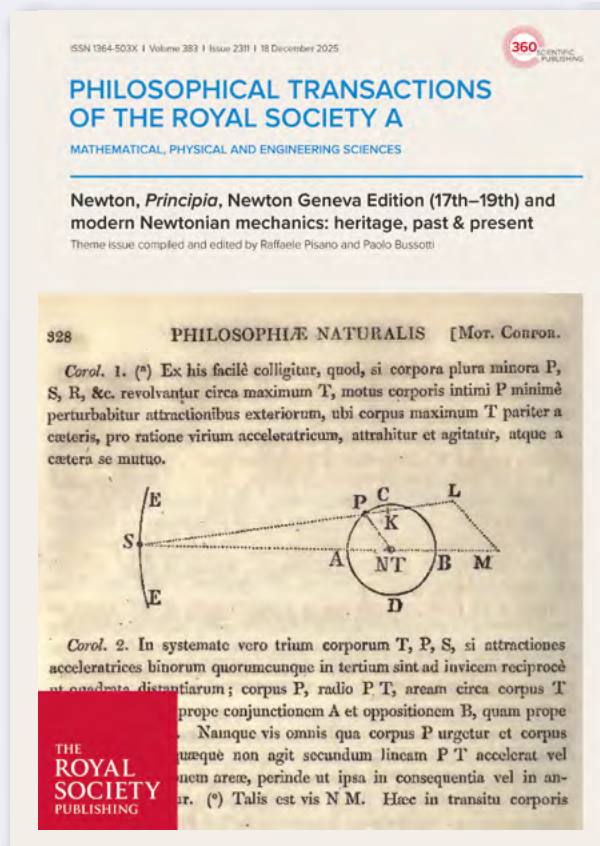
noire s'élève à quelques mille milliards de masses solaires.

Une fois reconstruit à partir de ce modèle d'amplification gravitationnelle, HerS-3 apparaît comme une galaxie lumineuse, en rotation et inclinée (fig. 3c), formant activement des étoiles (de l'ordre de 500 masses solaires par an), avec un flot de gaz moléculaire éjecté de la région centrale.

Le système de HerS-3, avec sa croix d'Einstein contenant une cinquième image centrale, est un laboratoire astrophysique unique, créé par l'Univers lui-même. Il nous permet d'observer la structure complexe d'une galaxie durant la phase la plus active de l'évolution cosmique, tout en révélant, dans le groupe de galaxies d'avant-plan, la présence du halo de matière noire, cette masse cachée qui forme les galaxies et sculpte l'Univers. L'étude plus détaillée de tels systèmes pourrait nous permettre de révéler les propriétés de la matière noire et de mieux comprendre son influence au cours de l'évolution cosmique. ■

Une publication des textes de Newton commentés

Royal Society Publishing a récemment publié un numéro spécial de *Philosophical Transactions A* : "Newton, Principia, Newton Geneva Edition (17th–19th) and modern Newtonian mechanics: heritage, past & present" compilé et édité par Raffaele Pisano et Paolo Bussotti.



Ce numéro thématique est consacré à l'édition latine genevoise (1739–1742, 4 volumes) des *Principia* de Newton (3^e édition, 3 volumes). Il comprend une analyse du texte original de Newton ainsi que des commentaires de l'éditeur en notes de bas de page. Ces derniers explicitent les propositions et les théorèmes de Newton – en particulier ceux que Newton n'a pas expliqués – et sont plus développés que le texte de Newton lui-même. L'édition genevoise constitue une clé essentielle pour comprendre la science newtonienne.

Ce numéro est structuré en trois parties : 1) une introduction au sujet, 2) des études de cas historico-scientifiques consacrées aux démonstrations de Newton et à leur diffusion, 3) l'héritage newtonien et l'approche de la mécanique et des disciplines connexes dans la physique, les mathématiques et l'ingénierie modernes.

On peut se procurer les articles en suivant le lien bit.ly/TransA2311.



Vide & Cryogénie

Omega Physics, c'est:

- Des pompes sèches incroyablement silencieuses 
- Des RGA enfin à prix raisonnable 
- Des systèmes pour l'élaboration de couches minces: PVD, CVD, ALD,...
- Toutes les technologies du vide: Pompes turbo, raccords, joints, chambres...
- De la cryogénie: GM cryocoolers, cryopompes, liquéfacteurs...



Catalogue en ligne

Localiser les atomes dans le désordre : une affaire française

Nicolas Cherroret (nicolas.cherroret@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel (LKB, UMR 8552 CNRS, Sorbonne Université, ENS-PSL Research University, Collège de France),
4 Place Jussieu, 75005 Paris

Lorsqu'une particule quantique se propage dans un environnement désordonné, son comportement devient contre-intuitif : au lieu de diffuser sur de longues distances comme le ferait une particule classique, elle reste piégée dans une région finie de l'espace. Ce phénomène, appelé localisation d'Anderson, résulte d'interférences quantiques subtiles et universelles et continue de fasciner les physiciens. En juin 2025, une conférence scientifique s'est tenue à Paris afin de faire le point sur les avancées récentes dans ce domaine, notamment dans le contexte des atomes froids. Cet événement a également rendu hommage à Dominique Delande, chercheur du CNRS disparu récemment et figure majeure de la physique des systèmes quantiques complexes. Il a réuni de nombreux spécialistes, témoignant du dynamisme national autour de ce sujet fondamental. Retour sur un champ de recherche où les laboratoires français brillent, à la croisée de la théorie et de l'expérience.

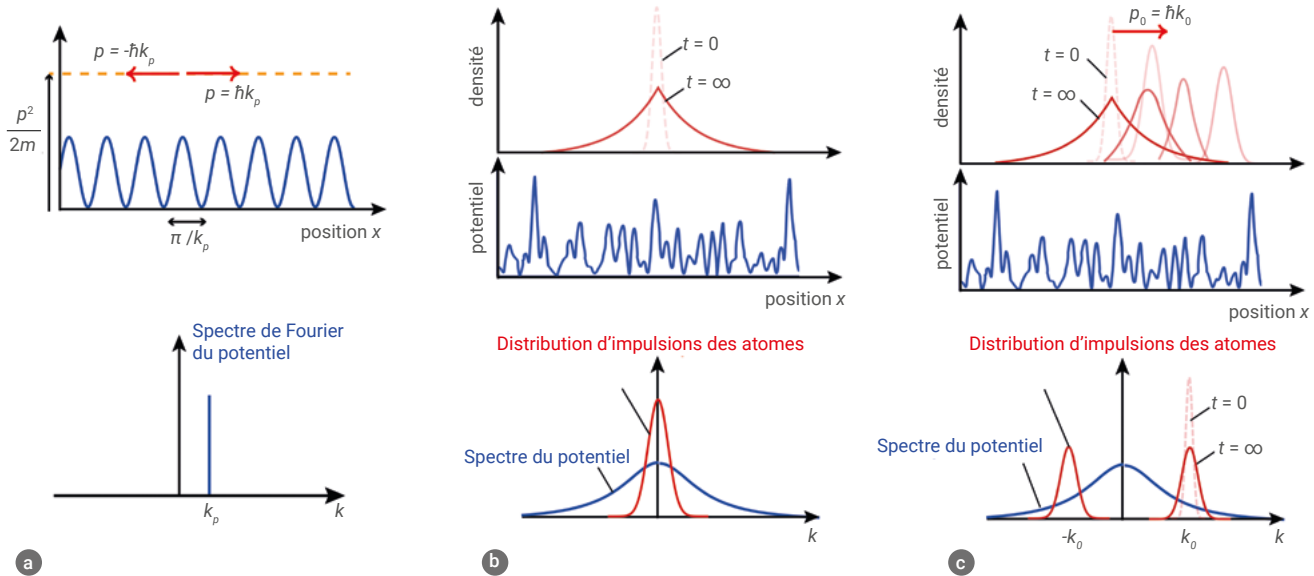
Les 16 et 17 juin 2025, une conférence scientifique organisée au cœur de Paris, à Sorbonne Université, a réuni plus d'une centaine de physiciens venus échanger autour de la physique des systèmes quantiques complexes. L'événement a été l'occasion de rendre hommage à Dominique Delande, chercheur du CNRS au Laboratoire Kastler Brossel (LKB), qui a consacré sa carrière à l'étude de ces systèmes, en particulier dans le contexte de la physique atomique. Le programme a accordé une place importante à la physique de la localisation d'Anderson, du nom du chercheur américain lauréat du prix Nobel de physique en 1977. Depuis les premières observations indirectes de ce phénomène pour les électrons dans les métaux et semi-conducteurs, les deux dernières décennies ont vu fleurir de nombreuses avancées théoriques et expérimentales impliquant des atomes ultrafroids (voir encadré) – un domaine où les laboratoires français ont joué un rôle pionnier.

Tout commence avec un problème de conduction

L'histoire de la localisation d'Anderson trouve son origine dans la physique de l'état solide, à travers l'étude de la conduction

électrique assurée par les électrons des couches externes des atomes. Au début du XX^e siècle, le modèle de Drude décrit la résistance des métaux comme une friction des électrons due à leurs collisions avec les atomes du réseau cristallin. Cette image classique sera corrigée avec l'avènement de la mécanique quantique, qui montre que les électrons dans un cristal parfait possèdent des fonctions d'onde spatialement étendues (théorème de Bloch), conduisant à une conduction parfaite. En réalité, la résistance électrique dans un métal ou un semi-conducteur provient de la diffusion des électrons sur les défauts du cristal, c'est-à-dire la composante non régulière, ou *désordonnée* du matériau. Jusque dans les années 60, la théorie de Drude semblait néanmoins suffisante, prédisant qu'un désordre croissant réduit simplement la conductivité, sans remettre en cause le transport dans les métaux. Tout change en 1958, lorsque Philip Anderson démontre qu'au-delà d'un certain seuil de désordre, les fonctions d'onde des électrons se localisent spatialement, entraînant un blocage total du transport et une transition vers un état isolant [2]. Ce résultat, en rupture avec les modèles de Drude et de Bloch, met en lumière le rôle central du désordre dans le transport quantique. Sa portée sera

confirmée une quinzaine d'années plus tard par la théorie d'échelle de la localisation, inspirée notamment de travaux de David Thouless dans les années 1970. Cette approche définit le concept de localisation par la sensibilité des fonctions d'onde des électrons aux conditions de bord imposées au système, et conduit à une prédiction majeure et révolutionnaire à l'époque : dans un milieu même très faiblement désordonné, la localisation des fonctions d'onde est *inévitabile* en une et deux dimensions, tandis qu'en trois dimensions elle se manifeste sous la forme d'une transition de phase quantique entre un métal et un isolant à une certaine valeur critique de désordre. Dans les années 80, plusieurs expériences ont mis en évidence, par des mesures de conductivité électrique, des signatures de la suppression du transport électronique prédite par Anderson dans des métaux et semi-conducteurs. Dans ces matériaux, cette suppression n'est toutefois jamais parfaite en raison des vibrations du réseau cristallin, qui tendent à rétablir un transport *via* le couplage entre électrons et phonons. Par ailleurs, dans les expériences de matière condensée de l'époque, il était impossible de visualiser directement la localisation spatiale des fonctions d'onde électroniques.



1. Principe de la localisation d'Anderson à une dimension

(a) En présence d'un potentiel périodique de périodicité spatiale π/k_p , une particule quantique subit une réflexion de Bragg si son impulsion est exactement $p = \hbar k_p$ et ce, même si son énergie excède le maximum du potentiel.

(b) Contrairement à un potentiel périodique, un potentiel désordonné comporte de nombreuses composantes de Fourier k . Chaque composante d'impulsion $p = \hbar k$ d'un paquet d'onde trouve donc nécessairement une composante du potentiel à $2k$ sur laquelle elle est réfléchi. L'effet net est une localisation spatiale du profil de densité du paquet aux temps longs.

(c) Cas d'un paquet d'ondes initialement « poussé » avec une impulsion moyenne $p_0 = \hbar k_0$. Le paquet se déplace d'abord latéralement, avant de faire demi-tour et de finalement se localiser à sa position de départ : c'est l'effet de « boomerang quantique ». Il est lié à des interférences entre les composantes $-k_0$ et $+k_0$ de la distribution d'impulsions des atomes.

Une histoire d'ondes

On sait aujourd'hui que la localisation d'Anderson est avant tout un phénomène ondulatoire [3]. En mécanique quantique, toute particule massive (électron ou atome) est associée à une longueur d'onde de de Broglie, susceptible de produire des interférences à basse température. Dans un matériau, les ondes électroniques partielles, diffusées sur les irrégularités du potentiel représentant les défauts du cristal, peuvent interférer de manière destructive, ce qui conduit à une suppression du transport. Les figures 1a et 1b illustrent ce phénomène en une dimension : dans un potentiel périodique de périodicité π/k_p , une particule d'impulsion *exactement* $p = \hbar k_p$ subit une réflexion quantique selon la loi de Bragg (figure 1a). Cette réflexion empêche sa propagation à grande distance, même si son énergie $p^2/2m$ dépasse le maximum du potentiel – contrairement à une particule classique. Dans le cas d'un potentiel désordonné (figure 1b), dont le spectre de Fourier est étendu, une particule d'impulsion *quelconque* $p = \hbar k$ rencontre toujours une composante de Fourier à $2k$ sur laquelle elle est réfléchi.

Ainsi, pour un paquet d'onde contenant une gamme d'impulsions p , chaque composante de la gamme est réfléchi, ce qui conduit à la localisation spatiale du paquet aux temps longs. C'est le principe de la localisation d'Anderson à une dimension.

La localisation d'atomes froids et des nouvelles découvertes

Depuis le début des années 2000, les plateformes d'atomes froids ont permis d'explorer avec une précision inédite la physique de la localisation d'Anderson [4]. Ces expériences ont occupé une place centrale lors de la conférence de juin 2025 à Paris, et beaucoup ont été menées dans des laboratoires français, notamment au LCFIO à Palaiseau, au laboratoire PhLAM à Lille, ou encore au LCAR à Toulouse. La première observation directe de la localisation d'Anderson avec des atomes froids a été réalisée en 2008 au LCFIO [5], dans l'équipe de Vincent Josse et Alain Aspect. En générant un désordre optique de type *speckle* à partir d'un laser transmis à travers une surface rugueuse (fig. 2a), les

chercheurs ont suivi l'étalement, puis la localisation spatiale d'un nuage d'atomes ultrafroids guidé par un faisceau lumineux (figure 2b), reproduisant le scénario de la figure 1b.

La conférence parisienne a également mis en lumière des manifestations plus subtiles, mais spectaculaires, de la localisation d'atomes ultrafroids dans des *speckles* optiques. Arrêtons-nous sur l'une d'entre elles, reposant sur un scénario différent de celui du LCFIO : au lieu de sonder l'étalement symétrique d'un paquet d'onde, imaginons qu'on lui imprime initialement une impulsion moyenne p_0 , comme si l'on projetait une « balle quantique ». Dans ce cas, la distribution d'impulsions des atomes acquiert une forme piquée autour de p_0 , comme cela est illustré sur la figure 1c. Après son lancement, le paquet d'onde est diffusé élastiquement par le désordre, générant des composantes d'impulsions autour de $-p_0$. On peut alors montrer que l'interférence quantique entre les composantes p_0 et $-p_0$ provoque un demi-tour du paquet puis son retour vers son point de départ aux temps longs, à l'image d'un boomerang. Ce phénomène de « boomerang quantique », prédit

>>>

>>>

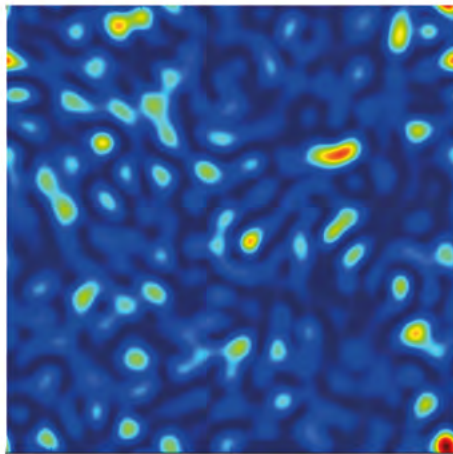
en 2019 par l'équipe de Dominique Delande au LKB [6], a ensuite été caractérisé dans différents types de systèmes désordonnés. Ces travaux théoriques ont conduit à la première observation expérimentale d'un boomerang quantique d'atomes froids à l'université de Californie en 2022 [7] (figure 2c). En parallèle, les chercheurs se sont également intéressés à la dynamique de la distribution d'impulsions elle-même, composée de deux lobes après le lancement du paquet (figure 1c). Sous l'effet de la localisation d'Anderson, chacun de ces lobes présente des signatures interférentielles

appelées pics de diffusion cohérente vers l'avant et vers l'arrière. Théorisés à partir de 2012 par l'équipe de Christian Miniatura au CQT à Singapour en collaboration avec le groupe du LKB [8], ces interférences dans l'espace des impulsions ont été observées indirectement par l'équipe de Jean-Claude Garreau et Pascal Szriftgiser au laboratoire PhLAM en 2019. Plus récemment, en 2025, le groupe de David Guéry-Odelin du LCAR de Toulouse en a fourni une observation directe, grâce à des outils avancés de contrôle optimal et de tomographie d'états quantiques [9] (figure 2d).

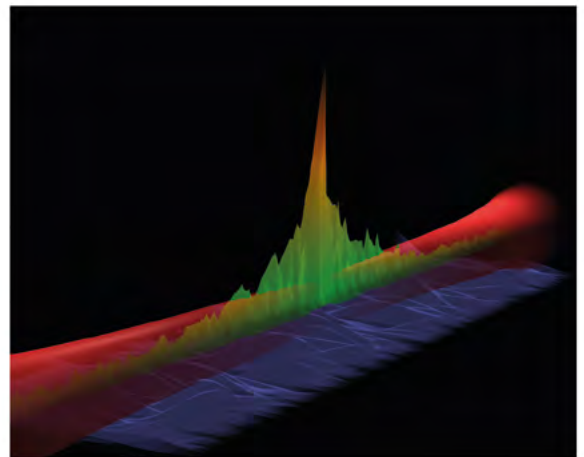
De nouvelles expériences et des problèmes ouverts

Près de 60 ans après la découverte d'Anderson, les expériences sur les atomes froids permettent désormais d'explorer les aspects les plus subtils du phénomène de localisation. L'un des plus marquants est la transition de phase métal-isolant, qui se produit généralement dans les milieux désordonnés en trois dimensions. Des travaux pionniers menés dès 2009 au laboratoire PhLAM à Lille, en collaboration avec Dominique Delande, ont permis d'en obtenir

Désordre optique de type *speckle*

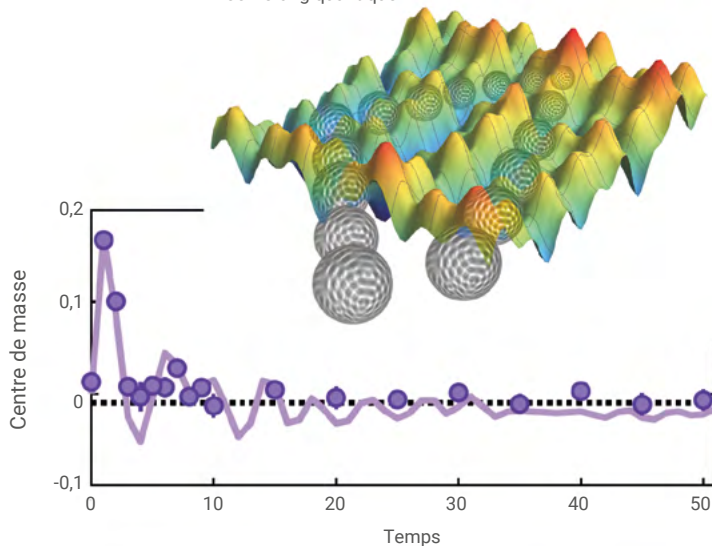


Localisation d'Anderson de paquet d'ondes

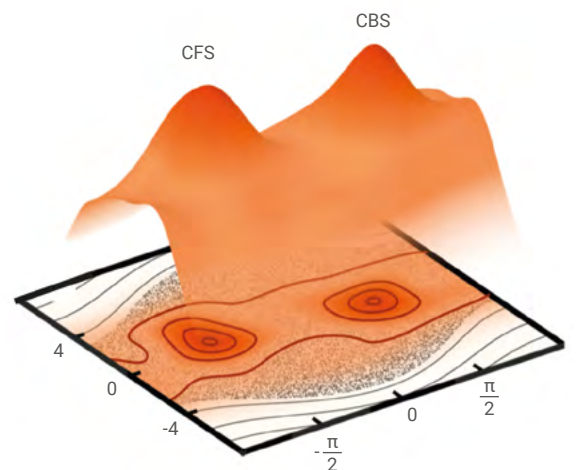


a b
c d

Boomerang quantique



Diffusion cohérente vers l'avant (CFS) et l'arrière (CBS)



2. La localisation d'Anderson sondée par des expériences d'atomes froids

- (a) Désordre optique de type *speckle*, produit par un laser transmis à travers une surface rugueuse
- (b) Localisation d'Anderson d'un paquet d'ondes atomique dans un guide optique désordonné [5].
- (c) Illustration d'artiste du phénomène de boomerang quantique d'une particule dans un paysage désordonné, et mesure expérimentale de l'effet boomerang sur le centre de masse d'un paquet d'onde en une dimension [6,7].
- (d) Reconstruction expérimentale des pics de diffusion cohérente vers l'avant et l'arrière dans un gaz quantique [9].

LES ATOMES ULTRAFROIDS COMME SIMULATEUR QUANTIQUE DE LA PHYSIQUE DU DÉSORDRE

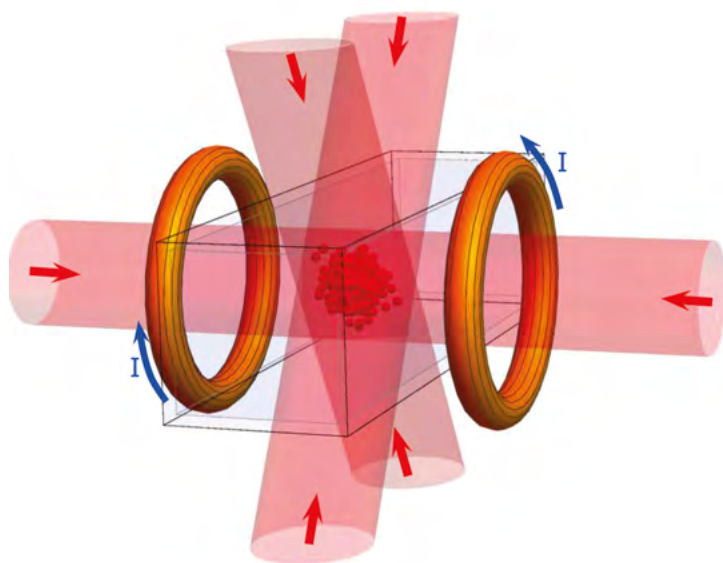


Schéma d'un piège magnéto-optique permettant le refroidissement et le piégeage d'atomes (figure adaptée de [1])

Depuis les années 2000, les gaz d'atomes ultrafroids se sont imposés comme de remarquables « simulateurs quantiques », capables de reproduire dans des conditions idéales des phénomènes physiques difficiles à isoler dans la nature. Ils sont obtenus en refroidissant des atomes à l'aide de lasers qui les ralentissent par pression de radiation. En utilisant de tels faisceaux combinés à un champ magnétique (figure ci-contre), on parvient à piéger les atomes dans une petite région à des températures de quelques dizaines de microkelvins. Un refroidissement évaporatif supplémentaire, consistant à expulser les atomes les plus chauds du nuage, permet ensuite d'atteindre la limite de dégénérescence quantique. Dans ce régime, la longueur d'onde de de Broglie des atomes devient comparable à la distance interatomique : ils se comportent alors comme des ondes de matière d'une très grande cohérence, capables de produire des interférences. Une fois le gaz refroidi, son évolution peut être étudiée dans divers potentiels également façonnés par des lasers, de forme spatiale adaptée à la physique que l'on souhaite explorer. En modulant aléatoirement les faisceaux dans l'espace, il est en particulier possible de réaliser des potentiels désordonnés, comme le *speckle* optique illustré sur la figure 3a, afin d'étudier de façon très contrôlée la physique de la localisation d'Anderson.

une réalisation et une caractérisation précises dans un système chaotique d'atomes froids reproduisant la physique du désordre. Quelques années plus tard, en 2012 et 2015, des expériences réalisées au LCFIO à Palaiseau et au LENS à Florence ont mis en évidence cette transition dans un désordre spatial optique, sans toutefois parvenir à caractériser précisément le point critique. Aujourd'hui encore, l'étude expérimentale détaillée des propriétés critiques de cette transition à l'aide d'atomes évoluant dans des potentiels lumineux désordonnés demeure un défi passionnant. Au-delà du problème d'Anderson, enfin, les gaz quantiques d'atomes froids constituent également une plateforme privilégiée pour étudier le rôle du désordre dans des régimes où les interactions entre atomes deviennent significatives. À très basse température, ces interactions favorisent la superfluidité, un état de la matière où le transport s'effectue sans friction — à première vue, l'exact opposé de la localisation. La frontière entre superfluidité et isolant d'Anderson reste encore

peu explorée sur le plan expérimental. Les prochaines années devraient apporter de nouvelles avancées dans ce domaine, afin

de mieux comprendre comment désordre et interactions façonnent la dynamique du monde quantique. ■



- 1• R. Kaiser, M. Leduc et H. Perrin, *Atomes, ions, molécules ultrafroids. Applications aux technologies quantiques*, EDP Sciences (2020).
- 2• P.W. Anderson, "Absence of diffusion in certain random lattices", *Phys. Rev.* **109** (1958) 1492.
- 3• D. Delande *et al.*, « La localisation forte d'Anderson », *Images de la physique* (2009) 70-74.
- 4• A. Aspect et M. Inguscio, "Anderson localization of ultracold atoms", *Physics Today* **62** (2009) 30.
- 5• J. Billy *et al.*, "Direct observation of Anderson localization of matter waves in a controlled disorder", *Nature* **453** (2008) 891.
- 6• T. Prat, D. Delande et N. Cherroret, "Quantum boomerang-like effect of wave packets in random media", *Phys. Rev. A.* **99** (2019) 023629.
- 7• R. Sajjad *et al.*, "Observation of the quantum boomerang effect", *Phys. Rev. X* **12** (2022) 011035.
- 8• T. Karpiuk *et al.*, "Coherent forward scattering peak induced by Anderson localization", *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 190601.
- 9• F. Arrouas *et al.*, "The Coherent Forward Scattering peak: a probe of non-ergodicity and symmetries in a quantum chaotic system", *preprint arXiv:2503.01777* (2025).

Invariance du temps de parcours des ondes dans les systèmes complexes

Sylvain Gigan⁽¹⁾ (sylvain.gigan@lkb.ens.fr) et Matthieu Davy⁽²⁾ (matthieu.davy@univ-rennes1.fr)

(1) Laboratoire Kastler Brossel, ENS-Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Collège de France, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

(2) Institut d'électronique et des technologies du numérique, Université de Rennes - CNRS, Campus de Baulieu, 35700 Rennes

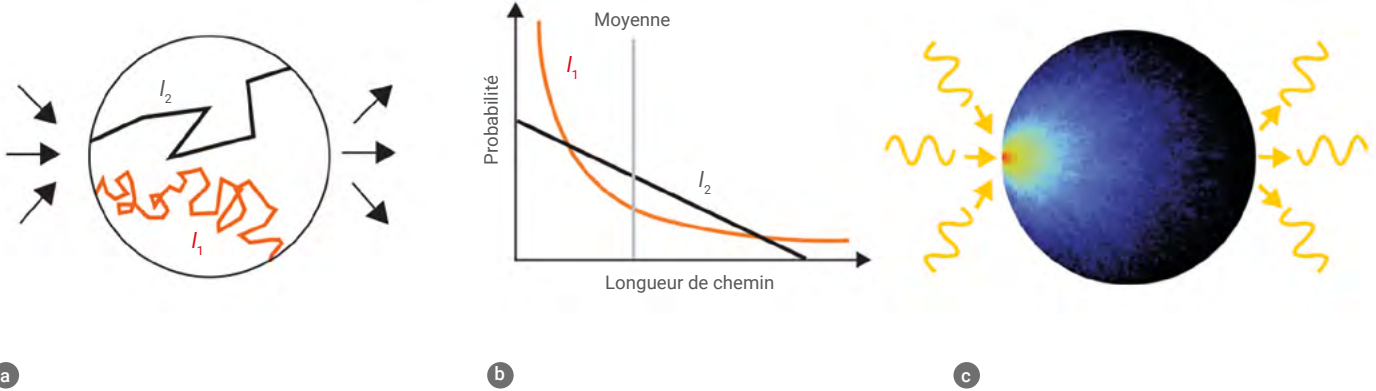
Considérons un marcheur suivant des trajectoires aléatoires et isotropes. Le libre parcours moyen l définit la distance statistique à partir de laquelle sa direction a perdu toute mémoire de sa direction initiale. Comme illustré sur la figure 1a, le marcheur suit des trajectoires tortueuses au sein du milieu dont la longueur totale dépend de ce libre parcours moyen. Un résultat classique de la théorie de la diffusion est que la longueur curviligne moyenne de parcours L entre deux points A et B est proportionnelle au carré de la distance d entre ces deux points, et inversement proportionnelle au libre parcours moyen l : $L \sim d^2/l$. Ainsi, plus le pas moyen est petit, plus la longueur parcourue pour rejoindre un point à une distance donnée sera importante. La diffusion est en effet un phénomène lent et tortueux comparativement à un trajet direct entre deux points, qui dépend linéairement de la distance. Ce résultat s'applique non seulement aux marcheurs aléatoires, mais à un grand nombre de processus diffusifs : chaleur, lumière en milieux désordonnés, etc. Plus généralement, le libre parcours moyen l est la quantité cruciale qui pilote l'ensemble des phénomènes de transport, depuis la transmission ou réflexion à travers un milieu, le temps moyen de résidence, etc...

En contradiction avec ces notions de bases des marches aléatoires, une propriété très surprenante a été mise en évidence dans une étude théorique de Blanco et Fournier (Université Paul Sabatier) en 2003 [1] lorsqu'on considère l'ensemble des trajectoires de marcheurs aléatoires injectés à travers une surface S délimitant un volume V . Bien que la distribution des trajectoires internes varie fortement avec le libre parcours moyen, leur longueur **moyenne** à l'intérieur du milieu (en considérant l'ensemble des modes d'entrée et de sortie possibles) ne dépend plus du pas moyen de la marche aléatoire mais uniquement du rapport V/S entre le volume et la surface explorés en 3 dimensions, et du rapport aire sur périmètre en 2D (voir figure 1). Ce résultat est valable sous des conditions d'isotropie de la direction d'entrée (c'est-à-dire que les marcheurs sont injectés avec une orientation quelconque, statistiquement uniforme). Pour retrouver cette

propriété contre-intuitive d'invariance en fonction de l , il est nécessaire de considérer tant les chemins courts que longs. Comme cela est illustré sur la figure 1b, pour un libre parcours moyen petit devant les dimensions du milieu, la probabilité de rencontrer des trajectoires longues se réduit. Le marcheur aléatoire tend préférentiellement à pénétrer à une faible profondeur, explorer un petit volume, et ressortir du milieu par un point proche de son point d'entrée. Ces chemins courts sont contrebalancés par des chemins plus rares mais ayant des trajectoires beaucoup plus longues afin de ressortir loin du point d'entrée (par exemple de l'autre côté du milieu). Blanco et Fournier ont montré que, sous la condition d'isotropie, les probabilités de distribution de ces trajectoires courtes et longues se compensent parfaitement. En d'autres termes, bien que la distribution de longueur de trajectoire dépende fortement de l , la longueur moyenne de chemin devient elle

indépendante de l (fig. 1b). Pour un disque de rayon R , on peut ainsi montrer que la longueur moyenne de chemin est $2R$, que les trajectoires soient balistiques (en ligne droite, correspondant à un l très grand devant la taille du système), faiblement ou fortement diffusives.

Ce résultat vient de fait généraliser des résultats plus anciens (propriétés de *mean-chord length*) utilisés par exemple en physique nucléaire. Il est aussi connecté à des résultats très généraux en physique des marcheurs aléatoires autour des statistiques de temps de premier passage [6]. La propriété d'invariance est également valable au-delà du simple mouvement brownien, par exemple pour des particules actives, comme cela a été montré expérimentalement en étudiant les trajectoires des bactéries au sein d'environnements complexes microstructurés [5]. Néanmoins, le lien avec la physique des ondes restait jusqu'à très récemment inexploré.



1. Principe de l'invariance de la longueur de chemin.

(a) Principe pour une géométrie circulaire, sous une illumination et détection isotrope (lambertienne). Pour un libre parcours moyen faible (l_1), les changements de direction rapides nécessitent une longue distance pour traverser le milieu. Inversement des trajectoires quasi balistiques sont observées lorsque l est grand ($l = l_2$).

(b) Ces deux cas mènent à des distributions des longueurs de chemins très différentes. Pour $l = l_1$, la probabilité d'une sortie du milieu proche du point d'entrée (trajectoire courte) est notamment forte. Malgré tout, la valeur moyenne de ces deux distributions reste inchangée.

(c) Simulations en Monte-Carlo de trajectoires de diffusion de la lumière dans la même géométrie. La propagation de la lumière est régie par l'équation de diffusion, validant les hypothèses de Blanco et Fournier pour la propriété d'invariance. L'intensité est forte près du point d'injection des ondes (couleur rouge) puis s'étend dans le milieu avec une distribution moyenne suivant l'équation de diffusion. (crédit : réf. [3])

“

Outre son intérêt fondamental, l'invariance de la longueur de parcours des ondes, revêt, de par son caractère très général, une importance majeure dans de nombreuses applications pratiques liées aux interactions lumière-matière.

”

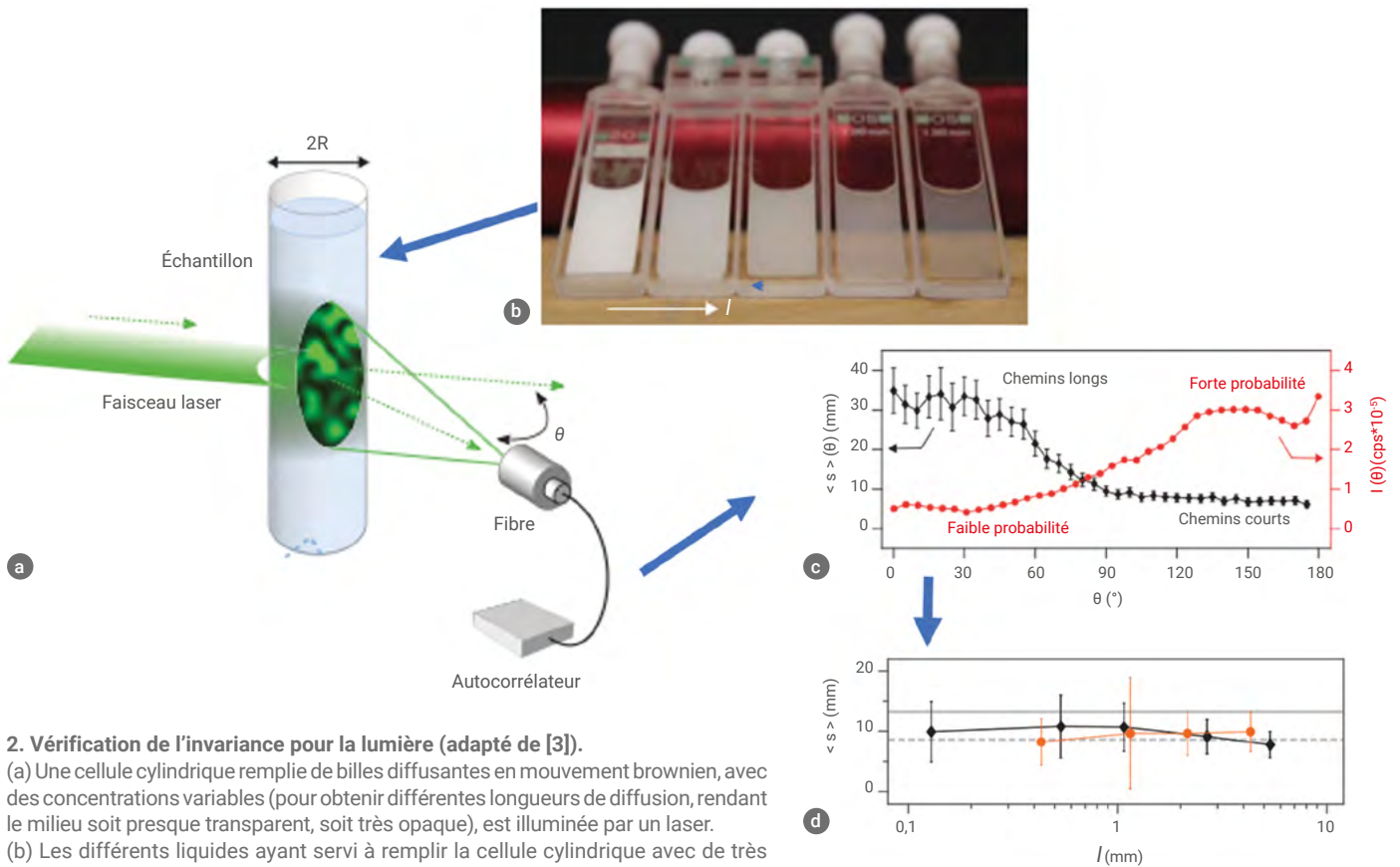
Intuitivement, la propriété d'invariance étant valable pour des marches aléatoires, elle devrait pouvoir être généralisée à la diffusion des ondes en milieux désordonnés, puisque cette dernière peut également être modélisée par des processus stochastiques. Cette intuition est confirmée par le lien entre le temps de parcours (lié à la longueur de chemin) et la densité d'états d'un système (nombre de modes électromagnétiques dans un intervalle de fréquence donné). Dans les milieux désordonnés, cette densité d'états est une quantité statistique dont la densité moyenne ne dépend que du volume, résultat appelé loi de Weyl. Si ce lien était déjà connu, la connexion avec le désordre restait inexploree. La densité d'état moyenne étant indépendante de la structure du milieu, le temps de parcours moyen ne devrait pas dépendre du désordre, donc du libre parcours moyen pour une onde s'y propageant. Ce lien avec l'invariance de la longueur moyenne des marches aléatoires a été démontré en 2014 par Pierrat *et al.* [2], établissant numériquement cette propriété d'invariance pour les ondes en régime diffusif. L'invariance a ainsi été vérifiée à partir de simulations Monte-Carlo de la propagation de la lumière dans des échantillons désordonnés (fig. 1c).

Ce résultat a été confirmé expérimentalement 3 ans plus tard en 2017 par Savo *et al.* [3] par une expérience d'optique résumée sur la figure 2 (voir page 32). Un tube cylindrique de rayon R rempli d'un liquide avec des concentrations variables de particules diffusantes est éclairé avec un laser. Un détecteur, placé sur un bras rotatif pouvant tourner autour du cylindre, tel un goniomètre, permet de mesurer l'intensité diffusée en fonction de l'angle ; le temps de parcours dans une direction donnée est déduit des fluctuations temporelles d'intensité. Le résultat classique de diffusion a été observé : en augmentant la concentration de particules diffusantes, on passe d'une diffusion essentiellement vers l'avant avec des chemins quasi balistiques lorsque le libre parcours moyen est grand devant la taille du tube, à une rétrodiffusion forte avec

des chemins courts, lorsque la diffusion est forte et le milieu très opaque. Cependant, en évaluant la longueur moyenne de chemin sur l'ensemble des directions de sortie (déduite grâce aux fluctuations temporelles de l'intensité diffusée), on retrouve le résultat prédit par Blanco et Fournier : la longueur moyenne de chemin pour la lumière est toujours de $\sim 2R$, même en faisant varier de deux ordres de grandeur la concentration de particules et donc le libre parcours moyen (fig. 2d).

Dans les milieux diffusifs, l'intensité transmise et le temps de propagation des ondes peuvent être modélisés à partir de l'équation de diffusion qui néglige les effets d'interférence propres aux ondes. Ces milieux relèvent donc directement des résultats théoriques de l'étude de Blanco et Fournier. Néanmoins, des phénomènes fascinants

>>>



2. Vérification de l'invariance pour la lumière (adapté de [3]).

(a) Une cellule cylindrique remplie de billes diffusantes en mouvement brownien, avec des concentrations variables (pour obtenir différentes longueurs de diffusion, rendant le milieu soit presque transparent, soit très opaque), est illuminée par un laser.

(b) Les différents liquides ayant servi à remplir la cellule cylindrique avec de très grandes variations d'opacité et donc de libre parcours moyen.

(c) En faisant tourner un détecteur autour de la cellule, on mesure la corrélation temporelle avec un autocorrélateur. Elle est reliée au nombre moyen d'événements de diffusion et on en déduit la longueur moyenne du chemin $\langle s \rangle(\theta)$ en fonction de l'angle θ .

(d) En moyennant sur les directions de sortie θ , on vérifie l'invariance de la longueur de chemin $\langle s \rangle$ (points rouges et noirs pour deux diamètres de billes) et on montre qu'elle est indépendante du libre parcours moyen l et cohérente avec la valeur théorique de $2R$ (ligne horizontale).

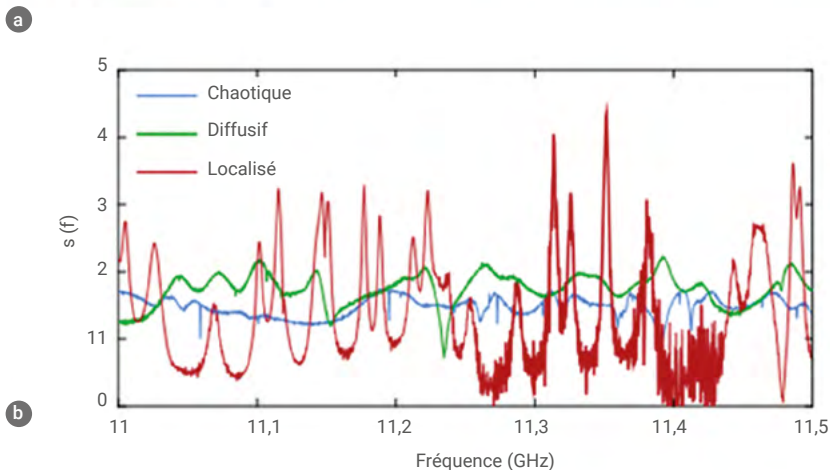
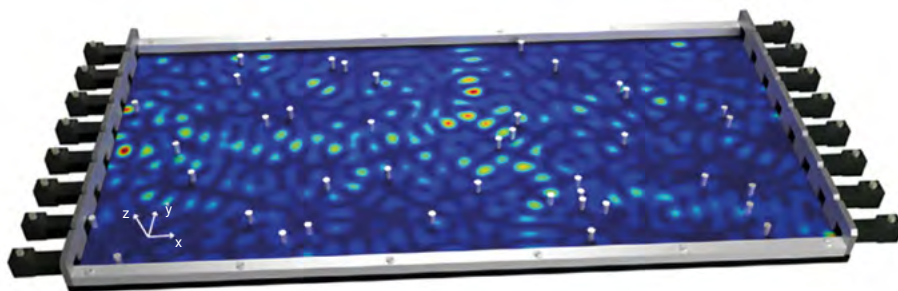
>>>

et purement ondulatoires sont fondés sur les interférences entre chemins de propagation et la question de l'extension de la propriété d'invariance à ces milieux se posait. En particulier, la localisation d'Anderson (dite localisation forte) est un phénomène tout à fait fondamental et purement ondulatoire correspondant à une disparition de la diffusion au sein de milieux aléatoires fortement diffusant [7] : lorsque le désordre est fort, les interférences constructives entre chemins de propagation tendent à piéger exponentiellement les ondes au sein du milieu, supprimant ainsi leur transmission. Cependant, la loi de Weyl est suffisamment générale pour y rester valable, ainsi l'invariance devrait y être également respectée. Dans la référence [2], il a été montré théoriquement que l'invariance est robuste et reste vérifiée en régime de localisation forte.

Pourtant, la vérification expérimentale de ce régime de transport est particulièrement difficile en optique, où ce régime reste encore difficilement accessible, et n'a donc pas été atteint dans l'expérience d'optique de 2017 [3].

En 2021, en passant dans le domaine des micro-ondes, à des fréquences de plusieurs GHz, nous avons vérifié expérimentalement la robustesse de la propriété d'invariance en présence de localisation d'Anderson. Dans le domaine des micro-ondes, les longueurs d'onde centimétriques permettent en effet de créer des dispositifs expérimentaux dont la structure est aisément usinable et contrôlable. Le désordre est créé en plaçant verticalement des cylindres métalliques dans une cavité micro-onde se comportant comme un milieu à deux dimensions (voir figure 3a). Le positionnement des cylindres

est aléatoire et en variant leur nombre, on peut modifier les caractéristiques de propagation depuis le régime balistique au régime localisé en passant par le régime diffusif. Le régime localisé est atteint lorsque des centaines de diffuseurs créent un désordre suffisamment fort. Les ondes sont injectées par un premier réseau d'antennes émettrices (des guides d'onde monomode) placées d'un côté et la transmission à travers la cavité désordonnée est mesurée grâce à un second réseau d'antennes réceptrices. Le temps de parcours moyenné sur l'ensemble des canaux est reconstruit à chaque fréquence à partir de la mesure de cette matrice en transmission entre les deux réseaux d'antennes. Le temps de parcours dépend en effet directement de la dérivée de la phase du signal en fonction de la fréquence, grâce à l'opérateur de Wigner-Smith. Cet opérateur, introduit dans les années 1950 par Eugène Wigner pour des géométries à une dimension, puis généralisé à des géométries multicanaux par Félix Smith, caractérise le temps de



3. Vérification de l'invariance en micro-ondes dans le régime localisé (adaptée de [4]).

(a) Cavité micro-ondes rendue désordonnée par la présence de cylindres métalliques positionnés aléatoirement. La matrice en transmission est mesurée entre deux réseaux de 8 antennes positionnés à chaque interface. Le champ déterminé en simulations dans la cavité est superposé au schéma.

(b) En faisant varier le nombre de cylindres entre 0 et 280, la longueur moyenne du chemin est estimée en fonction de la fréquence pour trois régimes de propagation : les régimes chaotique, diffusif et localisé. Le changement de régime induit une augmentation des fluctuations, notamment dans le régime localisé, mais la valeur moyenne de la longueur des chemins est conservée.

parcours d'un champ au sein d'un milieu. Les variations du temps de parcours avec la fréquence sont illustrées sur la figure 3b. Bien que les fluctuations de ce temps augmentent avec le désordre, avec notamment des pics de grande amplitude en régime localisé, sa valeur moyenne reste constante, confirmant de nouveau la loi d'invariance sur l'ensemble des régimes de propagation dans les milieux désordonnés, depuis la propagation balistique en l'absence de désordre à la localisation d'Anderson.

Enfin, nous avons pu vérifier l'invariance pour un second phénomène iconique lié aux interférences des ondes : les bandes interdites dans les cristaux photoniques. Ces cristaux sont des structures régulières dont les diffuseurs sont ordonnés à l'échelle de la longueur d'onde. Les interférences de Bragg entre chemin de diffusion suppriment la transmission des ondes à travers le cristal uniquement dans certaines bandes spectrales – les bandes interdites. Conjointement, cette absence de transmission

mène à une diminution drastique du temps de parcours moyen car les ondes pénètrent peu au sein du cristal. Il pourrait alors être tentant de conclure que la propriété d'inva-

riance n'est plus respectée. Néanmoins, nous avons pu montrer que cette diminution est contrebalancée par une accumulation des états, et donc une augmentation du temps de parcours, sur les bords de la bande interdite. Une moyenne sur une bande de fréquences suffisamment large permet donc de restaurer la propriété d'invariance.

Outre son intérêt fondamental, l'invariance de la longueur de parcours des ondes, revêt, de par son caractère très général, une importance majeure dans de nombreuses applications pratiques liées aux interactions lumière-matière. Elle intervient notamment dans la conception de structures ultrasensibles ou dédiées à la récupération d'énergie. Ce résultat d'invariance vient par exemple généraliser une propriété bien connue pour les cellules photovoltaïques, qui est qu'on ne peut pas augmenter l'absorption d'une cellule au-delà d'une certaine valeur en structurant sa surface [8]. Cette propriété universelle, si elle ne donne pas directement de recette pour améliorer ces dispositifs, montre qu'il existe des limites sur les performances de ces systèmes. Elle donne aussi des pistes d'amélioration : en contournant certaines hypothèses sous-jacentes à sa validité, on peut ainsi espérer optimiser les performances. Cela peut inclure le contrôle des fronts d'onde, l'optimisation de la structure pour une gamme spécifique de fréquences ou d'incidences, ou encore l'ajustement de l'absorption. ■



- 1• S. Blanco et R. Fournier, "An invariance property of diffusive random walks", *Europhysics Letters* **61**(2) (2003) 168.
- 2• R. Pierrat *et al.*, "Invariance property of wave scattering through disordered media", *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**(50) (2014) 17765-17770.
- 3• R. Savo *et al.*, "Observation of mean path length invariance in light-scattering media", *Science*, **358**(6364) (2017) 765-768.
- 4• M. Davy *et al.*, "Mean path length invariance in wave-scattering beyond the diffusive regime", *Communications Physics* **4**(1) (2021) 85.
- 5• G. Frangipane *et al.*, "Invariance properties of bacterial random walks in complex structures", *Nature communications* **10**(1) (2019) 2442.
- 6• O. Bénichou *et al.*, "Intermittent search strategies", *Reviews of Modern Physics* **83**(1) (2011) 81-129.
- 7• A. Lagendijk *et al.*, "Fifty years of Anderson localization", *Physics Today* **62**(8) (2009) 24-29.
- 8• E. Yablonovitch, "Statistical ray optics", *Journal of the Optical Society of America* **72**(7) (1982) 899-907.

Contrôle des propriétés optiques de feuillets atomiques

Xavier Marie (marie@insa-toulouse.fr), Cédric Robert et Thierry Amand

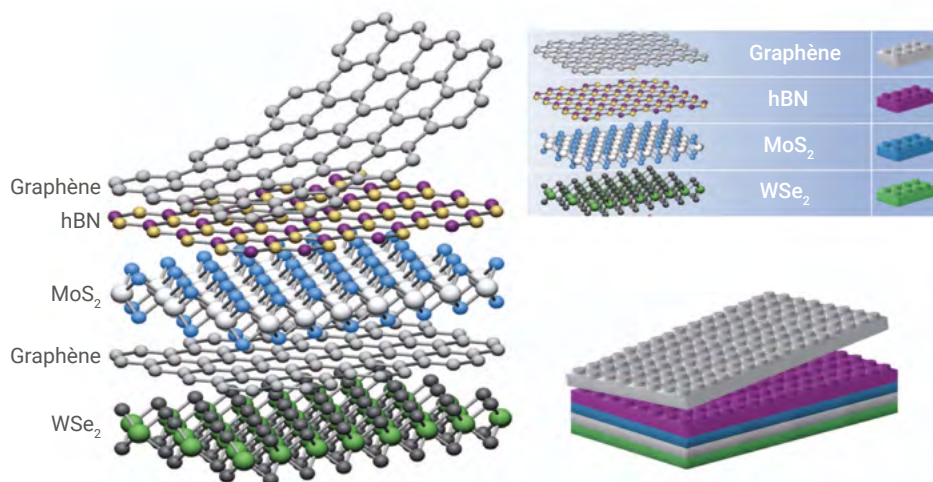
Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets, INSA Toulouse & CNRS, 135 avenue de Ranguueil, 31077 Toulouse

Inspirées par le succès du graphène, les recherches sur les cristaux atomiques bidimensionnels (2D) se sont développées extrêmement rapidement au cours de la dernière décennie. La famille des matériaux 2D présente une variété exceptionnelle de propriétés électroniques liées à leur faible dimensionnalité, des isolants aux métaux, semi-métaux, isolants topologiques, semi-conducteurs et supraconducteurs. Des couches atomiquement minces avec des propriétés différentes peuvent être assemblées en empilements verticaux communément appelés hétérostructures de van der Waals, permettant la conception de matériaux artificiels avec des propriétés physiques originales. Nous montrons dans cet article que de telles hétérostructures permettent de contrôler les propriétés optiques d'une monocouche atomique d'un semi-conducteur de manière spectaculaire.

Les matériaux bidimensionnels suscitent un intérêt croissant en physique de la matière condensée. Parmi ces matériaux, les dichalcogénures de métaux de transition (TMD), tels que le diséléniure de molybdène (MoSe_2) ou de tungstène (WSe_2), sont des semi-conducteurs qui se démarquent par leurs propriétés excitoniques exceptionnelles [1]. L'excitation lumineuse de ces monocouches engendre des paires électron-trou fortement liées – les excitons – qui dominent la réponse optique, même à température ambiante (voir *Reflets de la Physique* 50 (2016) 21). Leur comportement, dicté par des interactions lumière-matière d'une intensité remarquable, est au cœur de nombreuses recherches fondamentales et d'applications potentielles.

Hétérostructures de van der Waals : des assemblages de feuillets atomiques comme des empilements Lego®

Après de nombreuses études sur les propriétés électroniques ou optiques remarquables de monocouches atomiques de matériaux lamellaires (graphène, TMD, etc.), une autre voie fascinante s'est ouverte



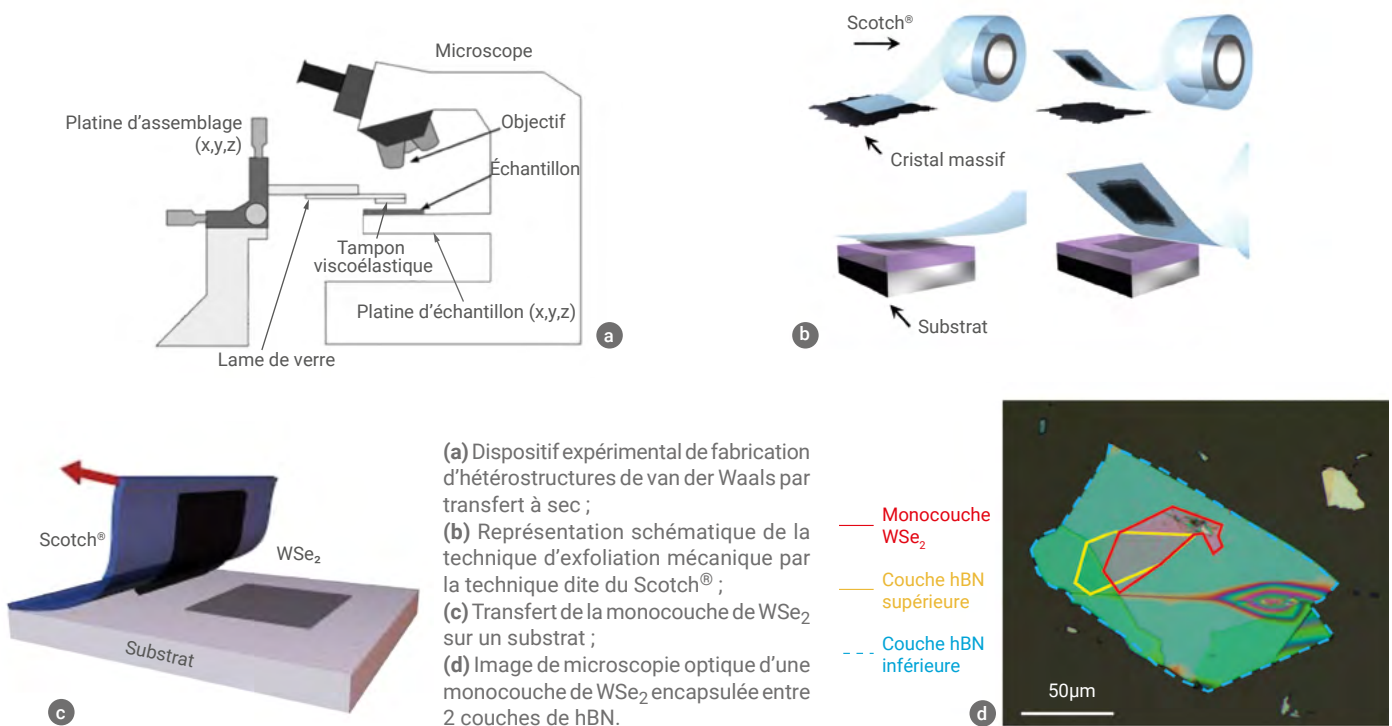
1. Hétérostructure de van der Waals : empilement de feuillets atomiques comme des Lego® [2].

récemment : l'empilement contrôlé de ces feuillets pour former ce que l'on appelle des *hétérostructures de van der Waals* [2]. À l'image de briques de Lego®, ces couches peuvent être assemblées, feuillelet par feuillelet, simplement par l'interaction van der Waals (voir figure 1 et encadré).

Chaque feuillelet – graphène, disulfure de molybdène, nitrure de bore, etc. – conserve ses propriétés intrinsèques. Mais leur empilement donne naissance à un système global doté de comportements électroniques, optiques et mécaniques très particuliers résultant des propriétés de chaque

>>>

FABRICATION D'HÉTÉROSTRUCTURES DE VAN DER WAALS



Les matériaux bidimensionnels, tels que le graphène, les dichalcogénures de métaux de transition (TMD) ou le nitrure de bore hexagonal (hBN) sont des matériaux lamellaires constitués d'un empilement de monocouches liées entre elles par des liaisons faibles de van der Waals. On peut aisément détacher une monocouche d'un de ces matériaux par exfoliation mécanique et l'empiler sur une autre monocouche d'un autre matériau pour former des hétérostructures dites de van der Waals. Une des techniques de référence pour leur fabrication repose sur le transfert à sec, ou *dry stamping*. L'approche illustrée ici repose sur l'utilisation d'un tampon viscoélastique, une méthode entièrement sèche évitant toute contamination par des solvants chimiques. Le dispositif expérimental se compose d'un microscope optique couplé à des systèmes de positionnement micrométrique à trois axes (figure a). Le tampon est constitué d'un film mince de polymère viscoélastique transparent appelé PDMS (polydiméthylsiloxane) ; il est fixé sur une lame de verre pour en faciliter la manipulation. Le matériau lamellaire est d'abord exfolié mécaniquement à l'aide d'un ruban adhésif (méthode dite du « Scotch® », figure b). Les feuillets obtenus, de différentes épaisseurs et tailles, sont ensuite transférés sur ce tampon transparent qui est ensuite fixé sur un bras motorisé avec un déplacement micromécanique dans les 3 directions de l'espace. Le microscope optique permet d'identifier la taille des feuillets. Le contraste optique permet également une première détermination de l'épaisseur qui peut ensuite être confirmée par des mesures de microscopie à forces atomiques ou de spectroscopie Raman. On peut, avec de l'expérience, sélectionner des monocouches du matériau lamellaire.

Le substrat cible (souvent du silicium recouvert d'une couche d'oxyde de silicium SiO₂ d'épaisseur contrôlée) est placé sur une platine micrométrique x-y-z, permettant un transfert contrôlé avec une précision de l'ordre du micron. Grâce à la transparence du tampon, l'alignement précis du feuillet cible sur le substrat récepteur est possible par observation en transmission. Une fois aligné, le tampon est délicatement mis en contact avec le substrat, puis lentement décollé (figure c). La différence d'adhérence entre le tampon et le substrat permet au feuillet de rester fixé sur ce dernier. On peut répéter le processus avec un autre tampon sur lequel des feuillets d'un autre matériau ont été exfoliés. On obtient ainsi une nanostructure artificielle dans laquelle l'épaisseur de chaque couche peut être contrôlée à l'échelle atomique. Dans le cas de matériaux très réactifs à l'air (comme de nombreux matériaux 2D magnétiques), l'ensemble du dispositif peut être placé dans une boîte à gants avec un environnement inerte (azote ou argon). En outre des recuits thermiques permettent d'éliminer ou de réduire les bulles éventuellement piégées aux interfaces. La figure d montre par exemple une image de microscopie optique d'une monocouche de WSe₂ encapsulée entre 2 couches de hBN. Ce procédé permet des transferts rapides, reproductibles et adaptés à divers matériaux lamellaires. Il constitue un outil précieux pour l'assemblage de dispositifs et d'hétérostructures de van der Waals complexes.

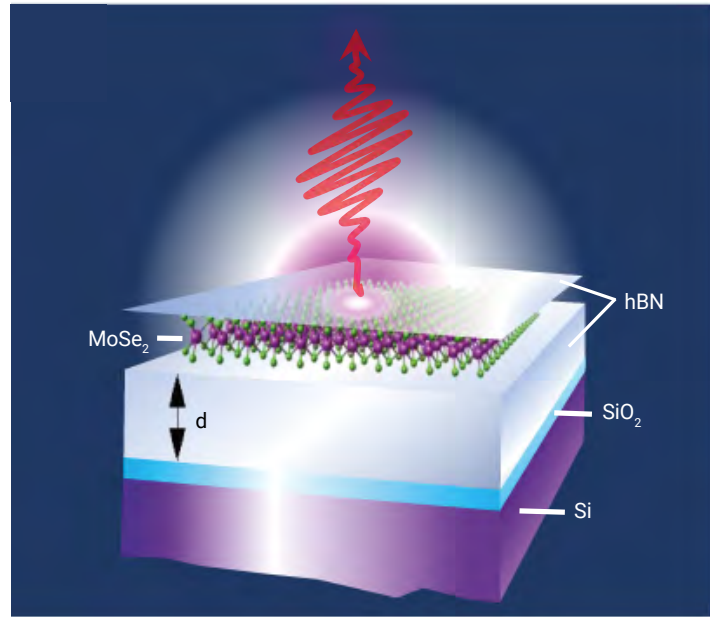
Un avantage par rapport à l'épitaxie réside dans la possibilité d'assembler des couches de matériaux de nature très différente sans problèmes d'adaptation de maille cristalline. Par conséquent, il est possible grâce aux interactions de van der Waals d'empiler une grande variété de matériaux : isolants, métaux, semi-conducteurs, etc. et de fabriquer des hétérostructures de très haute qualité, favorables à l'étude de la physique quantique bidimensionnelle.

>>>

feuille et de leurs interactions. L'angle d'empilement, appelé *twist*, peut également devenir un nouveau degré de liberté. Il suffit parfois d'un petit décalage angulaire pour faire émerger des états quantiques exotiques, comme la supraconductivité dans des bi-couches de graphène.

Ces structures offrent une modularité inédite : elles peuvent être conçues « à la carte » et assemblées manuellement couche par couche. Elles permettent d'explorer des phénomènes électroniques, optiques ou topologiques originaux, que l'on ne rencontre pas dans les matériaux massifs.

Dans cet article, nous présentons des résultats sur le contrôle de l'interaction lumière-matière dans des hétérostructures de van der Waals très simples, constituées principalement d'une monocouche de semiconducteur TMD (MoSe_2 ou WSe_2) prise en sandwich entre deux couches de nitrure de bore hexagonal (hBN), le tout déposé sur un substrat de silicium recouvert d'une fine couche d'oxyde de silicium (SiO_2) : voir figure 2. Les monocouches de MoSe_2 ou WSe_2 sont des semi-conducteurs à énergie de bande interdite directe, comme l'arséniure de gallium (GaAs) bien connu pour ses applications optoélectroniques (lasers, photodétecteurs, etc). Mais contrairement à GaAs, les propriétés optiques – même à température ambiante – sont totalement gouvernées par des excitons (paires électron-trou liées par interaction coulombienne) ayant une énergie de liaison géante de plusieurs centaines de meV. Ces excitons forment un système hydrogénoïde confiné dans une simple monocouche et, de ce fait, ils sont très sensibles à leur environnement : défauts ou charges fluctuantes dans le substrat, rugosité du substrat entraînant des contraintes locales ou encore molécules adsorbées en surface. Ce désordre diélectrique peut être contrôlé et très fortement réduit en encapsulant la monocouche semi-conductrice entre deux couches de quelques dizaines de nanomètres de hBN, un matériau transparent, isolant monocristallin de très haute qualité. Ceci conduit à des spectres optiques à basse température (luminescence, absorption, réflectivité) présentant des raies de largeur très fine, qui sont essentiellement contrôlées par la recombinaison radiative [3]. Cette situation est très rare, voire unique, dans les structures semi-conductrices dans lesquelles les



2. Monocouche de diséléniure de molybdène (MoSe_2) encapsulée entre deux couches de nitrure de bore hexagonal, déposée sur un substrat SiO_2/Si .

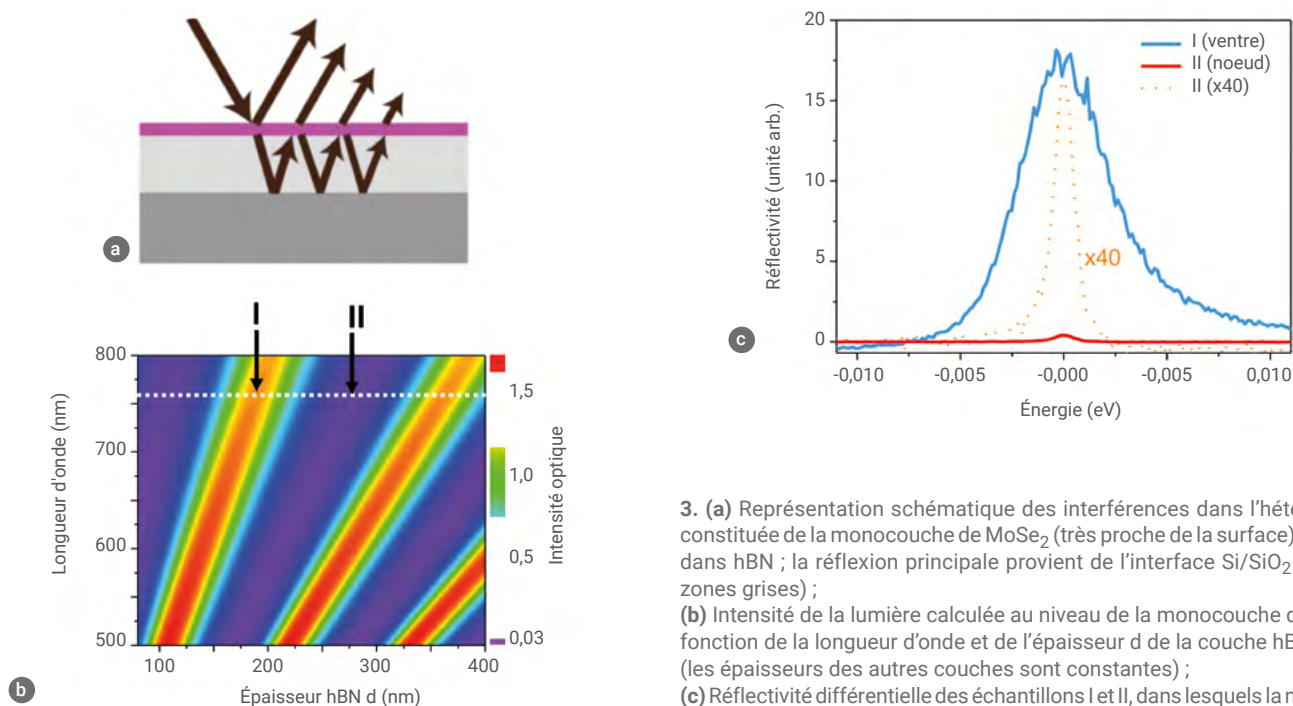
largeurs spectrales sont en général dominées par des élargissements inhomogènes liés au désordre et des élargissements non-radiatifs provenant par exemple de la capture des électrons par des défauts.

MoSe₂ : un miroir optique d'épaisseur atomique

L'optique contemporaine, en quête constante de miniaturisation, explore les frontières ultimes de la manipulation de la lumière. Dans les architectures photoniques classiques, les miroirs sont réalisés à partir de structures diélectriques à multicouches ou de surfaces métalliques. Toutefois, leur miniaturisation est contrainte soit par la longueur d'onde (pour les miroirs diélectriques), soit par la profondeur de peau (pour les miroirs métalliques). Dans ce contexte, les matériaux bidimensionnels ouvrent des perspectives radicalement nouvelles. Ainsi, la monocouche de MoSe_2 encapsulée dans du nitrure de bore hexagonal décrite précédemment peut se comporter comme un miroir extrêmement efficace, tout en étant commutable électriquement. Ceci est possible grâce aux propriétés excitoniques exceptionnelles de ce semi-conducteur atomiquement mince, qui permettent

d'utiliser la résonance excitonique dans la monocouche semi-conductrice pour réfléchir efficacement la lumière incidente. Le comportement miroir du MoSe_2 repose sur un effet d'interférence entre le champ incident et le champ réémis par les excitons, qui a pour conséquence la suppression de la transmission et l'exaltation de la réflexion [4]. Cette situation est analogue à celle d'un dipôle oscillant, qui peut annuler le champ transmis lorsqu'il est excité à la résonance. On peut montrer que la réflectivité maximale de ce miroir atomique est simplement déterminée par le rapport du taux de recombinaison radiatif des excitons γ_r et du taux de recombinaison total γ_t qui est la somme des taux radiatifs et nonradiatifs (γ_{nr}) : $\gamma_t = \gamma_r + \gamma_{nr}$. Dans les semi-conducteurs, ce dernier est en général lié à la capture des électrons sur des défauts. Ainsi, dans le régime idéal sans perte non radiative ($\gamma_{nr} \approx 0$), la monocouche semi-conductrice peut agir comme un miroir parfait.

En intégrant la monocouche dans une cavité optique passive formée par le substrat de Si/SiO_2 et les couches de hBN (figure 3a), on peut contrôler davantage le signal réfléchi. La densité de modes optiques au niveau de la monocouche semi-conductrice peut être simplement



3. (a) Représentation schématique des interférences dans l'hétérostructure constituée de la monocouche de MoSe₂ (très proche de la surface) encapsulée dans hBN ; la réflexion principale provient de l'interface Si/SiO₂ (entre les 2 zones grises) ; (b) Intensité de la lumière calculée au niveau de la monocouche de MoSe₂ en fonction de la longueur d'onde et de l'épaisseur d de la couche hBN inférieure (les épaisseurs des autres couches sont constantes) ; (c) Réflectivité différentielle des échantillons I et II, dans lesquels la monocouche est située respectivement au ventre ou au nœud du champ électrique ($T=4$ K).

modifiée en changeant l'épaisseur d de la couche de hBN sous MoSe₂, les épaisseurs des autres couches restant inchangées. La figure 3b présente la carte d'intensité lumineuse calculée à l'emplacement de la monocouche en fonction de la longueur d'onde d'émission et de l'épaisseur d de la couche inférieure de hBN (l'épaisseur de SiO₂ est de 80 nm et la couche hBN supérieure de protection ne fait qu'une dizaine de nm et joue peu ici)^(a).

Les effets d'interférence de type Fabry-Perot et leur dépendance en fonction de d sont clairement visibles sur la figure 3b. On peut fabriquer différentes hétérostructures dans lesquelles l'épaisseur d varie. Avec $d = 180$ nm (échantillon I), la monocouche de MoSe₂ se trouve au ventre du champ électromagnétique pour la longueur d'onde d'émission excitonique (756 nm) alors que pour $d = 273$ nm (échantillon II), elle est au nœud du champ. Ainsi dans l'échantillon I, la réflexion est maximale, environ 40 fois plus élevée que dans l'échantillon II (figure 3c) [5]. Grâce à une calibration basée sur un miroir classique en or, on peut montrer qu'une telle structure peut réfléchir jusqu'à 85% de la lumière incidente, lorsque celle-ci est accordée à la résonance des excitons neutres [6]. Ce niveau de réflectivité est sans

précédent pour un matériau d'une épaisseur inférieure au nanomètre. Il est intéressant de noter que deux ans plus tard une réflectivité optique assez comparable (~60%) a été démontrée en physique des atomes froids avec une monocouche atomique de rubidium [7], preuve que ce principe peut être transposé hors du seul domaine des hétérostructures.

Ces caractéristiques de très forte réflexion de la lumière sont liées aux propriétés uniques des excitons dans les monocouches de dichalcogénure de transition. Les excitons 2D ont une énergie de liaison de plusieurs centaines de meV, ce qui conduit à des taux de recombinaison radiatif très élevés [1] : le temps radiatif τ_r ($\tau_r = 1/\gamma_r$) est ainsi de l'ordre de la picoseconde. Ainsi la condition $\gamma_r \gg \gamma_{nr}$ est réalisée, permettant un coefficient de réflexion proche de 100%. Au contraire, dans les structures semiconductrices bidimensionnelles bien connues que sont les puits quantiques de GaAs, l'augmentation de la largeur des raies dues aux recombinaisons non radiatives et l'élargissement inhomogène induit par le désordre sont généralement beaucoup plus grandes que les largeurs de raie radiatives, ce qui empêche une réflexion efficace.

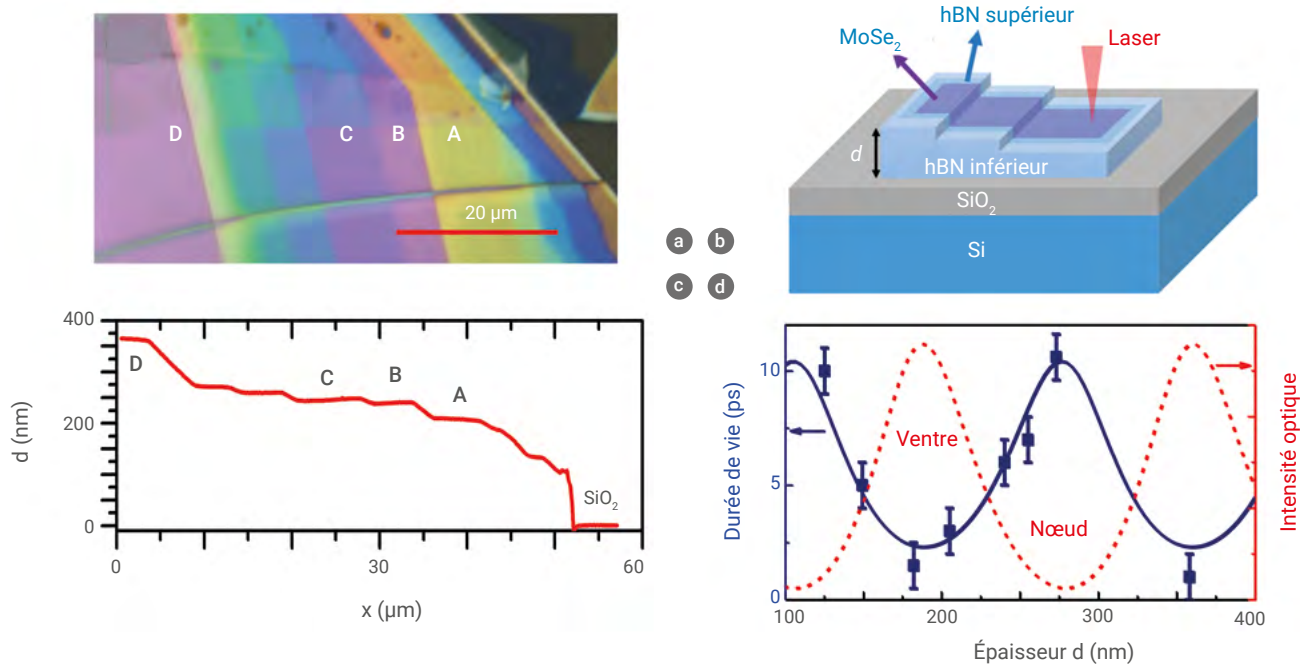
L'autre atout majeur de ce miroir atomique basé sur une monocouche de MoSe₂ réside dans sa commutabilité électrique. L'application d'une tension entre 2 électrodes placées de part et d'autre de la monocouche conduit à un dopage de celle-ci (injection électrique d'électrons ou de trous). La résonance excitonique, et donc la réflectivité peuvent être ainsi modulées électriquement [4]. Cet effet repose sur la conversion des excitons neutres en trions (excitons chargés), dont la résonance est décalée en énergie.

Contrôle du temps de recombinaison radiative des excitons 2D

Les hétérostructures de van der Waals permettent également de pratiquer une ingénierie de l'environnement diélectrique autour d'un semi-conducteur bidimensionnel. On peut ainsi moduler la durée de vie radiative des excitons, par une manipulation fine de la densité d'états optique. Autrement dit, « sculpter les fluctuations du vide » autour d'un exciton pour modifier sa dynamique d'émission lumineuse.

Les expériences sont réalisées à nouveau sur des monocouches de MoSe₂

>>>



4. (a) Image en microscopie optique d'un échantillon schématisé en (b) où la monocouche de MoSe₂ est déposée sur un feuillet hBN présentant différentes terrasses et marches aux épaisseurs d variées. (c) Mesure de l'épaisseur d des différentes terrasses (A, B, C, D) par microscopie à forces atomiques. (d) Effet Purcell : durées de vie des excitons mesurées par photoluminescence résolue en temps pour différentes terrasses ($T = 4$ K). Le trait pointillé correspond à l'intensité optique calculée au niveau de la monocouche et le trait continu au temps de vie radiatif calculé.

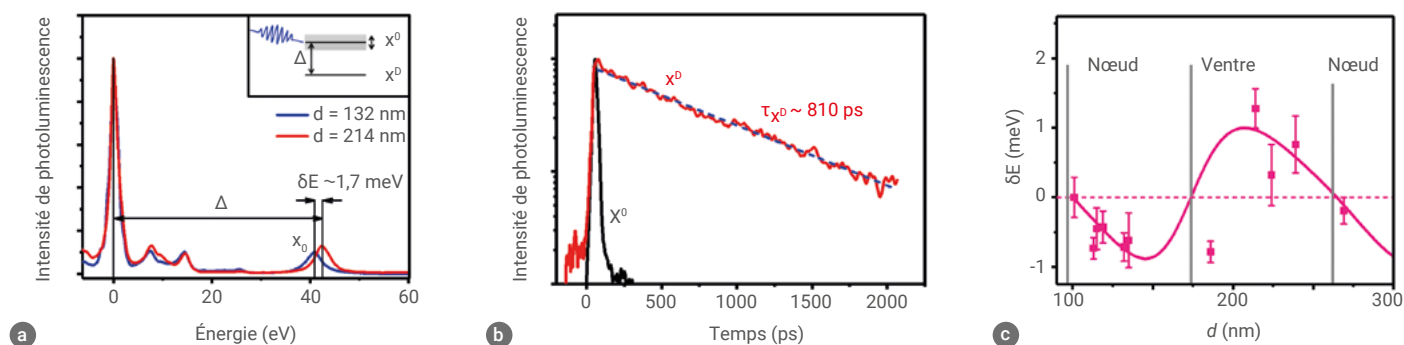
>>>

encapsulées entre des couches de nitrure de bore hexagonal, déposées sur un substrat de SiO₂/Si. Comme nous l'avons vu précédemment, ce sandwich permet de contrôler précisément l'épaisseur des couches de hBN et donc l'environnement électromagnétique immédiat du semi-conducteur. En jouant sur leur épaisseur, on peut modifier la position de la monocouche dans le champ électromagnétique stationnaire formé par les interférences optiques – une situation analogue à celle d'un émetteur placé à un nœud ou à un ventre de champ électrique dans une cavité de Fabry-Perot. De manière concrète, la même monocouche de MoSe₂ est ici déposée sur un feuillet de hBN présentant différentes terrasses et marches aux épaisseurs variées (figure 4b). La figure 4a présente une image au microscope optique d'un tel échantillon éclairé par la lumière blanche d'une lampe halogène. Pour chaque épaisseur de hBN, la couleur observée dans chaque zone de l'échantillon résulte simplement des interférences optiques et concorde parfaitement avec les résultats du calcul basé sur une méthode de matrice de transfert, à partir des épaisseurs de hBN mesurées par microscopie à forces atomiques (figure 4c) et des indices de réfraction bien connus des différentes

couches. Cette configuration conduit à une modulation spectaculaire de la probabilité de recombinaison radiative des excitons, selon l'effet Purcell [8 - 10]. Ce dernier stipule que la durée de vie radiative d'un émetteur peut être allongée ou raccourcie selon la densité locale d'états photoniques. Les mesures de photoluminescence résolue en temps révèlent une variation d'un ordre de grandeur de la durée de vie des excitons selon l'épaisseur de la couche inférieure d'hBN – typiquement de 1 ps lorsqu'elle est au ventre à près de 10 ps lorsqu'elle est au nœud du champ électromagnétique (figure 4d) [5]. Ces valeurs dépassent largement les modulations de temps radiatif typiquement observées avec des émetteurs ponctuels (atomes, molécules, boîtes quantiques...) à proximité d'un miroir, car, dans ce cas, seule une petite fraction des modes optiques est réfléchi par le miroir sur l'émetteur quantique. En revanche, le caractère délocalisé dans le plan des émetteurs excitoniques 2D (émetteurs non ponctuels) a pour conséquence que leur vecteur d'onde dans le plan est conservé lors de la recombinaison radiative : l'émission est caractérisée alors par un front d'onde planaire parallèle au plan du matériau 2D. Ainsi la lumière réfléchi par l'hétérostructure de van der Waals (qui agit comme

un miroir) interfère avec le même mode excitonique d'où un effet Purcell beaucoup plus fort qu'avec des émetteurs ponctuels.

Notons que le contrôle de la durée de vie des excitons 2D par effet Purcell peut s'observer directement dans le domaine spectral. Dans les échantillons où la durée de vie radiative est plus longue (inhibition du couplage radiatif), la largeur de raie mesurée en photoluminescence continue ou en réflectivité différentielle est significativement réduite (courbe en pointillé sur la figure 3c). Cette observation renforce l'idée que la largeur de raie est largement dominée par l'élargissement radiatif, et donc modulable par l'environnement optique. Cependant, la présence de contributions inhomogènes (désordre local, recombinaisons non-radiatives) reste perceptible. Ces résultats montrent que l'environnement électromagnétique d'une monocouche semi-conductrice peut être utilisé comme un levier pour ajuster sa dynamique radiative. À basse température, la recombinaison excitonique est quasi exclusivement contrôlée par le canal radiatif, sensible à l'effet Purcell. En revanche, au-dessus de 80 K, les mécanismes non-radiatifs prennent le relais, réduisant l'efficacité du contrôle par la cavité. Néanmoins, la perspective de coupler ces



5. (a) Spectres de photoluminescence d'une monocouche de WSe₂ encapsulée dans hBN (T = 5 K) montrant la recombinaison des excitons brillants (X⁰) et des excitons sombres (X^D) séparés de l'énergie Δ ; les deux spectres sont mesurés pour deux épaisseurs de la couche hBN inférieure (d = 132 nm et d = 214 nm) et montrent le décalage de Lamb de l'exciton brillant, l'origine des énergies étant prise à la position de l'exciton sombre X^D ; insert : représentation schématique du domaine de variation de l'énergie de l'exciton brillant lorsque l'épaisseur d varie (zone grisée). (b) Temps de vie des excitons brillants et sombres mesurés par photoluminescence résolue en temps. (c) Mesure du décalage de Lamb excitonique en fonction de l'épaisseur de hBN.

monocouches à d'autres structures photoniques (cristaux photoniques, métamatériaux à permittivité nulle, etc.) ouvre un champ d'investigation prometteur pour la nanophotonique et les dispositifs quantiques.

Décalage de Lamb excitonique

Le décalage de Lamb de la fréquence de transition atomique résulte de l'émission et de la réabsorption de photons virtuels par des atomes isolés. Sa découverte a marqué le début du développement de l'électrodynamique quantique et a conduit à la constatation initialement surprenante que « le vide n'est pas vide ». Dans l'atome d'hydrogène, le décalage de Lamb se manifeste par une légère différence d'énergie entre deux niveaux en principe dégénérés, due aux fluctuations quantiques du vide électromagnétique [11]. Le décalage de Lamb dans le domaine optique n'a été rapporté que dans quelques expériences avec des atomes ou des ions froids. Dans les systèmes plus complexes, les forts effets de déphasage et l'inhomogénéité des systèmes ont rendu ces effets extrêmement difficiles à observer expérimentalement. Dans les solides, le décalage de Lamb n'a été observé que dans les noyaux excités par des rayons X ou dans les circuits micro-ondes supraconducteurs. Les monocouches semi-conductrices de TMD sont de très bons candidats pour observer cette renormalisation de l'énergie du fait de la très forte interaction lumière-matière. On peut montrer que le décalage de Lamb est

proportionnel à la force d'oscillateur de la transition : plus le temps de vie radiatif est court, plus la variation d'énergie est importante du fait de l'émission et de l'absorption de photons virtuels déclenchées par les fluctuations du vide. Avec leur énergie de liaison géante, les excitons dans les monocouches de TMD ont une durée de vie radiative typique ultracourte, de l'ordre de 1 ps [1], comme le montre la photoluminescence résolue en temps sur la figure 5b. Néanmoins les largeurs de raie excitonique étant de l'ordre du meV, la mesure d'un petit décalage de Lamb reste un défi. Pour mettre en évidence cet effet, l'idée est de comparer l'énergie de la transition excitonique principale à celle d'une référence. On va exploiter ici la structure fine de l'exciton. En effet, les excitons dont nous avons présenté jusqu'ici les propriétés sont des excitons dits brillants (X⁰) qui sont constitués d'un électron et d'un trou de *spin* parallèle. Ils se couplent donc fortement à la lumière dans un processus à un photon (absorption ou émission). Si l'électron et le trou ont des *spins* opposés, on obtient un exciton dit sombre, qui en première approximation ne peut pas se coupler à la lumière : on parle d'exciton noir ou sombre (X^D). Cet exciton a en général, dans les semi-conducteurs, une énergie légèrement inférieure à celle de l'exciton brillant [12]. Dans les monocouches de TMD, il se trouve que ces excitons ne sont pas totalement sombres et peuvent se coupler légèrement à la lumière du fait d'effets de mélange de *spin* lié à une forte interaction *spin-orbite* [13]. Sur les spectres de photoluminescence

de la figure 5a obtenue sur une monocouche de WSe₂, on observe ainsi une raie liée à l'exciton brillant X⁰, et, située environ Δ ~ 40 meV à plus basse énergie, une autre raie liée à la recombinaison de l'exciton sombre X^D. L'intensité relative de ces raies est très trompeuse : la raie sombre est plus intense que la raie brillante : ceci est simplement dû au fait qu'elle est à plus basse énergie et que le temps de vie des excitons sombres est beaucoup plus long que celui des excitons brillants. Ainsi, une population relativement importante d'excitons sombres peut se construire. On observe bien sur l'expérience de photoluminescence résolue en temps de la figure 5b que le temps de vie de l'exciton sombre X^D (~800 ps) est typiquement trois ordres de grandeur plus long que celui de l'exciton brillant, ce qui montre bien son plus faible couplage à la lumière. Nous allons donc utiliser cet exciton sombre comme référence d'énergie car, sa force d'oscillateur étant très faible, son décalage de Lamb sera négligeable par rapport à celui de l'exciton brillant.

Nous avons donc mesuré la variation de la séparation d'énergie entre excitons brillants et sombres dans un échantillon de monocouche de WSe₂ dans lequel la densité de mode optique au niveau de la monocouche peut être ajustée. Le contrôle de la distribution du champ électromagnétique du vide au niveau du plan de la monocouche est obtenu simplement en modifiant l'épaisseur d de la couche hBN inférieure, comme nous l'avons montré précédemment pour la mise en évidence de l'effet Purcell sur les

>>>

>>>

monocouches de MoSe₂ (figure 4). En schématisant, cela équivaut à une variation de la distance entre la couche semi-conductrice 2D et un miroir dont la réflectivité effective est donnée par l'empilement des différentes couches.

La figure 5a présente l'exemple des spectres de photoluminescence pour $d = 132$ nm et $d = 214$ nm (l'origine de l'énergie a été choisie à l'énergie de l'exciton sombre X^D). On observe très clairement une variation de l'écart en énergie d'environ $\delta E \approx 1,7$ meV du fait du décalage de Lamb significatif des excitons brillants [14]. Comme attendu, ce décalage est plus élevé par plusieurs ordres de grandeur que celui mesuré dans les systèmes atomiques, une conséquence de la très grande force d'oscillateur des transitions excitoniques dans ces matériaux 2D. La variation δE de la séparation entre excitons brillants et sombres en fonction de d est présentée sur

la figure 5c. La séparation entre X^0 et X^D est ici $\Delta + \delta E$, en choisissant $\delta E = 0$ pour $d = 100$ nm, c'est-à-dire lorsque la monocouche de WSe₂ est au nœud du champ électrique. On observe bien sur la figure 5c une modulation significative de δE , qui oscille en fonction de l'amplitude du champ électromagnétique. Grâce à un modèle basé sur une approche d'électrodynamique quantique et du formalisme de matrice de transfert, on peut calculer le décalage de Lamb en fonction de d : la courbe continue sur la figure 5c est le résultat de ce calcul avec comme seul paramètre ajustable le temps de vie radiatif de l'exciton dans le vide (le même modèle rend bien compte de la variation de la durée de vie par effet Purcell : voir le trait continu sur la figure 4d). Ces résultats démontrent que la différence d'énergie entre les excitons brillants et sombres n'est pas seulement contrôlée par l'interaction coulombienne électron-trou et

les paramètres de la structure de bande du semi-conducteur (comme on le pensait jusqu'ici), mais que le couplage au champ électromagnétique doit également être pris en compte.

Vers une ingénierie quantique des matériaux 2D

L'ensemble de ces expériences montre que pour les hétérostructures de van der Waals, le vide n'est plus un simple décor. Il devient un acteur clé, modelé par l'architecture de l'environnement, capable par exemple de ralentir ou d'accélérer l'émission d'un photon. Ces résultats illustrent la richesse des phénomènes optoélectroniques à l'échelle atomique et placent les matériaux 2D au cœur des recherches sur les interactions lumière-matière contrôlées. L'ingénierie du couplage aux photons *via* l'environnement devient un outil de contrôle des propriétés fondamentales : réflectivité, énergies et forces d'oscillateurs des transitions.

Ces avancées s'inscrivent dans un cadre plus large d'optique quantique dans les matériaux bidimensionnels. À moyen terme, elles pourraient conduire à :

- des émetteurs de photon unique contrôlables *via* une cavité (intégration dans des circuits photoniques) ;
- des mémoires optiques basées sur des états sombres ;
- une ingénierie « atomique » de bandes *via* un environnement électromagnétique contrôlé ;
- un contrôle du temps de relaxation de *spin* des excitons ;
- des plateformes hybrides de simulations quantiques.

On peut ainsi envisager une convergence entre les technologies des semi-conducteurs ultraminces et l'optique quantique, dans un paradigme de nanophotonique quantique intégrée. ■

Nous remercions tous les doctorants, postdoctorants, et chercheurs qui ont contribué à ces travaux : B. Han, L. Ren, H-H Fang, E. Courtade, M. Glazov, M. Semina, D. Lagarde, T. Taniguchi, K. Watanabe, L. Lombez, B. Urbaszek et P. Renucci.

(a) Dans ce régime de couplage faible, le temps d'échappement des photons spontanés hors de la structure est bien plus court que la durée de vie radiative, et la réabsorption est donc négligeable. Ceci contraste avec le régime de couplage fort obtenu avec des miroirs beaucoup plus réfléchissants, produisant des excitons polaritons de microcavité (voir *Reflets de la Physique* 49 (2016) 4).



- 1• G. Wang *et al.*, "Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides", *Rev. Mod. Phys.* **90** (2018) 2.
- 2• A.K. Geim and I.V. Grigorieva, "Van der Waals heterostructures", *Nature* **499** (2013) 419.
- 3• F. Cadiz *et al.*, "Excitonic Linewidth Approaching the Homogeneous Limit in MoS₂-Based van der Waals Heterostructures", *Phys. Rev. X* **7** (2017) 2.
- 4• P. Back *et al.*, "Realization of an Electrically Tunable Narrow-Bandwidth Atomically Thin Mirror Using Monolayer MoSe₂", *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 037401.
- 5• H.H. Fang *et al.*, "Control of the Exciton Radiative Lifetime in van der Waals Heterostructures", *Phys. Rev. Lett.* **123** (2019) 067401.
- 6• G. Scuri *et al.*, "Large Excitonic Reflectivity of Monolayer MoSe₂ Encapsulated in Hexagonal Boron Nitride", *Phys. Rev. Lett.* **12** (2018) 037402.
- 7• J. Rui *et al.*, "A subradiant optical mirror formed by a single structured atomic layer", *Nature* **583** (2020) 369.
- 8• E.M. Purcell, *Phys. Rev.* **69** (1946) 674.
- 9• W. Jhe *et al.*, "Suppression of spontaneous decay at optical frequencies: Test of vacuum-field anisotropy in confined space", *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 666.
- 10• J.M. Gérard *et al.*, "Enhanced Spontaneous Emission by Quantum Boxes in a Monolithic Optical Microcavity", *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 1110.
- 11• W.E. Lamb and R.C. Retherford, "Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method", *Phys. Rev.* **72** (1947) 241.
- 12• M. Combescot, R. Combescot, and F. Dubin, "Bose-Einstein condensation and indirect excitons: a review", *Rep. Prog. Phys.* **80** (2017) 066501.
- 13• G. Wang *et al.*, "In-Plane Propagation of Light in Transition Metal Dichalcogenide Monolayers: Optical Selection Rules", *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017) 4.
- 14• L. Ren *et al.*, "Control of the Bright-Dark Exciton Splitting Using the Lamb Shift in a Two-Dimensional Semiconductor", *Phys. Rev. Lett.* **131** (2023) 116901.

Les lois étranges de l'infiniment petit fluide

Nikita Kavokine⁽¹⁾ (nikita.kavokine@epfl.ch) et **Lydéric Bocquet**⁽²⁾ (lyderic.bocquet@ens.fr)

(1) Laboratoire de Nanofluidique Quantique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, SB ISIC LNQ, Station 6 (Bât. CH), 1015 Lausanne

(2) Laboratoire de Physique de l'École normale supérieure, CNRS et ENS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

La mécanique des fluides est un domaine remarquable par la simplicité des lois qui la régissent... qui contraste de façon frappante avec la diversité des phénomènes que ces lois modélisent. L'équation de Navier-Stokes résume la dynamique des fluides en une seule ligne mathématique. Cette équation universelle est capable de décrire les courants océaniques jusqu'à la nage des bactéries, pourtant séparés par une dizaine d'ordres de grandeurs en échelles spatiales. Ce n'est qu'à une échelle avoisinant la taille moléculaire que l'universalité de la mécanique des fluides vacille, laissant place à la complexité de la nanofluidique. Pourquoi s'intéresser à la nanofluidique ? Parce qu'aux échelles nanométriques, les écoulements ne sont plus régis par la seule hydrodynamique, mais également par la chimie des surfaces, la physique statistique et la physique des solides, jusqu'à impliquer le comportement quantique des électrons. Trouvant ainsi leur source à la croisée de plusieurs domaines, les lois fondamentales de l'infiniment petit fluide sont particulièrement étranges et complexes. Or, ces lois ont une importance technologique majeure : elles régissent notamment les processus de séparation moléculaire, de conversion et de stockage d'énergie. Dans cet article, nous proposons une approche intuitive des lois émergentes de l'infiniment petit fluide. Nous illustrons également comment la compréhension de ces lois sous-tend de nouvelles solutions technologiques pour le « nexus eau-énergie », convergence des problématiques sociétales impliquant l'eau et l'énergie.

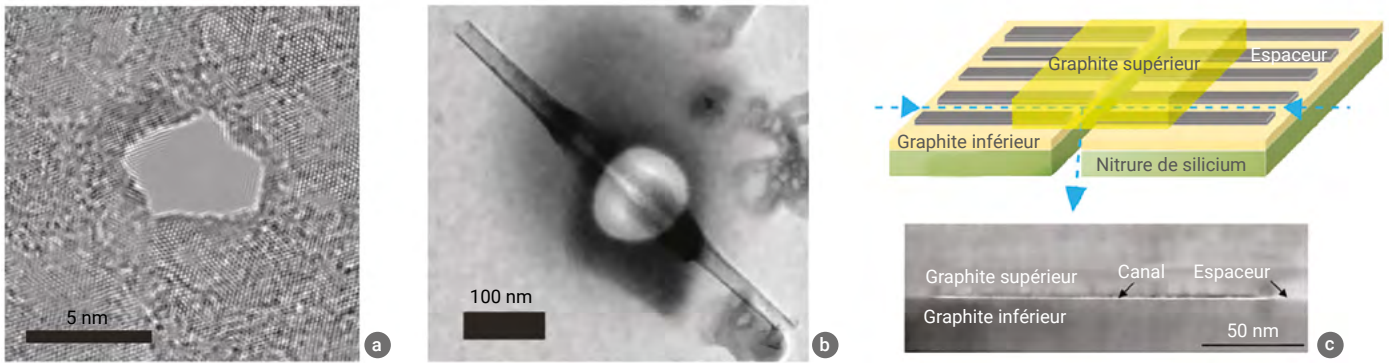
La nanofluidique – l'étude fondamentale des écoulements de fluides aux échelles nanométriques – est un jeune domaine de recherche. Les premières expériences véritablement nanofluidiques – les mesures de transport d'électrolytes à travers des nanopores ou nanocanaux – datent de moins de 20 ans. C'est là une grande différence entre la nanofluidique et la nanoélectronique, qui existe en tant que domaine depuis les années 1950. Le transport d'électrons à travers des jonctions nanométriques est un problème bien étudié expérimentalement, et qui bénéficie d'un cadre théorique solide, notamment depuis les travaux de Landauer et Büttiker. Or, s'il est relativement aisé de prédire le courant électrique à travers une jonction tunnel, il est en revanche toujours impossible aujourd'hui de prédire avec précision le débit d'eau s'écoulant au travers d'un nanotube de carbone. L'une des raisons de ce retard réside dans le fait que la fabrication même de canaux nanofluidiques individuels est longtemps restée un défi

insurmontable. Les premiers dispositifs nanofluidiques (avec un confinement en dessous de 100 nm) ont été réalisés par perçage ou gravure dans des matériaux diélectriques, tels que le verre ou le nitrure de silicium. Mais le domaine a vraiment émergé avec l'utilisation des nanomatériaux – nanotubes de carbone, découverts en 1991, ou matériaux bidimensionnels, tels que le graphène, isolés à partir des années 2000. Ces nanostructures ont permis de concevoir des canaux nanofluidiques parfaitement contrôlés. Les progrès dans la manipulation de ces matériaux ont été très rapides et, aujourd'hui, on sait fabriquer des dispositifs nanofluidiques dans diverses géométries : nanopores (0D), nanotubes (1D) et nanofentes (2D) – voir figure 1. Des nanopores peuvent être percés dans des monocouches suspendues de graphène ou de disulfure de molybdène (MoS_2) ; des nanotubes de carbone ou de nitrure de bore peuvent être manipulés individuellement et interfacés à des microréservoirs ; des

cristaux de matériaux 2D peuvent être assemblés à façon pour former des fentes bidimensionnelles dont l'épaisseur est déterminée par un nombre discret de couches atomiques [1]. Les matériaux 2D et leurs assemblages constituent désormais un véritable couteau suisse des laboratoires travaillant sur la nanofluidique. Tous ces dispositifs peuvent aujourd'hui atteindre un confinement parfaitement contrôlé en dessous du nanomètre – comparable à la taille d'une molécule d'eau (0,3 nm). Depuis, les résultats expérimentaux sur ces dispositifs s'accumulent, comme autant de manifestations des étranges lois de l'infiniment petit fluide [2].

La caractérisation de canaux de taille moléculaire requiert également des mesures ultrasensibles. Les mesures de courant ionique sont les plus répandues. Lorsqu'un nanocanal rempli d'une solution d'électrolyte est soumis à une différence de potentiel, les ions sont mis en mouvement, créant ainsi un courant électrique qui peut

>>>



1. Systèmes nanofluidiques à base de nanomatériaux.

(a) Nanopore percé dans une couche de disulfure de molybdène.

(b) Nanotube de carbone inséré dans une membrane de nitrure de silicium.

(c) Nanofente obtenue par assemblage de van der Waals de cristaux de graphène. Reproduit de [2].

Il faut noter que la nature maîtrise la fabrication d'un genre particulier de systèmes nanofluidiques : les canaux ioniques ou porines, formés par des protéines qui s'insèrent dans les membranes de nos cellules, sont en fait de minuscules tuyaux, larges d'à peine un nanomètre. Leurs fonctionnalités très précisément ajustées (sélectivité aux ions ou à l'eau, sensibilité mécanique ou chimique) sont une source d'inspiration pour les canaux nanofluidiques artificiels. Ces fonctionnalités reposent cependant sur les détails moléculaires des structures protéiques. Les canaux biologiques constituent ainsi une véritable orfèvrerie fluide, mais ils révèlent difficilement les principes généraux qui régissent les écoulements de fluides aux nanoéchelles. La nanofluidique s'est donc surtout développée autour des systèmes artificiels, et ce n'est que très récemment que des idées unifiant les canaux biologiques et artificiels ont commencé à se développer.

>>>

être amplifié et mesuré. Des courants de l'ordre de la dizaine de femtoampères peuvent être détectés, ce qui rend possible la caractérisation de nanotubes individuels. La conductance ionique fournit cependant une information indirecte et incomplète et le développement de méthodes de caractérisation alternatives est un défi expérimental majeur pour la nanofluidique. La perméabilité hydrodynamique, qui quantifie le débit de fluide sous un gradient de pression donné, reste une quantité très difficile à mesurer et les chercheurs ont introduit des méthodes indirectes pour contourner cette difficulté, par exemple la mesure de la force exercée par le minuscule jet d'eau émergeant d'un nanocanal [3]. Très récemment, des méthodes spectroscopiques, telles que la SFG – *Sum Frequency Generation*, qui renseigne sur l'orientation interfaciale des molécules d'eau – sont venues apporter des informations moléculaires sur le comportement des fluides nanoconfinés, mais elles restent très parcellaires. La recherche en nanofluidique s'apparente aujourd'hui à l'exploration d'une grande pièce sombre avec une lampe de poche : la lumière n'a été faite que sur quelques éléments disparates, et le travail du physicien – aussi passionnant que difficile – est de reconstituer la cohérence entre ces éléments, tout en cherchant les moyens d'en révéler de nouveaux.

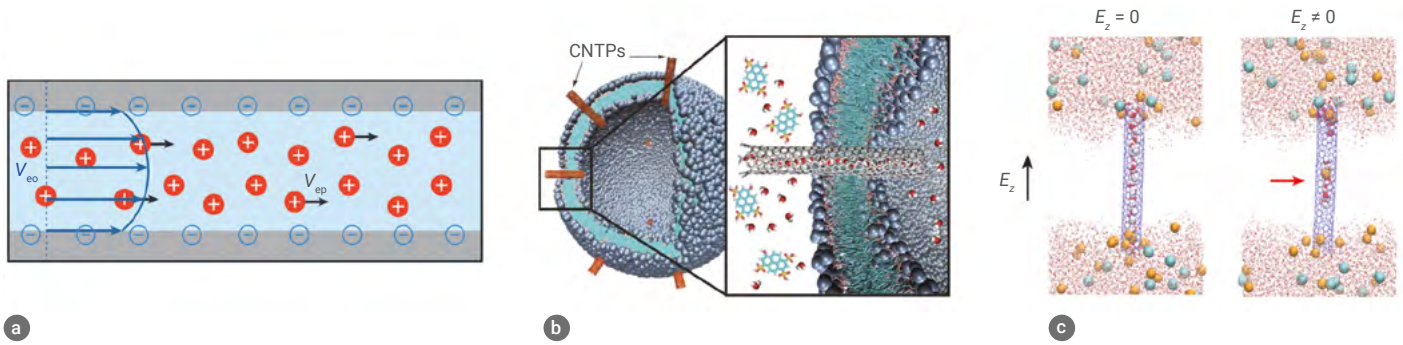
Transport ionique : par-delà le champ moyen

Dissous dans une solution aqueuse, les ions d'un sel (tel que le chlorure de sodium, NaCl) sont des porteurs de courant électrique. La loi d'Ohm s'applique *a priori* même dans des systèmes nanoconfinés, avec une conductance électrique proportionnelle au nombre de porteurs. Cependant, aux nanoéchelles, les effets de surface ont une importance accrue – simplement du fait d'un grand rapport surface-sur-volume. Les surfaces des dispositifs nanofluidiques acquièrent systématiquement une charge en solution aqueuse, souvent du fait de l'adsorption d'ions présents en solution. Cette charge de surface attire des contre-ions à l'intérieur du canal, augmentant ainsi sa conductance. La population d'ions mobiles dans le canal acquiert alors une charge nette, qui vient compenser celle, fixe, de la surface. Ainsi, un écoulement de fluide à travers le canal transporte un courant ionique : on parle de « courant de *streaming* ». L'effet inverse existe également – un courant ionique (induit par une différence de potentiel) est accompagné d'un écoulement de fluide : on parle de flux électro-osmotique (figure 2a). De manière générale, la charge de surface couple le transport d'ions et le transport de fluide. Ces phénomènes de transport couplés, qui émergent spécifiquement aux nanoéchelles, sont d'ores et déjà à la base

d'innovation technologiques, dont certaines sont mentionnées ci-après.

Les phénomènes que nous venons d'évoquer sont *a priori* décrits de façon cohérente par les équations dites de Poisson-Nernst-Planck-Stokes (PNPS). Ces équations décrivent le couplage entre phénomènes de diffusion, transport convectif sous champ électrique et flux hydrodynamique. Leur apparente simplicité cache leur caractère intrinsèquement non-linéaire, lié aux couplages électrostatiques. Elles sont en fait intimement similaires aux équations décrivant le transport de charges (électrons et trous) dans les semi-conducteurs ; cette analogie suggère une similitude directe des propriétés émergentes dans le transport nanofluidique avec celle de dispositifs électroniques. Par exemple, les diodes ioniques qui peuvent être réalisées au travers de nanocanaux asymétriques sont analogues aux diodes de Shockley [4]. Mais une différence importante est que les fluides s'écoulent sous contrainte, contrairement aux solides, ce qui induit des phénomènes de couplage du transport de charge avec les écoulements, conduisant par exemple à des effets osmotiques fortement non-linéaires [5, 6].

La description PNPS repose sur une hypothèse de milieu continu et sur une approximation de champ moyen pour les interactions électrostatiques. Elle rencontre donc ses limites quand les effets



2. (a) Principe de l'électro-osmose dans un nanocanal aux parois chargées. La charge de surface (négative) attire des contre-ions (positifs) à l'intérieur du canal. Les ions mobiles présents dans le canal ayant alors une charge nette, l'application d'un champ électrique provoque un écoulement du fluide : c'est le flux électro-osmotique.

(b) Nanotubes de carbone de 0,8 nm de diamètre insérés dans une vésicule lipidique.

(c) Clichés de simulations par dynamique moléculaire montrant la fragmentation de la chaîne de molécules d'eau à l'intérieur du nanotube, rendant compte de la violation de la relation de Nernst-Einstein observée expérimentalement. Reproduit de [2] et [8].

de structuration moléculaire deviennent importants, mais surtout quand les interactions entre ions ne sont plus assez faibles pour être négligées. Cela peut facilement être le cas dans un canal nanofluidique, où les interactions ioniques sont écrantées par la paroi du canal plutôt que par le liquide. Les ions de charges opposées ont alors tendance à s'associer en paires, dites paires de Bjerrum, qui induisent des effets non-linéaires dans la conduction ionique – en particulier, des effets de mémoire, dont des signatures ont récemment été observées dans des canaux bidimensionnels [7]. De façon encore plus surprenante, il a été observé que dans des nanotubes de tout juste 0,8 nm de diamètre (figure 2b), le transport des ions potassium est en violation apparente de la relation de Nernst-Einstein, relation fondamentale entre le coefficient de diffusion et la mobilité sous champ électrique. Ce transport anormal peut-être expliqué par un autre effet non-linéaire : la fragmentation de la chaîne d'eau confinée en plusieurs morceaux sous l'effet du champ électrique [8] (figure 2c). Enfin, les équations PNPS se fondent sur l'hypothèse d'une charge de surface constante et immobile – hypothèse remise en question par de nombreux résultats expérimentaux. Régulation de charge par la concentration en sel, mobilité de la charge de surface, mobilités ioniques non-uniformes à travers le canal... ces effets interfaciaux subtils, impliquant à la fois la chimie de surface et la physique du solide, échappent pour l'instant à une compréhension systématique.

Origines de la friction hydrodynamique

À l'échelle macroscopique, le flux laminaire d'un liquide à travers un tube est régi par la loi de Poiseuille : sous un gradient de pression donné, le débit dépend du rayon R du tube comme R^4 . Une dépendance aussi forte en fonction du rayon implique un débit infime si le rayon est de l'ordre du nanomètre. Des mesures de débit d'eau à travers des canaux de quelques nanomètres de rayon ont cependant pu être réalisées, car on observe systématiquement aux nanoéchelles des débits plus importants que ceux prédits par la loi de Poiseuille. Cela est dû au fait que le liquide « glisse » sur les parois, en contradiction avec l'hypothèse macroscopique de non-glissement, impliquant une dépendance en rayon plus faible (en R^3). En d'autres termes, alors que le débit à travers un tube microscopique est régi par la viscosité (le frottement interne du fluide), le débit à travers un nanotube est déterminé par le frottement entre le fluide et la paroi.

Bien que l'idée d'une condition de glissement partiel en hydrodynamique remonte aux travaux de Navier, l'origine microscopique du frottement entre un liquide et un solide est toujours un sujet de recherches intenses. Intuitivement, un écoulement de fluide le long d'une paroi rencontre une résistance si la paroi n'est pas parfaitement lisse : le frottement devrait donc être lié à la rugosité (à l'échelle atomique) de la paroi solide. On s'attend de plus à ce qu'il y ait un

lien entre le frottement et les propriétés de mouillage de la paroi : plus la paroi est hydrophobe, plus la première couche moléculaire du liquide tend à être éloignée de la paroi, et moins il y a de frottement. Cela implique une relation entre le coefficient de frottement hydrodynamique et l'angle de contact liquide-solide, qui est vérifiée pour de nombreux systèmes, aussi bien expérimentalement qu'en simulation par dynamique moléculaire [9].

Une violation notoire de cette relation est cependant observée pour les écoulements d'eau dans les nanotubes de carbone. L'eau y coule quasiment sans frottement et le peu de frottement mesuré dépend fortement du rayon du tube : plus le tube est étroit, plus le frottement est faible [3]. Cette observation est pour le moins surprenante : *a priori*, les propriétés de rugosité interfaciale ou de mouillage ne dépendent pas du rayon du tube. Son explication n'a été possible que grâce à un développement théorique récent : une description quantique de l'interface solide-liquide, qui a permis de rendre compte de l'interaction entre la dynamique du fluide et la dynamique électronique dans la paroi du tube [10]. Lorsqu'une telle interaction est prise en compte, il apparaît que la rugosité interfaciale n'est pas la seule source de frottement solide-liquide. En plus du frottement rugueux, dit « classique », il existe un frottement induit par les fluctuations, dit « quantique ». Le frottement quantique, parfois appelé frottement de van der Waals, rend compte du fait que le fluide en écoulement perd de l'énergie en créant des

>>>

Nous décrivons ici deux exemples du cheminement depuis la découverte de nouveaux comportements nanofluidiques jusqu'à la création de nouvelles technologies de rupture pour l'eau et l'énergie. Le premier exemple concerne l'énergie osmotique, qui exploite la différence de salinité entre eau de mer et eau douce. Son potentiel avait été identifié dès les années 1950. C'est une énergie renouvelable, non-intermittente, pilotable, avec un potentiel mondial considérable, de plusieurs centaines à 1000 gigawatts selon les estimations, soit l'équivalent de la puissance nucléaire mondiale. Pourtant son exploitation industrielle reste aujourd'hui marginale, car les technologies actuelles de conversion – élaborées dans les années 1960-1970 et basées principalement sur des membranes polymériques – demeurent peu efficaces. Depuis une dizaine d'années, les résultats de la nanofluidique ont montré qu'aux échelles nanométriques, un phénomène d'osmose non-conventionnelle, de type « diffusio-osmose », pouvait augmenter sur certains matériaux la conversion d'énergie osmotique. Ce point de vue différent a permis de concevoir des membranes à partir de matériaux biosourcés, des dérivés de cellulose, plus efficaces et bien moins chères que les membranes polymériques habituellement utilisées. Cela a été le point de départ d'une mise à l'échelle industrielle qui s'est concrétisée en 2024 par le lancement d'un pilote sur le Rhône par la *start-up Sweetch Energy* qui développe cette nouvelle technologie d'énergie osmotique. Cette approche peut être élargie à ce que l'on pourrait appeler les « technologies entropiques », utilisant les forces entropiques pour convertir l'énergie de mélange. Au-delà de l'énergie osmotique, la technologie membranaire développée peut s'étendre par exemple à la conversion des chaleurs fatales, chaleur inexploitée produite par un processus thermodynamique industriel et généralement rejetée dans l'environnement sans aucune valorisation.

Un autre exemple de chemin court entre recherche en nanofluidique et application technologique concerne le phénomène de diode osmotique évoqué plus haut et prédit théoriquement en 2013 [5]. Par analogie avec les semi-conducteurs, la caractéristique tension-courant ionique d'un canal asymétrique (par exemple en termes de charge de surface) présente elle-même une asymétrie, ou rectification. De façon plus surprenante, la théorie suggère aussi que la pression osmotique, donc le flux d'eau sous gradient de concentration ou de potentiel, est également rectifiée. Cette prédiction a pu être confirmée à l'échelle membranaire, grâce à un assemblage asymétrique tel que cela a été suggéré théoriquement [6]. L'effet diode a permis ainsi de dessaler ou de purifier l'eau sous champ électrique alternatif (AC) par rectification osmotique, quelques volts ayant le même effet que quelques dizaines de bars en pression. La démonstration de l'effet à l'échelle membranaire permet d'envisager une mise à l'échelle rapide, qui a été engagée par la *start-up Ilion*, issue de notre laboratoire, pour développer une technologie de dessalement basée sur ces effets nanofluidiques.

Dans notre quotidien de chercheur, nous rencontrons parfois des phénomènes ou des propriétés qui nous semblent avoir un réel potentiel en tant qu'application. Mais passer de l'échelle du laboratoire à l'échelle industrielle est un défi considérable, que rencontrent toutes les *start-ups* développant des technologies de rupture issues de recherches fondamentales. Cette transition nécessite en quelque sorte de réaliser le passage d'une recherche guidée uniquement par la curiosité, donc sans aucune concession, à une recherche à mission, la mission étant, par exemple, de réaliser dans un premier temps un prototype basé sur la découverte scientifique, ou de construire un pilote industriel effectif. Le mathématicien Richard Hamming expliquait avec raison : *"In science, if you know what you are doing, you should not be doing it. In engineering, if you do not know what you are doing, you should not be doing it."* En réalité, parcourir le chemin entre recherche et innovation requiert une collaboration intime entre ces deux visions en apparence contradictoires : science fondamentale et ingénierie de haut niveau. De façon concrète, nous avons créé au sein de l'équipe Micromégas une *spin-in* qui fait cohabiter notre recherche fondamentale avec de l'ingénierie fine afin d'assurer les premières étapes, souvent délicates, de la mise à l'échelle. Développer des applications sur la base de résultats de recherche reste une aventure, engagée et risquée. Mais il est enthousiasmant pour un chercheur de voir des résultats fondamentaux se concrétiser en technologie en rupture avec l'existant. La réussite de ce cheminement démontre la puissance de la recherche fondamentale.

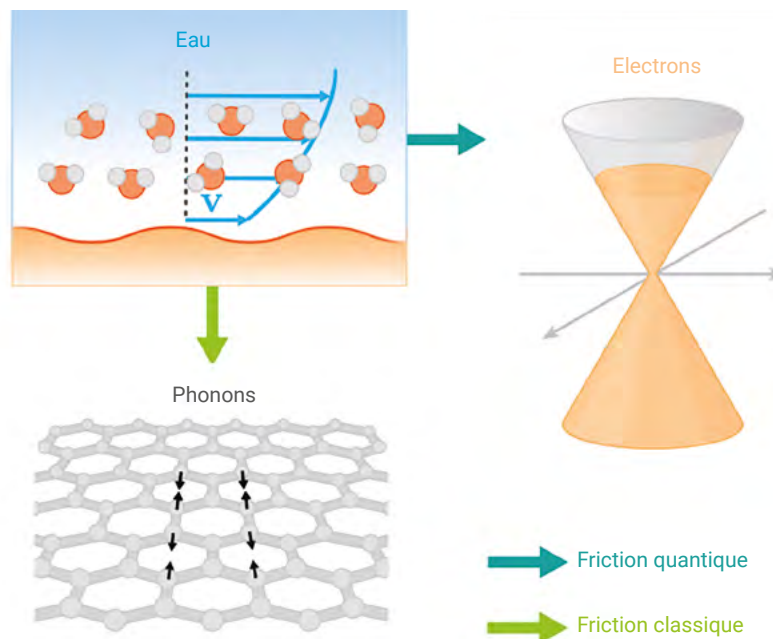
>>>

excitations électroniques dans le solide (figure 3). Ce frottement est d'autant plus fort que les fluctuations moléculaires du liquide et les excitations du solide sont proches en fréquence ; il est de ce fait très sensible aux propriétés électroniques du solide. Ainsi, l'infime frottement subi par l'eau dans les nanotubes de carbone a pu être attribué à l'effet de friction quantique ; la dépendance en rayon correspond alors à celle d'un mode collectif des électrons du nanotube, le mode plasmon de surface, associé aux oscillations collectives des électrons entre les feuillets de carbone d'un nanotube multiparoï.

Vers une « plomberie quantique »

Plus généralement, cette perspective suggère que les parois des nanocanaux ne peuvent plus être considérés comme des murs passifs (hypothèse usuelle de l'hydrodynamique) mais que ses degrés de liberté internes, notamment ses excitations collectives – plasmons, mais également phonons, excitons, etc. – peuvent se coupler avec les modes collectifs du fluide. De l'énergie et de la quantité de mouvement peuvent être échangés dans les deux sens, du fluide vers le solide et *vice versa*, à la condition que les modes soient en syntonie, c'est-à-dire que leurs densités spectrales se recouvrent en fréquence et en nombre d'onde.

Deux phénomènes que nous avons prédits récemment illustrent les opportunités offertes par cette « plomberie quantique » : le phénomène de *flow tunneling* et la conversion d'énergie dite « hydronique », décrits sur la figure 4. S'il paraît tout à fait impossible du point de vue hydrodynamique qu'un écoulement traverse un mur imperméable, le couplage du fluide aux degrés de liberté internes du mur le permet (pour certains matériaux) : un fluide s'écoulant sur une paroi d'épaisseur finie peut induire un écoulement de l'autre côté du mur ! [11] Ce phénomène est lié au transfert de quantité de mouvement entre le fluide et les électrons de la paroi, qui se propage alors de proche en proche au travers de la paroi solide, puis enfin vers le fluide de l'autre côté. L'amplitude de l'effet dépend de la syntonie entre les modes du fluide et ceux



3. Mécanismes du frottement liquide-solide. La friction classique correspond au transfert de quantité de mouvement au réseau cristallin du solide (phonons), alors que la friction quantique transfère de la quantité de mouvement directement aux électrons.

de la paroi solide ; dans des conditions optimales, des parois d'une dizaine de nanomètres d'épaisseur pourraient être traversées. Une autre prédiction théorique concerne la conversion directe d'énergie mécanique du fluide en énergie électrique au sein d'une paroi avec laquelle le fluide est en contact. Cet effet exploite le phénomène de friction quantique décrit précédemment, qui peut induire un courant électronique sous l'effet d'un mouvement du fluide. De façon surprenante, la génération de courant se fait même en l'absence d'espèces chargées en solution, grâce aux fluctuations de charge du liquide appelées *hydrons* – d'où le terme « énergie hydronique » [12]. Ce mécanisme ouvre des perspectives particulièrement intéressantes pour la récupération d'énergie dite bleue, associée à l'eau, mais *sans électrochimie*.

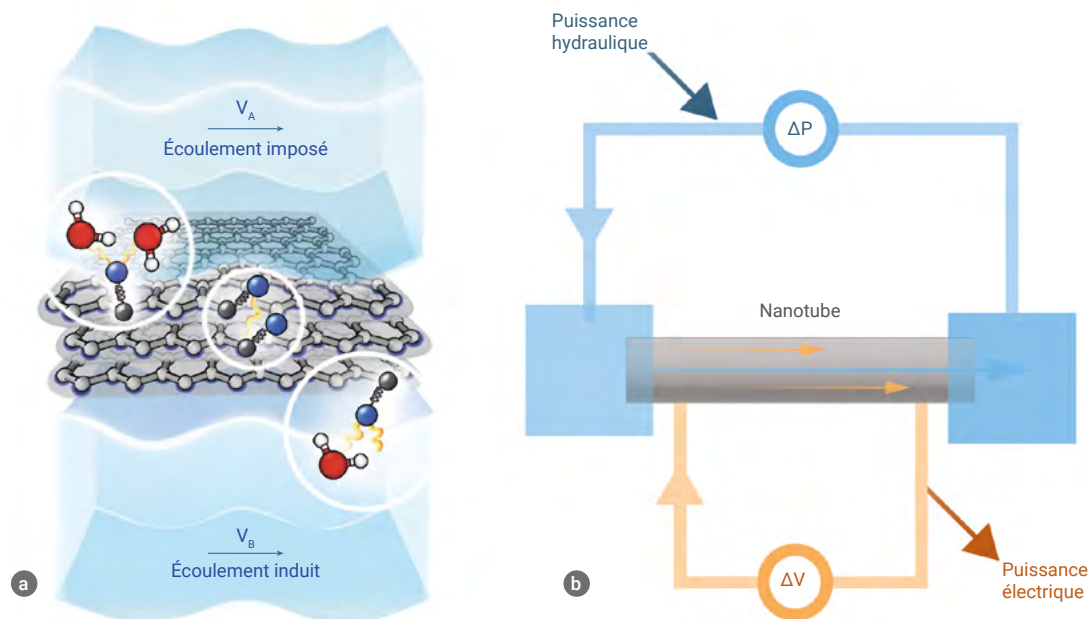
La « plomberie quantique », en permettant le couplage entre des caractéristiques quantiques des solides et celles propres aux fluides, offre tout un champ nouveau d'exploration scientifique. Ces effets, qui n'ont jamais été explorés jusqu'ici, offrent une perspective enthousiasmante pour la recherche et l'innovation en nanofluidique.

Nexus eau-énergie

Les propriétés des écoulements nanofluidiques sont ainsi étranges et uniques. Cette singularité est *a priori* un atout pour le développement de nouvelles technologies, d'autant que le chemin est court en nanofluidique entre lois fondamentales et applications, notamment pour la conversion énergétique ou le dessalement. Cette interface constitue le « nexus eau-énergie » – terme qui résume l'interdépendance systémique et incontournable entre eau et énergie : il faut beaucoup d'eau pour collecter l'énergie (par exemple pour la production d'hydrogène ou le refroidissement des centrales nucléaires) et beaucoup d'énergie pour filtrer ou dessaler l'eau. Les comportements émergents aux nanoéchelles offrent des solutions complètement nouvelles à ces problèmes intriqués, notamment dans le domaine des membranes, à la fois en termes de principes physiques et de matériaux. Concrètement, les technologies membranaires sont souvent limitées au tamisage stérique ou électrostatique de certains solutés, tel que le sel dans le cas du dessalement : ce sont ni plus ni moins des passoires. Cependant, avec un peu

>>>

4. (a) Principe du *flow tunneling* : un écoulement est transmis à travers une paroi solide grâce aux excitations internes de cette paroi.
 (b) Conversion d'énergie « hydronique » : le flux d'un liquide électriquement neutre le long d'une paroi conductrice y induit un courant électrique. Reproduit de [11, 12].



>>>

d'imagination, on peut concevoir des solutions bien plus efficaces et originales basées sur les phénomènes de transport non-linéaire, voire même de couplage quantique décrits précédemment. Ce passage à la technologie reste pourtant un défi car il ne suffit pas de mettre en évidence un comportement singulier à l'échelle d'un seul canal pour le multiplier à l'échelle de la membrane. La mise à l'échelle pour atteindre le stade de technologies industrielles est une aventure scientifique en soi.

Conclusion et perspectives

Explorer le domaine de la nanofluidique requiert de franchir un pas technologique et instrumental dans la conception et la fabrication des nanosystèmes fluidiques. Mais cet effort est largement récompensé par la richesse considérable qu'offre le transport des fluides aux nanoéchelles. Nous n'avons abordé ici qu'un pan nécessairement réduit des phénomènes mis en évidence ces dernières années dans ce

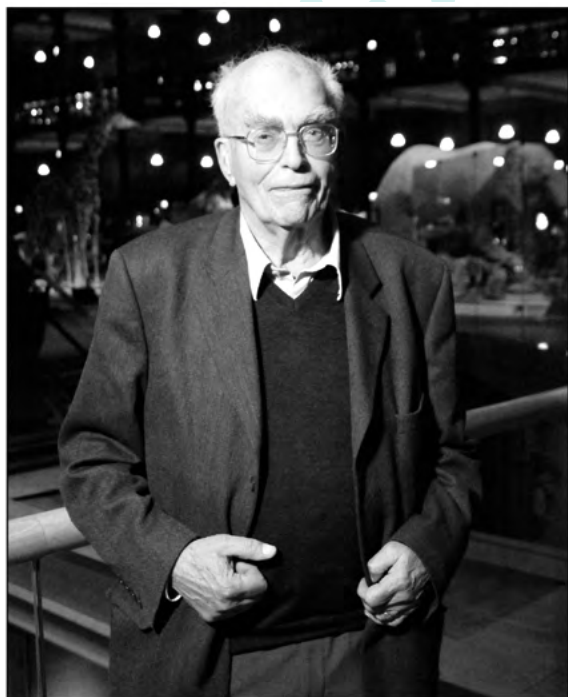
domaine, et nous aurions pu citer bien d'autres exemples comme les variations contre-intuitives de la permittivité diélectrique en confinement, la possibilité d'une phase superionique en conditions douces, la cristallisation à température ambiante dans les nanotubes, les effets de blocage coulombien, etc. Ces phénomènes ouvrent de multiples perspectives théoriques et expérimentales jusqu'ici inexplorées. C'est tout le sel de l'intrigue scientifique. ■



- 1• B. Radha *et al.*, "Molecular transport through capillaries made with atomic-scale precision", *Nature* **538** (2016) 222-225.
- 2• N. Kavokine, R.R. Netz and L. Bocquet, "Fluids at the Nanoscale: From Continuum to Subcontinuum Transport", *Annual Review of Fluid Mechanics* **53** (2021) 377-410.
- 3• E. Secchi *et al.*, "Massive radius-dependent flow slippage in carbon nanotubes", *Nature* **537** (2016) 210-213.
- 4• R. Karnik *et al.*, "Rectification of ionic current in a nanofluidic diode", *Nano Letters* **7** (2007) 547-551.
- 5• C.B. Picallo *et al.*, "Nanofluidic osmotic diodes: Theory and molecular dynamics simulations", *Physical Review Letters* **111** (2013) 244501.
- 6• S. Abdelghani-Idrissi *et al.*, "Resonant osmotic diodes for voltage-induced water filtration across composite membranes", *Nature Materials* (2025): sous presse.
- 7• P. Robin *et al.*, "Long-term memory and synapse-like dynamics of ionic carriers in two-dimensional nanofluidic channels", *Science* **379** (2023) 161-167.
- 8• Z. Li *et al.*, "Breakdown of Nernst-Einstein relation in carbon nanotube porins", *Nature Nanotechnology* **18** (2023) 177-183.
- 9• D.M. Huang *et al.*, "Water slippage versus contact angle: A quasiuniversal relationship", *Physical Review Letters* **101** (2008) 226101.
- 10• N. Kavokine, M.-L. Bocquet and L. Bocquet, "Fluctuation-induced quantum friction in nanoscale water flows", *Nature* **602**, 84-90 (2022)
- 11• B. Coquinot *et al.*, "Momentum tunnelling between nanoscale liquid flows", *Nat. Nanotechnol.* **20** (2025) 397-403.
- 12• B. Coquinot, L. Bocquet and N. Kavokine, "Hydroelectric energy conversion of waste flows through hydroelectronic drag", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **121** (2024) e2411613121.

Hommage à Pierre Radvanyi

Ce dossier de cinq articles présente le parcours extraordinaire de Pierre Radvanyi (1926-2021) et son activité foisonnante en physique nucléaire et hadronique, son rôle irremplaçable au sein de la Société Française de Physique, ainsi que son action en histoire des sciences, en particulier dans le cadre de l'Association Curie et Joliot-Curie.



Pierre Radvanyi en octobre 2011, lors du festival Parisscience.

© Parisscience

Les multiples facettes d'un personnage hors du commun

Monique Bordry⁽¹⁾ (bordrymeilaine@gmail.com) et **Michel Spiro**⁽²⁾ (mspiro@admin.in2p3.fr)

(1) Première directrice du Musée Curie et assistante de Pierre Radvanyi pendant des années

(2) Président de l'Association Curie et Joliot-Curie, ancien président de la Société Française de Physique

Un grand témoin de son temps. Pierre Radvanyi a eu une vie riche, bien remplie, dans une époque tumultueuse, où lui et sa famille furent une cible. Son parcours, plein d'embûches, a nourri sa personnalité et son intelligence. Ses actions et ses écrits sont exemplaires et touchants comme on peut le découvrir dans *Reflets de la Physique* 55 (2017) 44-45 (« de Berlin à Orsay via Mexico », article repris partiellement dans ce dossier, p. 48) et plus encore dans son livre *Au-delà du fleuve*. Influencé par sa mère Anna Seghers, Pierre avait une grande culture littéraire. Il pouvait résumer des travaux d'auteurs allemands, anglais, espagnols et bien sûr français, puisqu'il connaissait parfaitement toutes ces langues

Un scientifique au service de la physique nucléaire et hadronique (voir l'article de Thierry Hennino, p. 50). Héritier des Curie et Joliot-Curie, il a accompagné la physique nucléaire de la radioactivité à ses développements les plus modernes autour de la physique hadronique. Directeur

de recherche au CNRS, il a été l'un des fondateurs du laboratoire national Saturne (IN2P3/CNRS - CEA) à Saclay, qu'il a codirigé pendant de longues années. Pierre Radvanyi a été organisateur du Congrès international de physique nucléaire qui s'est tenu en 1964 à Paris au Palais de l'UNESCO et de la conférence internationale ICOHEPANS en 1981 à Versailles. Dans les années 1970, il a été *chairman* du Comité des conférences de la Société Européenne de Physique (EPS), dont il a été membre du comité exécutif de 1976 à 1981.

Une figure incontournable de la Société Française de Physique (SFP) à laquelle il a adhéré en 1953 jusqu'à son décès, le 6 décembre 2021, à l'âge de 95 ans. Membre du bureau de 1969 à 1975, secrétaire général de 1975 à 1980 (voir l'article de M. Veyssié, p. 54), premier rédacteur en chef du nouveau *Bulletin de la SFP* de 1969 à 1997, il est resté membre invité assidu du Bureau jusqu'en 2017.

>>>

>>>

Un historien des sciences (voir l'article de Renaud Huynh, p. 56) relatant les débuts de la physique nucléaire et de la radioactivité. Il a écrit de nombreux livres, *Les Curie pionniers de l'atome* (2005), *Histoire d'atomes* avec Monique Bordry (1988), *La radioactivité artificielle et son histoire* (1984), contant de l'intérieur l'histoire primordiale de cette discipline qui a marqué une époque. Il a été un acteur majeur du Musée Curie et de l'Association Curie et Joliot-Curie (ACJC), toutes deux des institutions mémorielles et engagées remarquables. Il a été secrétaire général de l'ACJC de 1999 à 2021.

Homme cultivé, conteur, écrivain, humaniste attachant, d'une humilité et d'une modestie qui contrastent avec son épanchement affable, savant et d'une sagesse appréciée de tous, tel était Pierre Radvanyi. Présent sur tous les fronts de la culture et de la connaissance et ne recherchant pas les honneurs, il a été unanimement aimé et regretté. Pierre Radvanyi a imprimé sa marque chez beaucoup d'entre nous. Son honnêteté, sa rigueur, sa précision, mais aussi son attention aux autres, resteront un exemple.

Il nous manque.

Puissent les articles qui suivent dans ce numéro de *Reflets de la Physique* contribuer à entretenir la mémoire de Pierre et faire de lui un exemple et une leçon pour les générations futures. ■



Couverture du livre de Pierre Radvanyi, *Au-delà du fleuve, avec Anna Seghers* (Le temps des cerises, 2014).

Le double exil de Pierre Radvanyi : de Berlin à Orsay, via Mexico

D'après l'article écrit par Pierre Radvanyi dans *Reflets de la Physique* 55 (2017) 44-45

Dans ce texte, basé sur une intervention orale effectuée au Théâtre de la Reine Blanche [1], Pierre Radvanyi nous raconte son Odyssée, qui l'a conduit d'Allemagne en France puis au Mexique, lors des événements dramatiques de l'accession au pouvoir du régime nazi, puis de la Seconde Guerre mondiale, et enfin son choix de la France comme pays de retour en 1945. Pierre Radvanyi peut ainsi être considéré comme un « témoin de son temps » [2].

Peter – prénom d'origine de Pierre – Radvanyi est né à Berlin le 29 avril 1926. Sa mère, née Netty Reiling à Mayence, avait commencé à écrire des nouvelles ; son père, Laszlo Radvanyi, né à Budapest, était sociologue et économiste. Ses parents avaient fait connaissance lors de leurs études à l'université de Heidelberg. En 1928, parut le premier roman de sa mère – sous le pseudonyme d'Anna Seghers – qui lui valut le prix Kleist. Elle devint un écrivain engagé prenant position contre les nazis.

En 1932, à Berlin, Pierre apprend à lire et à écrire (en allemand, bien sûr), mais en décembre il est victime d'une forte scarlatine. Le médecin recommande un séjour dans une maison de convalescence en Forêt noire. Sa mère l'accompagne. En fin d'après-midi, le 27 février 1933, ils sont sur le bord d'une patinoire lorsque les haut-parleurs donnent soudain une information : le Reichstag brûle !

La mère de Pierre comprend tout de suite la signification de l'événement et rentre aussitôt à Berlin par le train de nuit. Peu après son arrivée dans son appartement, on frappe à la porte : c'était la police venue l'arrêter pour ses prises de position antinazies ; elle avait été dénoncée. Elle s'enfuit, retrouve son mari et gagne Zurich. En avril, ils émigrent à Paris.



1. Pierre Radvanyi avec sa sœur et ses parents, à Équihen (Pas de Calais), été 1933.

La grand-mère de Pierre vint le chercher en Forêt noire début juin, pour l'emmener, avec sa sœur, en train, à Strasbourg, où sa mère les attendait sur le quai. Ce fut la dernière fois que Pierre vit sa grand-mère : elle fut déportée en mars 1942.

En France, la famille s'installe à Meudon ; c'est là que Pierre apprend à parler français. Sa mère écrivait beaucoup, notamment son roman *Das siebte Kreuz (La septième croix)* en 1938/39. Pierre et sa sœur Ruth vont à « l'École nouvelle » (qui utilisait la méthode Freinet).

La guerre arrive en septembre 1939. Laszlo Radvanyi est interné comme Hongrois en mai 1940 au camp du Vernet en Ariège. En juin 1940, la mère de Pierre décide de fuir avec ses enfants pour tenter de franchir la Loire. Ils se retrouvent sur la route de l'exode, avec des dizaines de milliers de réfugiés. Rattrapés à Pithiviers par les troupes allemandes, ils doivent regagner Paris occupé. Puis, en septembre, ce fut la traversée clandestine de la ligne de démarcation, suivie de trois mois à Pamiers en Ariège, près du camp du Vernet, puis de trois mois à Marseille.

Enfin, grâce aux visas mexicains délivrés par le consul général du Mexique et à l'aide financière de la Ligue des écrivains américains, ils partent le 24 mars 1941 avec 250 autres réfugiés, sur un cargo, le *Capitaine Paul Lemerle*, pour la Martinique. Finalement, au bout de plus de trois mois, ils arrivent, admis comme réfugiés politiques, à Vera Cruz au Mexique.

C'est au lycée français de Mexico que Pierre fut scolarisé et obtint son baccalauréat scientifique (« math-élem ») en 1945 (fig. 2).

Marietta Blau, une ancienne de l'Institut du Radium de Vienne, exilée au Mexique, fut son enseignante pour la physique et la chimie. Citons Pierre Radvanyi : « Lors d'une de ses premières leçons, elle me montra sur son bureau une chambre d'ionisation et un morceau de minerai d'uranium ; je pus ainsi constater avec étonnement le

déplacement des feuilles d'or ; elle me dit alors : "C'est un effet de la radioactivité ; comme chez les êtres vivants, il y a des éléments chimiques qui naissent et qui meurent." Cette phrase m'impressionna durablement. »

Le président du jury du baccalauréat, l'ethnologue Paul Rivet, obtint pour Pierre une bourse pour faire, dès la fin de la guerre, ses études à Paris.

Mais sa mère préféra retourner en Allemagne, car « un écrivain ne peut pas vivre et travailler longtemps en dehors du pays où l'on parle sa langue natale. »

Muni des visas nécessaires, Pierre quitte donc sa famille en septembre 1945 et prend le train de Mexico à New-York. Un *Liberty Ship* le mène au Havre, à moitié détruit, où il arrive le 16 octobre.

Le lendemain, il arrive à la gare de Paris-Saint-Lazare. Pierre fit les démarches nécessaires pour sa bourse, mais il n'y avait personne pour le conseiller pour des études scientifiques. Il s'inscrit donc à la Faculté des Sciences de Paris. Intéressé par le phénomène de la radioactivité, il alla suivre par la suite le cours d'Irène Joliot-Curie à l'Institut du radium. C'est ainsi qu'il rejoignit plus tard (en 1948, comme stagiaire de recherche CNRS) le laboratoire de chimie nucléaire de Frédéric Joliot-Curie au Collège de France.

Pierre ne revit l'Allemagne qu'en 1951, donc dix-huit ans après son exil. Après le décès d'Anna Seghers en 1983, il s'engagea avec détermination pour faire connaître l'œuvre de sa mère, en particulier en publiant en français en 2014 le livre *Au-delà du fleuve*, avec Anna Seghers [3]. ■



2. Carte d'inscription de Pierre Radvanyi à l'Institut français d'Amérique latine à Mexico (juin 1945).



- 1• P. Radvanyi, « De Berlin à Orsay via Mexico », *Reflète de la physique* 55 (2017) 44-45.
- 2• A. Saint Sauveur-Henn, « Entretien avec Pierre Radvanyi », *Revue Europe*, juin-juillet 2000, pp. 202-205.
- 3• P. Radvanyi, *Au-delà du fleuve*, avec Anna Seghers, Éditions Le Temps des cerises (2014).

Pierre Radvanyi,

un scientifique sans cesse en quête de nouveaux horizons

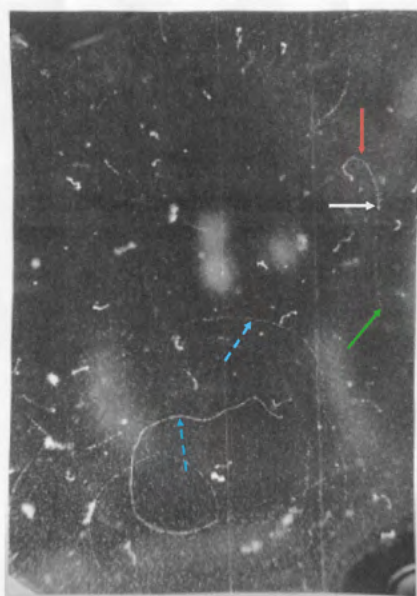
Thierry Hennino (thyag73@gmail.com)

Ancien directeur de recherche CNRS à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

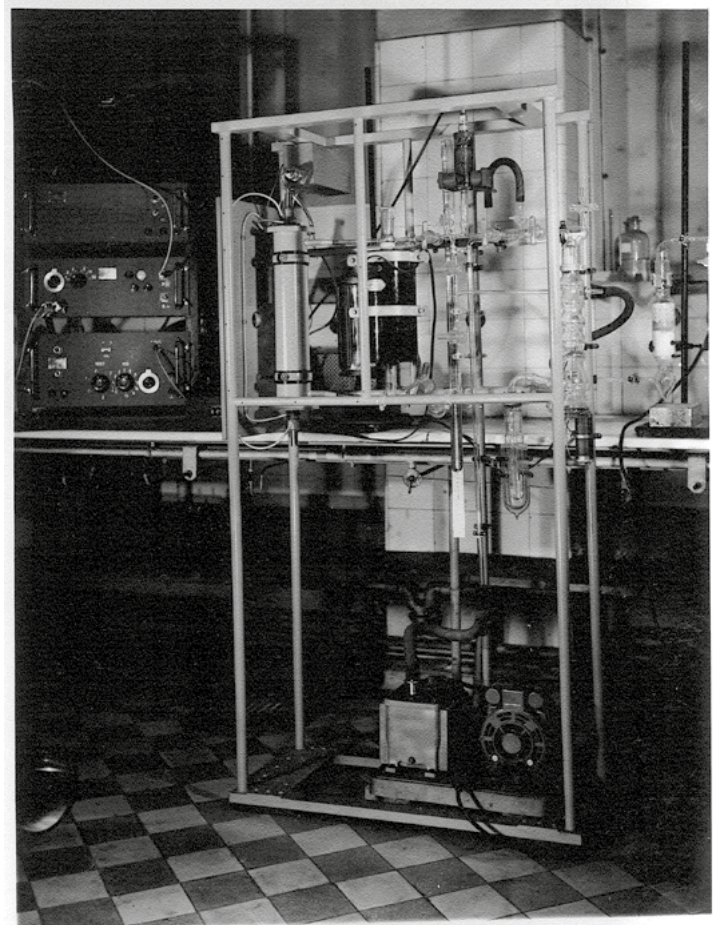
Pierre Radvanyi a joué un rôle majeur dans le développement de la physique nucléaire et de la physique hadronique en France. Sa carrière d'expérimentateur, qui s'est étendue sur près de cinquante ans, s'est effectuée dans quatre laboratoires : le Collège de France, l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, l'Accélérateur Linéaire de Saclay et le Laboratoire National Saturne. Elle a donné lieu à une centaine d'articles scientifiques.

Débuts au Collège de France (1948-1958)

Après l'obtention du baccalauréat en 1945, alors qu'il est réfugié au Mexique, Pierre Radvanyi, de retour en France grâce à une bourse des Affaires étrangères, s'inscrit à la faculté des sciences de Paris. Entré en janvier 1948 au laboratoire du professeur Frédéric Joliot, il obtient sa licence, entre au CNRS et entame sous la direction de Joliot une thèse qu'il soutient en 1954. Il y étudie une forme de radioactivité, la capture d'électrons orbitaux (absorption d'un électron du cortège atomique par un proton du noyau, accompagnée de l'émission d'un neutrino), dans le but d'obtenir des informations sur la structure du noyau ^{79}Kr . Il met alors au point une méthode originale utilisant une chambre de Wilson (fig. 1a), puis un compteur proportionnel à gaz (fig. 1b).



1a. Vue droite d'un cliché stéréoscopique pris par Pierre Radvanyi avec une chambre à brouillard (chambre de Wilson). On y distingue des trajectoires de positrons et d'électrons (flèches bleues). En haut à droite, un positron de haute énergie (flèche verte) projetée (flèche blanche) vers la gauche un électron de faible énergie (flèche rouge).



1b. Photographie de l'installation du compteur proportionnel.



Il étudie [...] les réactions de *pick-up*, où un proton incident capture un neutron du noyau cible, devenant ainsi un noyau de deutérium [...] qui emporte la quasi-totalité de l'énergie cinétique disponible et laisse le noyau cible [...] dans un état d'excitation relativement faible. Ces mesures vont révolutionner la connaissance des noyaux légers.



Recherches auprès du synchrocyclotron de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (1956-1975)

Alors que la décision de construire de nouveaux laboratoires sur le site de la faculté des sciences à Orsay et d'y implanter un synchrocyclotron à protons de 157 MeV vient d'être approuvée, Pierre Radvanyi décide de s'orienter vers l'étude des réactions nucléaires à moyenne énergie. Dans ce type de réaction, les temps d'interaction sont courts (quelques 10^{-23} s) par rapport aux périodes associées aux mouvements internes du noyau ; il devient alors possible d'interpréter la réaction d'une manière relativement simple.

Dès 1956, avec quelques expérimentateurs du Collège de France et de l'Institut du Radium et des théoriciens, Pierre participe activement à la définition des nouveaux outils expérimentaux. Installé à l'Institut de Physique Nucléaire (IPN) d'Orsay dès 1957, il constitue alors une équipe de recherches auprès du synchrocyclotron. Un groupe d'en moyenne six enseignants/chercheurs en constituera un noyau stable, qui perdurera jusqu'aux dernières expériences programmées sur l'accélérateur Saturne en 1997.

Pierre s'implique activement dans un nouvel outil, l'aimant Montpellier, dont la décision de construction a été obtenue récemment par Frédéric Joliot. Il réalise les mesures nécessaires pour en déterminer les caractéristiques et faire construire les premiers éléments de détection associés : des compteurs à scintillations pour la mesure précise des énergies des particules déviées par l'aimant et la détermination de leurs charge et masse.

Il étudie alors les réactions de *pick-up*, où un proton incident capture un neutron du noyau cible, devenant ainsi un noyau de deutérium (noyau composé d'une paire neutron-proton) qui emporte la quasi-totalité de l'énergie cinétique disponible et laisse le noyau cible (qui a donc perdu un neutron) dans un état d'excitation relativement faible. Ces mesures vont révolutionner la connaissance des noyaux légers. Par la mesure de la forme des distributions angulaires, on obtient directement des informations sur la fonction d'onde du neutron arraché. Les premiers niveaux des noyaux légers (du ${}^6\text{Li}$ au ${}^{40}\text{Ca}$) sont ainsi isolés, révélant une structure en couches des noyaux atomiques. Le modèle en couches fonctionne relativement bien pour les noyaux dont le nombre de protons ou de neutrons correspond à des valeurs magiques (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ...) pour lesquelles les noyaux sont particulièrement stables : le noyau apparaît ainsi un peu comme un oignon, avec des couches successives (quatre nucléons dans la première couche, puis huit dans la deuxième, et quatre dans la suivante)

Parallèlement à ses activités d'expérimentateur, Pierre enseigne dès 1958 au niveau du troisième cycle à Orsay les méthodes de mesure et de détection des rayonnements.

Il entreprend aussi une étude systématique de l'interaction nucléon-nucléon, afin d'en mettre en évidence les propriétés d'invariance sous la symétrie d'*isospin*. Le neutron et le proton ne sont que deux états d'une même entité, le nucléon, avec un *isospin* (nombre quantique relié à la charge) différent.

Au milieu des années 1970, Pierre souhaite réaliser des expériences plus sélectives en mesurant simultanément deux particules dans la voie finale, permettant ainsi la recherche de sous-structures. Certains modèles théoriques laissaient en effet entrevoir que des sous-structures α (noyau de l'hélium 4, celui-là même qui est émis lors de la radioactivité α des noyaux lourds) préexistent dans les noyaux. À cette occasion, Pierre et son équipe ont été pionniers en réalisant des expériences où l'on utilisait un ordinateur pour effectuer en ligne un tri sur les particules, évitant ainsi de saturer les mémoires électroniques, à l'époque assez limitées.

Sur l'ensemble des travaux réalisés sur le synchrocyclotron entre son démarrage et le milieu des années 1970, Pierre a dirigé plus d'une dizaine de diplômes, thèses de troisième cycle et d'État.

C'est au cours de cette période que Pierre Radvanyi prend une part active dans l'organisation de conférences internationales et de réunions scientifiques. Le Congrès international de physique nucléaire, organisé à Paris du 2 au 8 juillet 1964 et parrainé par l'UNESCO, sera le départ d'une longue série de manifestations scientifiques où Pierre montre ses exceptionnelles capacités d'organisateur et de rassembleur. Il œuvre notablement dans le cadre de la Société Française de Physique (voir l'article de M. Veyssié, p. 54) et de l'*European Physical Society*.

>>>

L'Accélérateur Linéaire de Saclay (ALS)

Vers 1968, les possibilités ouvertes par cet accélérateur ont commencé à titiller la curiosité de Pierre. En sus des électrons, sondes privilégiées pour l'étude des distributions de charge des noyaux, il y avait un faisceau de photons de freinage et des faisceaux de pions chargés.

S'il ne fallait retenir qu'une expérience emblématique de cette aventure, on devrait citer l'étude des noyaux de masse 3, via la réaction de photoproduction du pion : en étant absorbé, le photon incident transforme un proton en un neutron, en conduisant à l'émission d'un méson π chargé. L'équipe constituée par Pierre Radvanyi a réalisé un tour de force en combinant le faisceau de photons, une cible d'hélium 3 liquide construite par l'IPN d'Orsay et une chambre à fils (fig. 2) dont Pierre avait fait l'acquisition auprès de Georges Charpak. Le développement et la construction de chambres à fils allaient devenir une activité dans laquelle l'équipe s'est beaucoup investie par la suite et ce jusque dans un passé récent, avec la construction de chambres à fils multiplans installées sur le projet HADES, au centre de recherche sur les ions lourds GSI à Darmstadt, en Allemagne.

Le Laboratoire National Saturne (1977-1997)

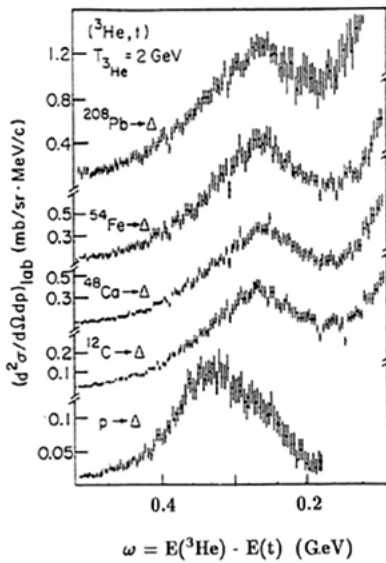
À partir de 1977, Pierre Radvanyi se tourne vers l'accélérateur Saturne, installé dans le Centre d'Études Nucléaires de Saclay. Créé en 1978, le Laboratoire National Saturne (LNS), objet d'un accord entre le CEA et le CNRS, s'appuyait sur une machine rénovée, à focalisation forte, plus adaptée aux besoins de la physique hadronique. Pierre a fait énormément, grâce à ses talents de négociateur et de rassembleur, à la fois exigeant, patient et respectueux. Il a été le premier directeur adjoint IN2P3 de Saturne, de sa date de création, 1978, jusqu'à 1985. Il a œuvré constamment pour offrir aux physiciens des postes expérimentaux de renommée mondiale, les spectromètres magnétiques SPES1 à SPES4, et des faisceaux de très grande qualité : particules polarisées selon leur *spin*, neutrons de haute énergie et même ions lourds.

Encouragé par les nouveaux horizons ouverts par la physique des mésons π – c'était la période où des faisceaux de pions quasi monochromatiques devenaient disponibles avec des intensités utiles (10^5 à 10^6 π/s) –, Pierre a rapidement compris l'intérêt de ce domaine. Dans un premier temps, il proposa d'étudier le premier état excité d'un nucléon dans une réaction d'échange de charge induite par l'impact de protons sur le ${}^6\text{Li}$. À l'aide d'un empilement de détecteurs semi-conducteurs, une distribution angulaire a pu être obtenue et interprétée, tandis que la décroissance de la résonance Δ (état excité du nucléon se désintégrant en un méson π et un nucléon) était identifiée sans ambiguïté.



2. Ensemble de détection installé dans le plan focal d'un spectromètre magnétique pour la détection des pions positifs π^+ . Derrière les scintillateurs, on distingue la chambre de 128 fils permettant de mesurer l'énergie des π^+ .

Au début des années 1980, Pierre met sur pied une collaboration qui se révélera extrêmement fructueuse, structurée autour de physiciens des instituts de physique nucléaire d'Orsay et de Lyon et du *Niels Bohr Institute* de Copenhague. Le programme d'étude des réactions d'échange de charge, qui s'étalera sur plus de quinze ans, démarrait. À l'origine, il s'agissait de chercher à comprendre un désaccord entre les spectres des excitations de *spin-isospin* (*spin-flip* simultané du *spin* et de l'*isospin* d'un nucléon) et les prédictions théoriques. Au-delà de ces excitations de basse énergie (< 50 MeV) dans le noyau, une gigantesque structure est apparue, centrée vers 280 MeV (fig. 3). Les nucléons constituant le noyau ne sont plus seulement promus dans des orbites nucléaires supérieures ; c'est le nucléon lui-même qui est excité sous la forme de la résonance Δ , d'une masse environ 300 MeV plus élevée que celle du nucléon (940 MeV). Cette résonance correspond au basculement du *spin* et de l'*isospin* d'un des quarks du nucléon (quark *down* en quark *up*, par exemple) et est très fortement couplée à son mode de désexcitation principal ($\Delta \rightarrow \pi + N$). Une nouvelle dynamique apparaît, où le pion



3. Spectre de l'énergie transférée au noyau par la réaction d'échange de charge. On note le décalage, de l'ordre de 70 MeV, entre le maximum de la structure résonnante sur l'hydrogène (spectre du bas) et celle observée sur les noyaux.

entre en résonance avec plusieurs nucléons, d'où le nom de « branche pionique » donnée à cette structure, que de nombreux théoriciens de par le monde se sont attelés à décrire.

Afin d'affiner la compréhension de cette dynamique π -nucléon- Δ , des expériences de mesure, en coïncidence, des produits de désexcitation de cette structure ont été entreprises. D'abord avec le détecteur DIOGENE, construit par le CEA, initialement dédié à l'étude des collisions entre ions lourds, que l'on coupla avec un spectromètre magnétique rudimentaire installé à 0° ; puis en associant un des grands spectromètres de Saturne, SPES4, à un aimant de très grande acceptance angulaire emprunté au CERN. C'est ainsi que le processus de pion cohérent, où le pion émis emporte sous forme d'énergie et de masse toute l'énergie transférée au noyau, a pu être mis en évidence de manière non ambiguë.

Là encore, les collaborations avec des laboratoires étrangers, auxquels s'étaient joints de nouveaux laboratoires (Gatchina et Dubna en Russie, IKF/Jülich en Allemagne), ont été essentielles, témoignant de la justesse des idées de Pierre. Ses critiques constructives et son soutien sans faille nous ont accompagnés jusqu'au bout.

Autres activités scientifiques de Pierre Radvanyi

En parallèle avec ses activités de physicien expérimentateur, Pierre a contribué au rayonnement de la physique nucléaire au sens large. Contribuant fortement à l'établissement de coopérations au sein du CNRS, comme chargé de mission à la direction des relations internationales, il a joué un rôle moteur dans la création des PICS (Programmes Internationaux de Coopération Scientifique) et des LEA (Laboratoires Européens Associés)

Son activité dans le domaine de la vulgarisation scientifique doit être aussi soulignée (voir l'article de Renaud Huynh page 56).

Les dernières expériences faites, après que son équipe se soit tournée vers le projet HADES au GSI à Darmstadt, Pierre est encore souvent venu discuter de la physique que nous faisons. Il est l'auteur d'une centaine de publications scientifiques.

L'aventure que Pierre Radvanyi a su conduire tout au long de sa carrière exceptionnelle nous a beaucoup apporté et a façonné notre activité de chercheur. Sa vision de la recherche, s'appuyant sur une équipe soudée, œuvrant au sein de collaborations internationales avec des compétences variées, a permis d'avoir un impact indiscutable sur les champs de recherche abordés. Pierre savait convaincre, toujours avec humanité, acceptant de discuter les idées de chacun. Il avait une mémoire fabuleuse, sans doute construite au fil des ans par les innombrables notes qu'il consignait dans ses cahiers (plus d'une cinquantaine, sur des sujets extrêmement variés), témoignant de son insatiable curiosité. Il avait un sens aigu des relations humaines, qu'il a su utiliser à bon escient toute sa vie au service de la science. ■

Je souhaite remercier pour leur aide à la rédaction de cet article et pour les différents documents fournis l'épouse de Pierre Radvanyi, les membres de son équipe et ses proches collaborateurs, ainsi que le Service communication et documentation de l'ICJLab, qui a souvent répondu avec grand zèle à mes demandes.

SÉLECTION DE PUBLICATIONS DE PIERRE RADVANYI

EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET HADRONIQUE

- P. Radvanyi, « Contribution à l'étude de la capture d'électrons orbitaux par les noyaux : Application à ^{86}Kr », Thèse de doctorat, Paris (juin 1954), *Annales de physique* **XII** 10 (1955) 584.
- D. Bachelier *et al.*, « Réaction (p, d) à 156 MeV et structure des noyaux légers », *Nucl. Phys. A* **126** (1969) 60-96.
- M. Bernas *et al.*, "Two-nucleon final-state interactions and the $^4\text{He}(p, t)2p$, $^4\text{He}(p, ^3\text{He})pn$ and $^4\text{He}(p, d)^3\text{He}$ reactions at 156 MeV", *Nucl. Phys. A* **156** (1970) 289-304.
- D. Bachelier *et al.*, "Quasi-free (p, pa) scattering on ^6Li , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{40}Ca , ^{140}Ce and ^{232}Th at 156 MeV", *Phys. Rev C* **7** (1973) 165.
- D. Bachelier *et al.*, "Coherent π^+ photoproduction on ^3He in the region of the Δ_{1236} resonance", *Nucl. Phys. A* **251** (1975) 433-445.
- C. Ellegaard *et al.*, " $(^3\text{He}, t)$ reaction at intermediate energies", *Phys. Rev. Lett.* **50** (1983) 1745.
- C. Ellegaard *et al.*, "Spin structure of the Δ excitation", *Phys. Lett. B* **231** (1989) 365-369.
- T. Hennino *et al.*, "Study of decay and absorption of the Δ resonance in nuclei with a 4π detector", *Phys. Lett. B* **283** (1992) 42-46.
- P. Radvanyi, « L'accélérateur Saturne et son programme expérimental », *Courrier du CNRS* **54** (1984) 19.

Pierre Radvanyi à la Société Française de Physique

Madeleine Veysié (madv@orange.fr)

Ancienne secrétaire générale de la Société Française de Physique (1985-1990)

Adhérent depuis 1953, Pierre Radvanyi a joué un rôle très important dans la direction de la Société Française de Physique : membre du bureau de 1968 à 1975, secrétaire général de 1975 à 1980, rédacteur en chef du Bulletin de la SFP de 1969 à 1997, membre invité du bureau jusqu'en 2017.

Sous sa présidence en 1978, Bernard Dreyfus, m'avait fait entrer au Conseil de la Société Française de Physique, en même temps que Micheline Nauciel, dans le but louable de rajeunir et féminiser cette vénérable institution. C'est ainsi qu'un beau samedi matin j'ai rencontré, au 33 rue Croulebarbe, au milieu de physiciens de toutes les disciplines et venus de toute la France, un géant débonnaire dont les yeux brillaient de malice sous les sourcils épais, et qui s'exprimait avec une voix d'une étonnante douceur. C'était Pierre Radvanyi, à l'époque secrétaire général, celui qui savait tout sur tout et sur tout le monde dans notre petit milieu.

Quelques années plus tard, avec la patiente bienveillance qui lui était propre, il a guidé mes premiers pas quand j'ai moi-même accédé au secrétariat général. Il était rédacteur en chef du *Bulletin de la SFP* depuis 1969, fonction qu'il assumera jusqu'en 1997 avec un plaisir et un enthousiasme qui ne se sont jamais démentis. Il est d'ailleurs intéressant pour l'histoire de la SFP et de son journal de l'entendre parler de la façon dont il avait débuté dans cette fonction, qu'il a relatée dans le numéro 22 de *Reflets de la Physique* en ces termes : « Jusque-là je n'avais organisé que des congrès en physique nucléaire et n'avais que peu d'expérience de la diversité de la Société Française de Physique, lorsque, au printemps 1969, Francis Netter, le secrétaire général d'alors, appuyé par André Herpin, le précédent secrétaire général, me demanda de prendre en charge l'édition d'un nouveau *Bulletin de la SFP* (un « vrai » bulletin, dirent-ils, à l'instar des sociétés sœurs anglo-saxonnes). Ce travail de rédacteur en chef était tout nouveau pour moi ; je ne me doutais pas alors du nombre de bulletins (108) pour lesquels j'aurais à exercer cette tâche. Il n'existait à cette époque qu'un modeste bulletin d'information de taille réduite, à couverture vert clair. Une réunion se tint alors à Orsay à laquelle participèrent aussi André Guinier et André Berthelot, Président de la Société. Il fut décidé de

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE
44, Rue de Rennes - PARIS (VI^e)

Nom : Radvanyi
Prénoms : Pierre
Nationalité : _____
Qualités : Licencié en Sciences Attaché de Recherches au CNRS, Laboratoire de Chimie Nucléaire du Collège de France
Date de l'admission : 20.2.53
Parrains : M. Vigneron
Charrel
Adresse : 3 Rue d'Alleray Paris XV

Carte d'adhésion de Pierre Radvanyi à la SFP, en 1953.

publier 3 à 4 numéros par an, au format A4, en utilisant largement le « bleu SFP ». Le nouveau bulletin devait rendre compte des différentes activités de la Société et faire connaître ses principales manifestations, assemblées générales et remises des prix, en publiant les textes des conférences prononcées à ces occasions. Les éditoriaux seraient demandés aux Présidents en exercice de la SFP et le Bureau apporterait toute son aide [...]. Notre premier numéro (*Bulletin de la SFP* n° 1, Nouvelle Série) parut à l'automne 1969 avec un éditorial d'André Berthelot. »

Cette fonction faisait que Pierre était fréquemment présent au siège de la rue Croulebarbe et j'ai beaucoup appris de lui. Par exemple, qu'il fallait sans cesse se battre et inventer de nouvelles actions afin d'augmenter nos effectifs, si maigres comparés aux dizaines de milliers d'adhérents de nos analogues britanniques et allemands. Seule en effet une SFP puissante, efficace et unie peut assurer l'illustration et la défense de notre discipline, en général mal aimée et mal comprise par le grand public et trop souvent, aussi, par les responsables politiques qui ont tendance à nous trouver à la fois chers et inutiles. C'est dans cette même logique que Pierre faisait tout pour freiner une tendance à la sécession de certaines spécialités (comme l'optique ou la biophysique) et pour maintenir l'unité de la physique, les interactions entre différents domaines de la physique étant très fécondes. Il mettait aussi en œuvre son art diplomatique, qui était grand, pour éviter, au sein même de la SFP, les tensions et rivalités entre laboratoires ou sous-disciplines ; par exemple, je crois me souvenir d'une guerre picrocholine entre plasmas chauds et plasmas froids qui l'avait désolé, tout en le faisant par moments mourir de rire. En revanche, il savait se montrer intransigeant quant à la totale indépendance d'esprit à assurer vis-à-vis des grands organismes et des pouvoirs publics.

Outre ces précieuses rencontres informelles, nous nous retrouvions à l'occasion des événements notoires qui rythmaient la vie de notre communauté : assemblée annuelle, congrès généraux tous les deux ans dans une ville universitaire. Tous les deux ans aussi, à Paris, l'Exposition de physique, fort populaire à cette période car, avant l'invention d'Internet et l'apparition dans les années 1990 de salons concurrents plus spécialisés, c'était un lieu de prédilection pour comparer et choisir des appareillages. Mais, comme les ministres concernés n'en dédaignaient pas l'inauguration, c'était aussi une occasion pour exprimer les souhaits de notre discipline ou, plus souvent, ses craintes en période de vaches maigres.

Autre circonstance mémorable, la remise du prix franco-britannique, créé en mémoire du physicien Fernand Holweck, résistant exécuté à Paris en 1941. Un an sur deux, quand le lauréat était français, elle se tenait au Royaume-Uni avec un cérémonial très *british* organisé avec faste par nos amis de l'*Institute of Physics* (ce qui n'empêchait pas Pierre, le reste du temps, de fulminer contre la concurrence féroce que faisait l'IOP aux publications françaises que la SFP s'efforçait de maintenir).

Par la suite, Pierre avait été très actif dans la création, en 1984, sur le même modèle, d'un prix binational franco-germanique. Cette distinction associait au nom d'Alfred Kastler, prix Nobel et grand humaniste, celui de Wolfgang Gentner, ancien élève de Marie Curie puis attaché au laboratoire des Joliot. Physicien nucléaire lui-même et féru d'histoire, Pierre a pu témoigner que ce savant avait été un antinazi convaincu : affecté en 1940 à une équipe chapeauté par la Wehrmacht pour contrôler la recherche nucléaire en France, il en avait profité pour sauver des

collègues menacés, notamment Joliot et Langevin. Très belle histoire, donc, de science et de conscience, même s'il faut reconnaître que les réceptions organisées par la *Deutsche Physikalische Gesellschaft* étaient beaucoup moins somptueuses que celles des Britanniques.

Un autre souvenir très fort et tout particulier est celui du Conseil de la Société européenne de physique (EPS) à Berlin, qui réunissait les responsables des différentes sociétés nationales avec des enjeux considérables pour les politiques scientifiques communes à venir. Un soir, Pierre nous a prévenu qu'il ne dînerait pas avec nous car il devait aller voir des proches à Berlin-Est. C'est ainsi que j'ai appris des autres membres de la délégation qu'il était le fils d'Anna Seghers, la célèbre écrivaine dont le livre *La septième croix* m'avait tant émue. À cette époque, Pierre était d'une grande discrétion sur sa jeunesse mouvementée ; plus tard, il se racontera, notamment en 2014 dans le livre *Au-delà du fleuve*, avec Anna Seghers publié à la maison d'édition *Le temps des cerises*, ainsi qu'en 2017 dans *Reflets de la Physique* (n°55, pp. 44-45), et dans son témoignage pour le Musée national de l'histoire de l'immigration.

Homme de paix, homme d'apaisement, témoin d'un passé douloureux, mais image même de l'optimisme en action, Pierre Radvanyi était pour nous tous à la fois une légende des temps héroïques et un exemple pour les temps futurs dont nous étions sûrs qu'ils iraient, comme la science, de progrès en progrès. Sa perte nous a plongé dans une infinie tristesse. ■



Couverture du numéro 79 (janvier 1991) du *Bulletin de la SFP*, dont l'édition, comme celle de cent-sept autres numéros, a été coordonnée par Pierre Radvanyi.

Pierre Radvanyi et la diffusion de la culture scientifique

Renaud Huynh (renaud.huynh@curie.fr)

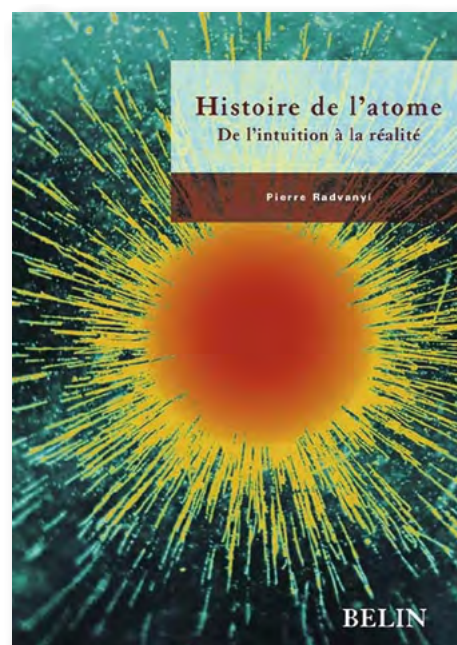
Directeur du Musée Curie, UAR 6425 CNRS/Institut Curie, 11 rue Pierre et Marie Curie, 75005 Paris

Cet article porte sur l'apport de Pierre Radvanyi à la diffusion de la culture scientifique, à travers ses publications et ses actions en faveur de l'histoire de la physique et de la mémoire des Curie et des Joliot-Curie.

Parmi les grands physiciens, certains se distinguent par leur capacité à mettre leurs connaissances scientifiques à la portée de tous ; Pierre Radvanyi était de ceux-là. Indépendamment de son activité de chercheur, Pierre Radvanyi s'est en effet illustré par son engagement en faveur de la préservation et de la transmission de la mémoire des scientifiques, celle des Curie et des Joliot-Curie, mais plus largement celle de l'histoire de la physique et des grandes découvertes autour de l'atome.

Son approche rigoureuse de directeur de recherche, enrichie par son parcours personnel très riche et sa culture générale très étendue, s'est montrée particulièrement utile pour compléter le regard des historiens sur l'histoire de la physique. En contextualisant les découvertes, il a proposé une vision internationale de la science et un point de vue qui ouvre des perspectives sur la compréhension des travaux scientifiques dans un cadre plus large.

Spécialiste de l'histoire scientifique et sociale de la radioactivité, c'est un véritable travail d'historien des sciences qu'il a réalisé, en publiant de nombreux articles et des ouvrages à destination de tous les publics, du scientifique averti au simple curieux. Les textes de Pierre Radvanyi sont clairs et précis, les informations que l'on trouve dans ses publications sont vérifiées et abordent à la fois les relations scientifiques internationales et les aspects sociaux de l'histoire de la physique, depuis l'atome de Démocrite jusqu'aux enjeux de la physique du 21^e siècle. Son ouvrage *Histoire de l'atome*, publié chez Belin en 2007, regroupe ainsi un ensemble de textes qui illustrent l'étendue de son savoir sur l'atome, depuis les Grecs anciens jusqu'aux progrès expérimentaux et théoriques des recherches récentes les plus avancées. Parmi les grandes découvertes scientifiques, celle de la radioactivité artificielle par Frédéric et Irène Joliot-Curie a été particulièrement étudiée par Pierre Radvanyi, qui avait été recruté par Irène Joliot-Curie à l'Institut du radium et avait suivi les cours de son époux au Collège de France. Son attachement aux Joliot-Curie, à



leurs réalisations et à leurs engagements, l'a conduit à assumer le rôle de secrétaire général de l'association qui porte leur nom, l'Association Frédéric et Irène Joliot-Curie, après Hubert Curien, Pierre-Gilles de Gennes ou encore Georges Charpak. Lorsqu'il fut question dans les années 1960 d'aménager un espace d'exposition à l'entrée du Laboratoire Curie de l'Institut du radium pour évoquer les découvertes majeures qui s'y sont déroulées, Pierre Radvanyi a participé au choix des archives et des objets à présenter, et a contribué à la création des vitrines et d'un petit parcours de visite.

Au-delà des événements et des expositions qu'il a organisés, des conférences qu'il a animées avec beaucoup d'enthousiasme et de pédagogie, Pierre Radvanyi a publié des ouvrages de référence, dont *La radioactivité artificielle*



et son histoire avec Monique Bordry (Belin, 1984), ou encore *Les rayonnements nucléaires* dans la célèbre collection *Que sais-je ?* (PUF, 1995). Précis, rigoureux et concis, soucieux d'utiliser les mots justes, Pierre Radvanyi s'est illustré par la qualité de sa rédaction et sa grande maîtrise de la langue de Molière, au profit d'un savoir accessible au plus grand nombre. Dans *Histoire d'atomes* (Belin, 1988), il imagine avec sa complice Monique Bordry, des échanges et des dialogues entre des scientifiques et des skieurs dans un refuge de montagne pour restituer une histoire de la physique nucléaire à la fois ludique et instructive. Son livre *Les Curie, pionniers de l'atome* (Belin, 2005) est rapidement devenu une référence : c'est le seul ouvrage qui réunit deux générations de scientifiques avec autant de détails et de précisions sur le contexte historique et social dans lequel les Curie et les Joliot-Curie ont évolué et sur leurs réalisations.

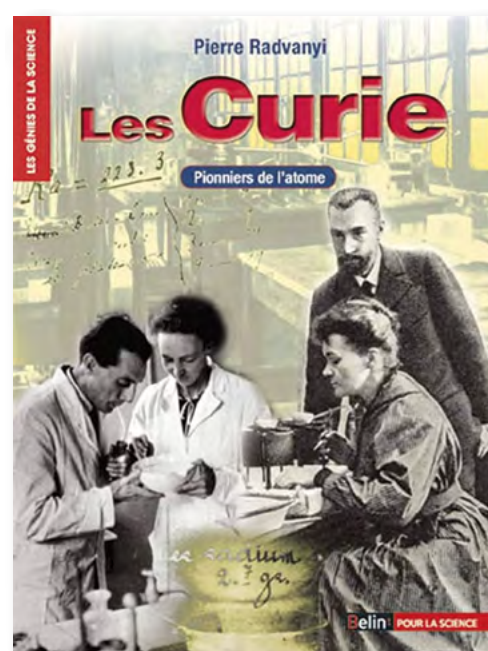
Le début des années 1990 a marqué un tournant dans le parcours de Pierre Radvanyi, à la fois chargé de mission à la direction des relations internationales du CNRS et secrétaire général de l'association Irène et Frédéric Joliot-Curie, dont il a initié de la révision des statuts en 1993. Elle est ainsi devenue l'Association Curie et Joliot-Curie. Il a proposé également de créer une Unité mixte de service entre le CNRS et l'Institut Curie, l'UMS 6425 « Musée et archives de l'Institut du radium : Pierre et Marie Curie, Irène et Frédéric Joliot-Curie », qui a vu le jour en juin 1994. Cette unité est aujourd'hui plus connue sous le nom de Musée Curie.

Les contributions de Pierre Radvanyi ont été nombreuses dans le domaine de la diffusion de la culture scientifique, avant même que l'on commence à utiliser le terme de médiation scientifique. Armé d'une grande patience et de pédagogie, Pierre Radvanyi a formé plusieurs générations

de guides conférenciers du Musée Curie, en expliquant inlassablement le fonctionnement parfois complexe des appareils exposés dans les vitrines. Toujours bienveillant et soucieux de transmettre avec précision les connaissances qu'il réunissait depuis des années, il connaissait parfaitement le fonctionnement de l'électromètre qui a servi aux recherches sur les neutrons, et savait expliquer comment Frédéric Joliot avait réussi à prouver la fission nucléaire dès sa découverte avec une expérience très simple. Pierre Radvanyi savait décrypter les mystères des clichés de la chambre à brouillard de Wilson et interpréter les trajectoires des particules, qui n'avaient plus de secrets pour lui. À noter qu'il avait lui-même utilisé l'un de ces appareils dans le cadre de ses premières recherches à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay : cet instrument est conservé à l'IJCLab.

Chaque commémoration était une occasion de rappeler les grands moments qui ont conduit au développement des connaissances scientifiques. Ainsi, lors du centenaire de la découverte de la radioactivité naturelle en 1996, celui de la naissance d'Irène Curie en 1997 ou de celle de Frédéric Joliot en 2000, Pierre Radvanyi a été en première ligne à la fois pour organiser les événements et pour animer des conférences, tables rondes ou rencontres avec le public.

Pierre Radvanyi était discret, cultivé et courtois, toujours disponible, et il a guidé et inspiré de nombreuses personnes qui ont pu échanger avec lui. C'était lui-même un savant qui a contribué à un chapitre de l'histoire de la physique, un témoin de son temps, par son parcours professionnel, sa carrière au CNRS, par son investissement en faveur de la préservation et de la diffusion de la mémoire des Curie et des Joliot-Curie. Par son itinéraire personnel, aussi, de Berlin à Paris, puis de Mexico à Orsay, la vie de Pierre Radvanyi inspire le respect et la considération. ■



Joseph Pérès (1890-1962)

Mathématicien, mécanicien, dans son siècle

François Charru (francois.charru@toulouse-inp.fr),

CNRS - Université de Toulouse, Institut de mécanique des fluides de Toulouse, 2 allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse

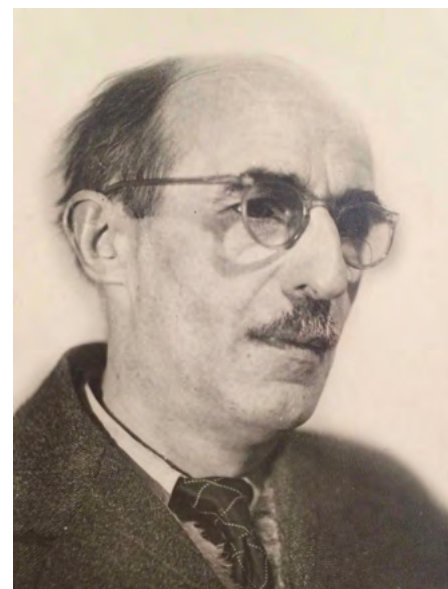
Joseph Pérès, mathématicien et mécanicien, a marqué de son empreinte un demi-siècle de la vie scientifique et institutionnelle française. Cet article retrace son œuvre et son héritage en les inscrivant dans leur contexte historique et culturel.

Le demi-siècle courant de 1910 à 1960 fut le théâtre de profondes évolutions de la société française. Les années 1910 – avant la guerre – s'inscrivent encore dans le mouvement de renaissance des universités engagé par la III^e République, associé à un essor vigoureux des sciences appliquées dans les facultés des sciences, dans le contexte d'une fervente foi collective dans le « Progrès ». Un demi-siècle plus tard, la France gaullienne des années 1960 apparaît comme un second âge d'or – la recherche scientifique devenue une « ardente obligation » nationale – contemporain d'une « massification » de l'enseignement supérieur. Dans l'intervalle, la France aura subi les ravages de deux guerres mondiales, elles-mêmes encadrant une période troublée – difficultés économiques, tensions internationales – qui voit par ailleurs, en 1939, la création du CNRS. Dans ce demi-siècle contrasté, Joseph Pérès se présente comme l'une des figures universitaires les plus remarquables. Acteur majeur, à Marseille puis à Paris, d'un ambitieux plan national en faveur de la mécanique des fluides, élu à l'Académie des sciences en 1941, Pérès est le premier président, après la guerre, de l'Union internationale de mécanique théorique et appliquée. Il participe à la fondation, en 1946, de l'Office national des études et recherches aéronautiques (ONERA). Nommé directeur-adjoint du CNRS, il y

promeut le calcul scientifique et prend la direction du premier institut dédié, matrice des futurs laboratoires français d'informatique et de mathématiques appliquées. Élu doyen de la faculté des sciences de Paris en 1954, il obtient la création de deux nouveaux campus à Paris et à Orsay. Homme de grande culture enfin, il participe à l'institutionnalisation de l'histoire et de la philosophie des sciences. Le présent article retrace l'itinéraire de cette personnalité exceptionnelle dont l'action et l'œuvre ont su répondre aux grandes questions de son temps.

Des mathématiques à la mécanique

Né le 31 octobre 1890 à Clermont-Ferrand, où son père enseigne la philosophie, Joseph Pérès entre à l'École normale supérieure en 1907 et obtient l'agrégation de mathématiques en 1911. Il s'engage alors dans la préparation d'une thèse sous le patronage d'Émile Borel sur la théorie des fonctions. Sa rencontre avec le mathématicien italien Vito Volterra, à l'occasion d'un séjour de ce dernier à Paris, le conduit à Rome pour une année. De retour à Paris, il soutient sa thèse en 1915. Ses travaux font l'objet de plusieurs publications avec Volterra. Il entretiendra par la suite une profonde amitié avec lui. Exempté de service militaire pour raisons de santé – il échappe ainsi aux combats



1. Joseph Pérès vers 1950
(Archives de l'Académie des sciences).

où périssent la moitié de ses compagnons de l'ENS – il débute sa carrière comme professeur au lycée de Montpellier.

En janvier 1919, Pérès obtient une maîtrise de conférences à la faculté des sciences de Toulouse puis, en octobre de la même année, à la faculté de Strasbourg. Deux ans plus tard, il quitte Strasbourg pour la chaire de mécanique rationnelle et appliquée de la faculté de Marseille. Il y engage ses premiers travaux de mécanique, notamment sur les chocs avec frottement.

2. Pérès dans sa maison de vacances de Bandol, dans le Var, avec Malavard, en 1933

(Archives de l'Académie des sciences).



En 1930, Pérès est nommé directeur d'un nouvel institut de mécanique des fluides à Marseille, où il découvre l'aéronautique. L'aviation, née dans les premières années du 20^e siècle, a connu en France un brillant et fulgurant essor. Un institut aérotechnique et une chaire d'aviation ont été créés en 1910 à la faculté des sciences de Paris, fondés par les industriels Basil Zaharoff et Henry Deutsch de la Meurthe, avec l'appui du mathématicien Paul Painlevé, député et ardent prosélyte de l'aviation. En 1923, une chaire de mécanique des fluides et applications est fondée par le secrétariat d'État à l'Aéronautique et au Transport aérien, attribuée à Painlevé. Ces initiatives ne parviennent cependant pas à enrayer le déclin de l'aéronautique française, qui peine à s'organiser en véritable industrie. Afin de redresser la situation, un ministère de l'Air est créé en 1928, dont la direction générale technique est confiée à Albert Caquot, ingénieur polytechnicien d'envergure. Celui-ci, doté de puissants moyens, décide en particulier de la fondation de quatre instituts de mécanique des fluides dans les facultés de Paris, Lille, Marseille et Toulouse et de centres annexes d'enseignement dans cinq autres villes (Charru 2021).

À l'institut de mécanique de fluides de Marseille, installé sur la Canebière, Pérès est assisté par un chef des travaux, Jacques Valensi, ingénieur centralien, spécialiste

de l'aérodynamique des hélices, et par un assistant, Lucien Malavard, étudiant de licence (figure 2). Les premiers travaux de Pérès portent sur la théorie des tourbillons et sur la force exercée par un écoulement sur un obstacle, dont les résultats sont

présentés au troisième Congrès international de mécanique appliquée (ICAM) en 1930, à Stockholm. Mais c'est vers le thème des analogies entre hydrodynamique et électricité que Pérès, avec Malavard, va orienter ses travaux et bâtir sa notoriété.

>>>



- F. Charru, *Ailes, Nuages et Tourbillons. La Mécanique des Fluides en France de 1900 à 1950 - Une Politique Nationale*. Birkhäuser, Springer, Basel (2021).
- F. Charru, "Joseph Pérès (1890-1962): mathematician, mechanicist, at one with his century", *Arch. History Exact Sci.* **80** (2026) 1-50.
- P. Costabel, « Joseph Pérès (1890-1962) », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* **15**(2) (1962) 167-169.
- P. Germain, « Joseph Pérès et le renouveau de la mécanique en France », Académie des sciences de Paris, Paris (1977) 1-21.
- D. Guthleben, *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours*, Armand Colin, Paris (2013).
- P.-E. Mounier-Kuhn, *L'informatique en France de la Seconde Guerre mondiale au Plan Calcul*, Presses de l'université Paris-Sorbonne, Paris (2010).
- J. Pérès et L. Malavard, « La méthode d'analogies rhéographiques et rhéométriques », *Bulletin de la Société française des Électriciens* **92** (1938) 1-30.
- J. Pérès et L. Malavard, « Application du calcul expérimental rhéoélectrique à la solution de quelques problèmes d'élasticité », *J. Math. Pures Appl.* 9^e sér. **20** (1941) 363-426.
- V. Volterra et J. Pérès, *Leçons sur la Composition et les Fonctions Permutables*, Gauthier-Villars, Paris (1924), rééd. J. Gabay (2008).
- J.E. Wesfreid, "Scientific biography of Henri Bénard (1874-1939)", in I. Mutabazi, J.E. Wesfreid, E. Guyon (eds.) *Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures. Henri Bénard Centenary Review*, Springer, New-York (2006) 9-37.

>>>

L'analogie électrique, identifiée par Gustav Kirchhoff dès 1845, est fondée sur le fait que la même équation de Laplace gouverne le potentiel électrique dans un milieu conducteur et le potentiel des vitesses dans un écoulement irrotationnel. Une image des lignes de courant d'un écoulement peut ainsi être obtenue par la détermination des lignes de courant électrique dans un montage approprié (figure 3). La figure 4 en donne une illustration. La distribution de pression sur un obstacle placé dans l'écoulement, et donc la force résultante, en sont déduites.

Au-delà de la configuration élémentaire décrite ci-dessus, la technique connaît de nombreux développements permettant de résoudre des problèmes d'hydrodynamique très divers. Elle permet notamment de résoudre le problème, tridimensionnel, de la distribution de circulation de la vitesse autour d'une aile d'envergure finie. Dans le plan de l'écoulement secondaire normal à l'écoulement principal, l'aile se présente comme une condition aux limites correspondant à une équation intégrodifférentielle établie par Ludwig Prandtl. La réalisation de cette condition par un arrangement de résistances électriques permet d'obtenir la distribution de la circulation, proportionnelle à la force de portance locale (Pérès & Malavard 1938).

L'institut de mécanique de Paris

L'institut de Paris avant Pérès

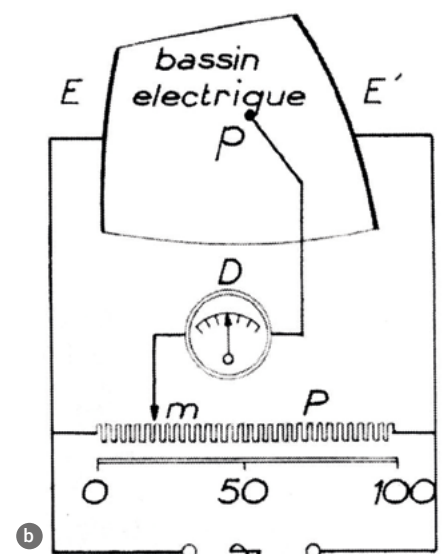
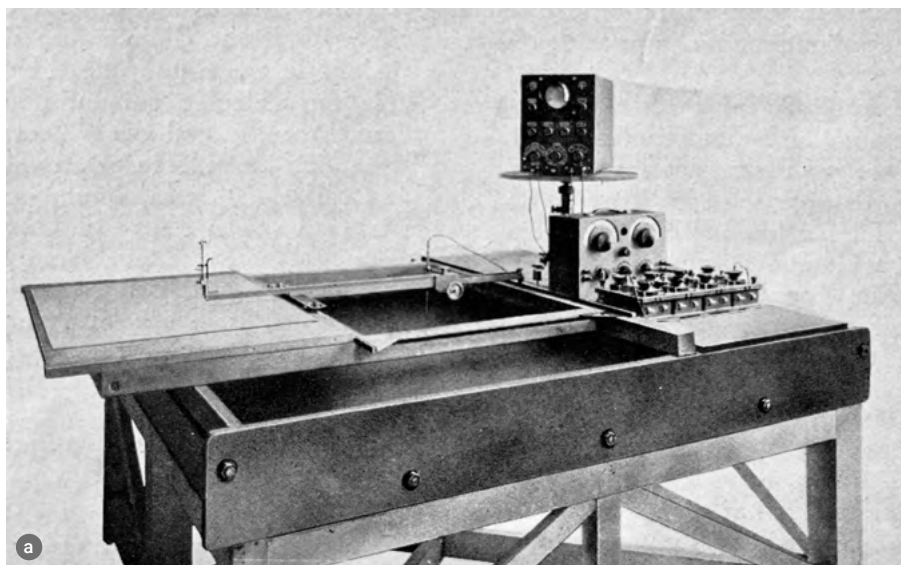
En mai 1932, Pérès quitte Marseille pour un poste de maître de conférences vacant à l'institut de mécanique des fluides de Paris. Il renonce ainsi à un poste de professeur en province pour une carrière parisienne plus prometteuse – situation qui n'a alors rien d'exceptionnel ; un titre de professeur sans chaire lui est attribué six mois plus tard.

L'institut de mécanique des fluides de Paris, créé en 1929, comportait initialement trois chaires : mécanique des fluides théorique, mécanique des fluides expérimentale et aviation. Une quatrième chaire, de mécanique physique, lui est rattachée en 1932. L'institut de mécanique (sa nouvelle dénomination) est alors l'une des plus importantes structures de recherche parisiennes : il comprend 19 personnels de recherche, dont 12 boursiers du ministère de l'Air, et représente 11% de la faculté des sciences. L'institut est réputé notamment pour ses séminaires organisés par Dimitri Riabouchinsky, ingénieur russe émigré et directeur-adjoint de l'institut.

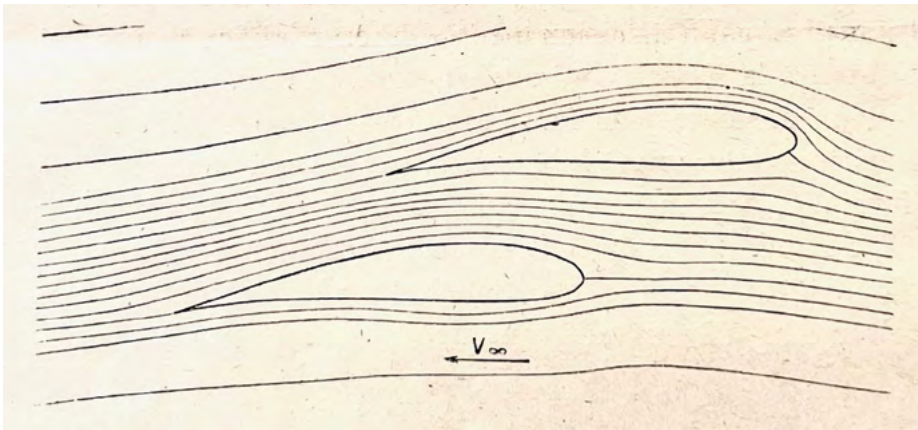
La chaire de mécanique théorique correspond à celle qui avait été créée en 1923 pour Painlevé ; celui-ci en a démissionné

en 1927 et elle est alors occupée par le mathématicien Henri Villat, qui dirige l'institut. Villat est un expert de l'étude des écoulements plans non visqueux autour d'obstacles, dont le sillage (région tourbillonnaire à l'aval) est représenté par un volume de fluide « mort » limité par des surfaces de discontinuité de la vitesse. Cette représentation, introduite dans les années 1870 par Helmholtz, résout d'une certaine manière le cuisant « paradoxe de d'Alembert » de nullité de la force de trainée. Elle présente cependant des limitations alors bien connues (sous-estimation de la trainée d'un facteur deux à trois, en particulier) et ignore les progrès apportés tant par la théorie de la couche limite de Prandtl que par les premières modélisations de la turbulence. Mais Villat, chantre des solutions exactes, considère que ces nouvelles théories sont fondées sur des approximations impropres qui « ne peuvent satisfaire le logicien pur » ; il les ignorera jusqu'à la fin de sa longue carrière, et, fort de ses positions de pouvoir, entravera même les recherches plus modernes.

La seconde chaire, fondée par le ministère de l'Air, est occupée par le physicien Henri Bénard, assisté par Adrien Foch. Dans des locaux cédés par le ministère de l'Air, rue de la porte d'Issy, Bénard poursuit, avec de nombreux étudiants en thèse, les recherches



3. (a) Installation générale comprenant générateur de courant basse-fréquence, pont potentiométrique, oscilloscope, et dispositif articulé de tracé des lignes de courant (Malavard 1938).
 (b) La différence de potentiel établie entre les parois conductrices de la cuve rhéologique engendre un courant électrique ; le potentiel en un point p de la cuve correspond à celui imposé en m lorsque le courant traversant le galvanomètre s'annule ; le déplacement de la pointe permet de suivre la ligne isopotentielle.



4. Lignes de courant de l'écoulement autour d'un biplan (Pérès & Malavard 1938).

engagées pendant sa thèse et poursuivies à Lyon et Bordeaux, qui ont fait sa réputation internationale : la thermoconvection dans une couche de fluide chauffée par le bas, et les tourbillons de sillage (Wesfreid, 2006). À Paris, Bénard a élargi ses investigations à la thermoconvection en présence d'écoulement, à l'électroconvection, et à la formation des structures nuageuses – cette dernière thématique conduite dans le cadre de la Commission de la turbulence atmosphérique créée en 1935 par le ministère de l'Air et l'Office national météorologique. Bénard, bien introduit dans la communauté internationale, est un participant régulier des Congrès internationaux de mécanique appliquée (ICAM). Adrien Foch, de son côté, mène des recherches sur les écoulements compressibles et les ondes de chocs, et sur la physique des fluides.

Le laboratoire des analogies électriques

Maitre de conférences associé à la chaire de Villat, Pérès poursuit ses recherches sur les analogies électriques, avec Malavard qui l'a suivi. En dépit de l'exiguïté de ses locaux, objet de plaintes récurrentes – une pièce cédée par Bénard, puis deux autres – le laboratoire se développe fortement et attire un nombre croissant d'industriels de l'aéronautique (Latécoère, Morane-Saulnier, Dewoitine, Bloch, etc.). Le « calculateur d'ailes », qui fournit des prédictions rapides et précises, se montre bien plus avantageux que les longs et coûteux essais en soufflerie.

Les problèmes étudiés, gouvernés par des équations de type elliptique de plus en plus générales, se diversifient : écoulements avec sillages, autour d'obstacles multiples, axisymétriques, milieux poreux, hydrodynamique marine. Ils portent bientôt sur

l'élasticité (torsion et flexion de poutres, distribution des contraintes dans des structures complexes), sur le génie électrique et sur des questions d'optique électronique. Le laboratoire reçoit des subventions du Centre national de la recherche scientifique appliquée (CNRSA, créé en 1938) avec un fort soutien d'Yves Rocard, conseiller du ministère de l'Air. Pérès collabore par ailleurs avec Bénard, avec lequel il coencadre des thèses. Consécration de ses travaux, Pérès est invité à donner une conférence plénière au cinquième ICAM, en 1938 à Cambridge (Massachusetts).

Période de la guerre

En mai 1940, l'invasion allemande entraîne le repliement à Toulouse de l'institut de mécanique, avec ses personnels et leurs familles, dans le cadre d'un plan de « mobilisation scientifique » organisé par le CNRSA. L'armistice, un mois plus tard, autorise ces personnels à regagner Paris. Pérès et Malavard y retrouvent leur laboratoire dévasté et occupé par les Allemands. Ils parviennent à reprendre une activité scientifique dans un sous-sol de l'École normale supérieure prêté par Georges Bruhat, activité semi-clandestine mais qui reste subventionnée par le CNRS vichiste de Charles Jacob. Deux futures grandes figures de la mécanique parisienne rejoignent le laboratoire : Raymond Siestrunck, qui y entreprend une thèse sur les écoulements hélicoïdaux (hélices, turbomachines), et Paul Germain qui, après la guerre, orientera ses travaux vers l'aérodynamique supersonique. Tous deux soutiendront leur thèse en 1949 – et Siestrunck épousera une fille de Pérès.

La mécanique dans l'après-guerre

Le programme de développement de la mécanique des fluides mis en place par le ministère de l'Air avait stimulé, dans les années 1930, la poursuite d'activités en cours (Henri Bénard à Paris, Charles Camichel à Toulouse) ainsi que l'émergence de nouveaux champs de recherche comme la turbulence, la mécanique de l'atmosphère (Joseph Kampé de Fériet à Lille) et le calcul scientifique analogique (Pérès et Malavard). Ces succès pâlisent dans l'après-guerre du fait, en particulier, du décès ou du retrait de personnalités scientifiques majeures (Bénard, Camichel, Kampé de Fériet) et des destructions et désorganisations liées à la guerre. Plusieurs initiatives de Pérès vont redresser la situation et ramener la mécanique au meilleur niveau international.

Création de l'IUTAM

La paix revenue, les relations scientifiques reprennent. Le sixième ICAM, tenu à Paris en 1946, voit la création de l'Union internationale de mécanique théorique et appliquée (IUTAM). Pérès en est nommé premier président, pour la mandature 1948-1952. Il encourage la constitution de sociétés savantes nationales qui enverront leurs délégués aux Assemblées générales. Ainsi naît, dès 1948, le Conseil national français de mécanique (CNFM). Une activité majeure de l'union est l'organisation de congrès. Pérès y promeut des congrès joints avec d'autres Unions, dont un, en particulier, avec l'Union internationale d'astronomie, à Paris en 1949, présidé par Pérès lui-même – des mécaniciens tels que von Karman et Burgers y côtoient des physiciens et mathématiciens tels que Heisenberg et von Neumann. Il organise également, en 1951 à Alger, sous l'égide de l'UNESCO et du CNRS, un colloque sur l'hydrologie dans les zones arides.

Création de l'ONERA

La réputation dont bénéficie Pérès dans les milieux aéronautiques conduit le ministre de l'Air Charles Tillon à l'associer à un comité chargé de la réorganisation des études et recherches aéronautiques françaises (où il côtoie Louis de Broglie et Frédéric Joliot, prix Nobel). Ainsi naît, en mai 1946, l'ONERA. Nommé membre de

>>>



La mécanisation des calculs intéresse alors un champ de plus en plus vaste de domaines, de l'astronomie à la gestion et la finance, en passant par la balistique militaire.

>>>

son conseil d'administration, Pérès y représentera le CNRS jusqu'à sa mort en 1962. L'une des premières actions de l'ONERA, où Malavard joue un rôle important, sera la construction de la soufflerie géante de Modane, en Savoie, sur la base d'une prise de guerre dans le Tyrol autrichien. Pérès est également associé à la création, en 1952 à l'initiative de Theodore von Karman, d'un comité de l'OTAN pour la recherche et développement aéronautiques (AGARD). Curieux de la conquête spatiale naissante, il préside en 1961 la Fédération internationale d'aéronautique.

Le Centre d'études supérieures de mécanique

La question du besoin de cadres pour l'industrie mécanique, déjà sensible dans l'entre-deux-guerres, revient en force après la Seconde Guerre mondiale. Avec le soutien du ministre de la Reconstruction, Raoul Dautry, Pérès milite pour la création d'une institution spécifique de formation, en contact étroit avec l'industrie et rattachée au CNRS – dont la mission de formation apparaît alors centrale. Le Centre d'études supérieures de la mécanique (CESM) naît ainsi à l'automne 1945, sous la tutelle du CNRS, de la faculté des sciences de Paris et de la Société française des mécaniciens. Installé dans les locaux de l'Institut Henri Poincaré (où Pérès a un bureau), sa première initiative est, dans le contexte du développement des vols supersoniques, la mise en place de formations sur les écoulements compressibles auxquelles Georges Darrieus, en particulier, contribue. Le CESM formera quelques centaines d'ingénieurs et sera ensuite absorbé dans les nouveaux centres de troisième cycle créés en 1954.

La mécanique universitaire

Après la guerre se manifeste également la nécessité d'une relance scientifique de la mécanique universitaire française et d'une mutualisation des moyens. C'est l'objectif des *Journées de mécanique des fluides* organisées en 1952 à Marseille, sous l'égide du CNRS, et présidées par Pérès. Les laboratoires de Marseille, Grenoble et Poitiers, en particulier, s'y montrent d'un grand dynamisme. De nouvelles équipes de recherche se structurent, où collaborent théoriciens et expérimentateurs, mathématiciens et physiciens, à l'encontre du système individualiste des chaires. En 1959, est créé le département de mécanique de la faculté des sciences de Paris. Deux ans plus tard, Pérès crée le *Journal de Mécanique*, avec Malavard, Germain et Siestrunck.

Le CNRS et le calcul scientifique

À la direction du CNRS

En août 1944, le Conseil national de la Résistance révoque Charles Jacob de la direction du CNRS et y place Frédéric Joliot. Celui-ci réunit un comité de douze scientifiques, parmi lesquels Pérès, chargés de réorganiser le Centre. L'année suivante, Joliot est appelé à la direction du CEA et cède la place au physiologiste Georges Teissier. Pérès prend alors la direction adjointe du Centre, fonction qu'il assumera de 1946 à 1950. Cette période voit le CNRS croître fortement en personnels et nombre de laboratoires – d'un facteur trois à quatre – et voit naître le Comité national de la recherche scientifique (CoNRS). Sa mission à la direction du Centre terminée, Pérès restera membre du conseil d'administration. Il présidera la section 3 du CoNRS (mécanique générale et mathématiques appliquées), y accueillant notamment, ainsi que le racontera Jean Kuntzmann, les informaticiens écartés de la section 1 (mathématiques) par leurs collègues bourbakistes.

Le calcul scientifique

L'intérêt de Pérès pour le calcul scientifique s'était déjà manifesté lors de son engagement avec Malavard dans des recherches sur les analogies électriques, autour d'enjeux aéronautiques. La mécanisation des calculs intéresse alors un champ de plus en plus vaste de domaines, de l'astronomie à la

gestion et la finance, en passant par la balistique militaire (Mounier-Kuhn 2010). Les machines sont alors électromécaniques – l'électronique s'y introduit à la fin des années 1930 –, le *leader* français en est la compagnie Bull.

Conscient des enjeux croissants de la question et fort de sa position à la direction du CNRS, Pérès crée en 1946 l'Institut Blaise Pascal (IBP), centre de mathématiques appliquées dédié au calcul scientifique. Cet institut, dont Pérès prend lui-même la direction, fédère deux laboratoires : celui d'analogies électriques (qui quitte alors le giron de l'institut de mécanique) dirigé par Malavard, et celui de calcul mécanique dirigé par le mathématicien Louis Couffignal. Ce dernier, spécialiste reconnu des machines à calculer – et promoteur précoce de la numération binaire – a été chargé par le CNRS, dès 1939, de réaliser ce qui deviendrait la première machine à calculer « universelle » française. Le physicien Léon Brillouin s'intéresse aussi de près à la question. Plusieurs symposiums sont organisés par l'IBP, dont l'un, ambitieusement intitulé *Les machines à calculer et la pensée humaine*, rassemble en 1951 plus de 300 participants parmi lesquels les Américains N. Wiener et H.H. Haiken. Ce colloque met cependant cruellement en évidence les retards pris par le projet de Couffignal, au regard des réalisations américaines – l'ENIAC, première machine entièrement électronique, a été mise en service en 1947 à l'université de Philadelphie. Les choix conceptuels de Couffignal se révèlent être des impasses, et l'industriel partenaire, Logabax, ayant de plus fait faillite, le projet est abandonné par le CNRS. La prétendue « avance théorique » française, à laquelle Pérès a cru lui aussi, était un leurre. La première machine électronique en service en France entre à l'IBP en 1955, elle est anglaise.

Couffignal écarté, l'IBP s'attache le laboratoire de calcul numérique de René de Possel, installé à l'Institut Henri Poincaré. Ancien bourbakiste reconverti aux mathématiques appliquées, de Possel est spécialiste de reconnaissance optique des caractères. Il développe un centre de calcul autour de nouvelles machines Bull et IBM, qui offre ses services à des laboratoires extérieurs dont la demande croît rapidement. Un problème sévère est alors le recrutement d'ingénieurs de calcul, fortement

sollicités par l'industrie, qui offre de meilleures rémunérations. Aux enjeux de calcul numérique, s'ajoute bientôt un intérêt, initié par les linguistes, pour les sciences du langage et leur formalisation. Un nouveau Centre d'études pour la traduction automatique (CETA) est rattaché à l'IBP, avec le soutien des militaires – l'enjeu est alors, dans le contexte de la guerre froide, la traduction de textes russes. L'apprentissage automatique et les « machines intelligentes », pour l'analyse documentaire en particulier, font également leur entrée à l'IBP.

De son côté, le Laboratoire de calcul expérimental analogique (LCEA) de Malavard, hébergé par l'ONERA, se développe fortement : personnel, thèses, visiteurs étrangers, contrats, notamment avec l'AGARD. Aux questions d'aérodynamique classique et supersonique, s'ajoutent l'hydrodynamique marine (hélices, cavitation), les milieux poreux et l'hydrologie, l'élasticité et la thermique (refroidissement de barreaux d'uranium pour le génie nucléaire, ablation de matériaux sur les têtes de missiles), et l'analyse des signaux (électro-encéphalogrammes). Le LCEA, devenu en 1962 Centre de Calcul Analogique (CCA), développe des techniques de calcul hybride, analogique-numérique, autorisant la résolution d'une gamme plus large d'équations aux dérivées partielles. Le premier calculateur électronique, un CAB de la SEA, est acquis en 1966. Le comité de direction du laboratoire s'inquiète toutefois du caractère trop confidentiel des publications. En 1970, le CCA migre sur le plateau d'Orsay et devient deux ans plus tard le Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI), que Malavard dirige jusqu'à sa retraite en 1979.

La dynamique créée par Pères diffuse en province dans les années 1950 avec la création de deux centres importants : le Laboratoire de calcul de la faculté des sciences de Grenoble, fondé en 1951 par Jean Kuntzmann, et l'Institut de calcul numérique de Toulouse, fondé en 1957 par le physicien Émile Durand. Ces développements sont fortement encouragés par le gouvernement de Pierre Mendès-France (1954-1955) puis par la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST) créée par la V^e République.

Au décès de Pères en 1962, la direction de l'IBP est reprise par de Possel. De brillantes

personnalités y sont accueillies, telles Jacques-Louis Lions et Marcel-Paul Schützenberger. L'âge d'or du début des années 1960 est cependant de courte durée : victime d'une stratégie incertaine, d'une crise de croissance de son centre de calcul et de la compétition du nouvel Institut de recherche en informatique et automatique (IRIA), l'IBP est dissout en 1969. Ses équipes se dispersent dans de nouveaux laboratoires tandis que son centre de calcul se reconstitue à Orsay, sous le nom de Centre interrégional de calcul électronique (CIRCE), dirigé par l'astronome Janine Connes.

Doyen de la faculté des sciences de Paris

C'est à la faculté des sciences de Paris que Pères, élu doyen en 1954, consacre ses dernières années. La faculté connaît alors une « massification » sans précédent – elle franchit cette année-là le cap des 10000 étudiants – associée à un manque dramatique de locaux. La Sorbonne accueille sept fois plus d'étudiants que ne le permet sa capacité, les travaux pratiques se déroulant dans « la cohue » jusqu'à la nuit et « dans des conditions de complète insécurité ». Le manque de locaux n'est pas nouveau. Un projet d'extension sur le site de la Halle aux vins – 14 hectares d'entrepôts sur les bords de la Seine – était apparu en 1942 mais s'était enlisé du fait de difficultés d'expropriation des marchands de vins. Pères reprend le dossier, et, très déterminé à le faire aboutir et bien introduit dans les ministères, obtient finalement gain de cause. Les travaux sont engagés en 1958 et deux blocs de bâtiments, le long du quai Saint-Bernard, sont achevés en 1961 (aujourd'hui toujours en service). Le projet définitif d'aménagement du site, redessiné par le successeur de Pères, Marc Zamansky, autour d'une tour haute de 85 mètres, sera adopté en 1963.

Pères a par ailleurs découvert, en 1954, une autre opportunité d'extension de la faculté : une propriété de 130 à 160 hectares au sud de Paris, à Orsay, que l'État vient de confisquer à son propriétaire condamné pour collaboration avec les Allemands pendant la guerre. Les choses avancent ici rapidement : les premiers laboratoires et étudiants s'y installent dès 1958.

Par ailleurs très sollicité pour les jurys de thèse, Pères est un membre influent du Comité consultatif des universités qui joue un rôle déterminant dans les nominations. C'est aussi dans son bureau qu'est fondé, en juin 1958, l'Institut des hautes études scientifiques (IHES), qui deviendra une prestigieuse institution pour les mathématiques et la physique théorique. Pères en sera le premier président.

Essaimages

Joseph Pères prend sa retraite en octobre 1961 et, quatre mois plus tard, le 12 février 1962, décède des suites d'une opération chirurgicale. Des obsèques solennelles sont célébrées en la chapelle de la Sorbonne, en présence des deux ministres de l'Éducation nationale et de la Recherche scientifique. Parmi les nombreux hommages alors rendus, le plus fort et émouvant est sans doute celui que publièrent les étudiants de la faculté dans un numéro spécial de leur revue, *L'étudiant en sciences*. Cet hommage, à celui qui « était notre ami autant que notre maître », cerne avec finesse les qualités unanimement reconnues de Joseph Pères et qui lui ont valu tout au long de sa carrière la confiance et le respect de ses collègues et collaborateurs : « un homme attentif, d'excellents conseils et de grande sagesse », personnalité « hors pair » qui savait « demander, exiger, obtenir » en montrant toujours « une assurance tranquille et un sourire plein de malice ».

Homme de grande culture – et fidèle lecteur du *Canard Enchaîné* –, Pères maintint toujours un vif intérêt pour l'histoire et la philosophie des sciences. Auteur en 1930 d'un ouvrage à caractère historique et philosophique, *Les sciences exactes*, il fut élu en 1948 à l'Académie internationale d'histoire des sciences et participa à la création, en 1956, de la branche française de l'Union internationale d'histoire et de philosophie des sciences (Costabel 1962). Pères fut honoré par quatre académies étrangères, et Commandeur de la Légion d'honneur. Il repose à Bandol, dans le Var.

L'auteur remercie les personnes qui ont aidé au travail présenté ainsi que la famille Jolivet-Pères pour leur accueil. Les sources (revues, ouvrages, archives, correspondance) sont toutes référencées dans un article plus développé (Charru 2026) où l'on trouvera également l'hommage rendu par les étudiants à leur doyen. ■

Observer, mesurer et modéliser le monde qui nous entoure

La physique de la maternelle au collège avec *La main à la pâte*

David Jasmin, directeur de la fondation *La main à la pâte*

Depuis trente ans, la fondation *La main à la pâte* promeut une approche expérimentale et raisonnée des sciences et de la technologie, favorisant leurs liens naturels avec les mathématiques, le langage, l'histoire des sciences et les enjeux contemporains. L'enseignement de la physique permet aux élèves de se construire un regard rationnel sur le monde en se constituant un socle de connaissances, mais aussi en apprenant par des exemples concrets la démarche scientifique. À travers quelques exemples d'activités menées de la maternelle au collège – ombres et lumière, équilibre, énergie, mesure instrumentée avec le numérique – cet article montre comment une physique élémentaire, expérimentale et inscrite dans l'environnement direct des élèves peut constituer une véritable clé de compréhension du monde tout en leur montrant l'intérêt et l'importance du raisonnement.

La science ne se réduit pas à un ensemble de lois fixes démontrées ; elle constitue avant tout une manière d'interroger le réel, en se fondant sur l'observation des phénomènes, la confrontation des idées à l'expérience et la construction progressive de modèles explicatifs. Cette approche scientifique du monde doit être initiée très tôt, bien avant l'introduction de formalismes élaborés, en s'appuyant sur des activités alliant questionnement, investigation, expérimentation et raisonnement.

Depuis trente ans, la fondation *La main à la pâte*, en partenariat avec les communautés scientifiques et éducatives, œuvre à promouvoir cette approche expérimentale et raisonnée des sciences à l'école et au collège. Elle a ainsi déployé sur tout le territoire des actions et des centres de formation et de ressources qui bénéficient chaque année à plusieurs dizaines de milliers de professeurs et à travers eux à plus de 800 000 élèves.

La physique se prête particulièrement bien à la mise en œuvre d'une démarche scientifique dès le plus jeune âge : identifier les paramètres pertinents pour décrire un

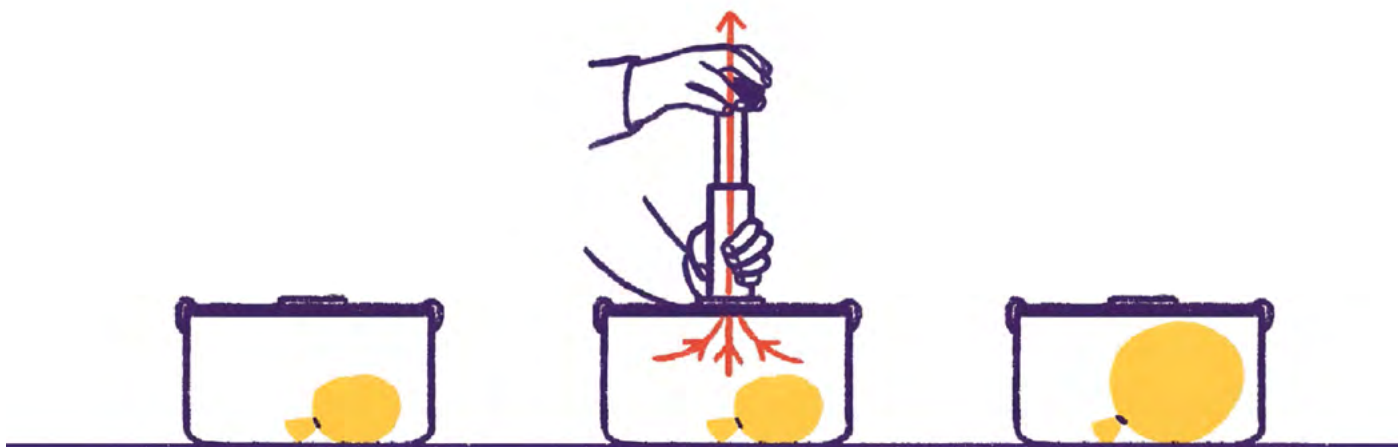
phénomène, en faire varier certains et observer les effets produits, puis rechercher et modéliser des relations stables entre les grandeurs constituent le cœur même de la pratique du physicien. Cette pratique peut être adaptée et se décliner de nombreuses manières selon l'âge des élèves et les sujets traités.

Observer son ombre à la maternelle

Dès la maternelle, l'étude des ombres et de la lumière offre une première rencontre avec la physique. En observant et dessinant à la craie les contours de l'ombre de leur corps dans la cour de l'école à différents moments de la journée, les élèves constatent que sa longueur et sa direction varient^(a) (fig. 1). Ils sont alors conduits à comparer les situations, à identifier ce qui change – la position du Soleil – et ce qui reste invariant – leur corps – première étape pour isoler un paramètre et rechercher des relations causales. Pour les plus grands, on pourra reproduire cette situation en faisant varier la position d'une source lumineuse artificielle



1. Mise en place de séquence *Mon ombre au soleil* dans une classe de maternelle (photo d'observation d'ombre dans la cour et dessin d'enfant associé)



2. Schéma sur la pression de l'air extrait du livre *40 expériences de physique élémentaire issues des leçons de Marie Curie*.

ou sa distance avec l'objet qu'elle éclaire (planchette de bois, stylo, silhouette en papier...). Sans introduire de vocabulaire technique, ce type d'activité offre une première porte d'entrée vers la compréhension du monde physique, en montrant que des phénomènes observés dans le quotidien et dans la durée obéissent à des régularités.

Mesurer la Terre : sur les pas d'Ératosthène

Le projet *Sur les pas d'Ératosthène*^(b) qui donne lieu chaque année à des échanges de mesures entre les écoles de nombreux pays^(c), est une manière de retravailler les



3. Des élèves de collège (cycle 4) pompent l'air de la boîte et font gonfler le ballon de baudruche fermé qui y est enfermé (voir figure 2).

notions d'ombres et de lumière avec un ancrage mathématique et historique supplémentaire. Ce projet illustre de manière particulièrement féconde les liens naturels entre physique, mathématiques, géographie et histoire des sciences. Il permet aux élèves de comprendre et de mettre en œuvre les observations et le raisonnement élaboré par Ératosthène, directeur de la bibliothèque d'Alexandrie, au III^e siècle avant notre ère. À partir de la mesure de l'ombre d'un bâton vertical (gnomon) à midi solaire, les élèves déterminent un angle associé à la position du Soleil. Sans recourir à des formules trigonométriques, mais en s'appuyant sur des observations, des comparaisons et des relations de proportionnalité accessibles dès la fin de l'école primaire, les élèves vont avoir à mesurer la hauteur du soleil au midi solaire et comprendre que celui-ci est dépendant du jour de l'année et de leur position. La démarche prend tout son sens lorsque les mesures sont comparées avec celles réalisées simultanément par d'autres classes situées sous d'autres latitudes. Les élèves sont alors amenés à passer d'une mesure locale, celle de la longueur de l'ombre observée dans leur environnement immédiat, à une estimation globale de la circonférence de la Terre, mettant en évidence la puissance explicative du raisonnement du génial savant.

Ce type d'activité présente également l'intérêt de faire travailler les élèves sur des notions mathématiques souvent perçues comme abstraites, en particulier la notion d'angle, en les inscrivant dans une situation

concrète et porteuse de sens. L'inscription explicite de ce type d'activité dans l'histoire des sciences permet enfin de montrer que les outils mathématiques et les modèles physiques se sont construits pour répondre à des questions fondamentales sur le monde (mesurer la taille du globe dans le cas d'Ératosthène).

Physique élémentaire et histoire des sciences : les leçons de Marie Curie

À l'école élémentaire, les leçons de Marie Curie adaptées pour les classes par la fondation *La main à la pâte* en 2023 à l'occasion de l'Année de la physique^(d) constituent un autre exemple emblématique d'une approche expérimentale de la physique. Inspirées des cours que Marie Curie dispensait au début du XX^e siècle à ses enfants et aux enfants de ses amis, ces leçons articulent étroitement histoire des sciences, expérimentation et compréhension de principes de physique élémentaire.

Les élèves y explorent des situations fondamentales – équilibre de balances, flottabilité, densité, pression... – à partir de dispositifs simples (fig. 2 et 3). Ils mesurent la masse de l'air, fabriquent un château d'eau, transvasent de l'air d'un gobelet à un autre dans une bassine... La référence à Marie Curie contribue par ailleurs à donner une dimension humaine et historique à la physique. Ces leçons rappellent que la science progresse à partir de questions



De la maternelle au collège, il est possible de faire vivre aux élèves une physique concrète et expérimentale, fondée sur l'observation des phénomènes, la mesure et la recherche de relations entre grandeurs.



simples, posées à partir de l'observation du réel et fait appel à l'expérimentation pour formuler des règles générales ou des lois physiques.

L'énergie : un concept abstrait à construire progressivement

Le concept d'énergie constitue un fil conducteur de l'enseignement de la physique à partir de la fin de l'école primaire qui se distingue par son niveau d'abstraction. Contrairement à des grandeurs familières comme la distance ou le temps, l'énergie n'est perceptible qu'à travers ses effets. Il est donc souhaitable de construire cette notion progressivement à partir de situations expérimentales concrètes qui seront enrichies au fur et à mesure des apprentissages de la scolarité par des activités interdisciplinaires.

Le site Internet de la fondation *La main à la pâte* propose ainsi une progression pédagogique étalée du CM1 à la fin du



4. Deux façons de tester l'influence de la masse d'un objet en gardant sa forme constante. À gauche, les élèves utilisent des coquilles creuses remplies d'une quantité croissante d'un même matériau. À droite, les élèves comparent les impacts créés par une balle de ping-pong et une bille en verre de même diamètre. Outre cette première situation, d'autres activités disponibles sur le site Internet de *La main à la pâte* permettent de prolonger la construction du concept par l'observation des modifications de matière (fonte d'un glaçon, fusion d'un carré de chocolat), l'étude des sources et des formes d'énergie et, au collège, l'analyse de chaînes énergétiques liées à des dispositifs technologiques.

collège^(e) pour aider les élèves à appréhender expérimentalement le concept d'énergie et à l'articuler avec d'autres notions physiques (formes d'énergie, transformations, conservation).

Une première approche expérimentale consiste à étudier l'impact d'une bille lâchée sur un tas de semoule (fig. 4). Les élèves observent que le diamètre du cratère dépend à la fois de la masse de la bille et de la hauteur de la chute : plus la bille est lourde ou lâchée de plus haut, plus le diamètre du cratère formé est important. Cette activité se déroule en deux temps : dans un premier temps, les élèves constatent ces variations sans encore relier ces paramètres à l'énergie ; dans un second temps, l'enseignant formalise progressivement le concept d'énergie pour amener les élèves à comprendre la relation entre les variables expérimentales (hauteur, masse) et cette grandeur. Ils établissent ainsi de deux manières que la bille possède plus ou moins d'énergie au moment de l'impact en fonction de son altitude et de sa masse.

En articulant l'expérience, les outils mathématiques et les enjeux contemporains liés à la production et à l'usage de l'énergie, cette progression favorise une compréhension concrète et raisonnée d'un concept qui, par nature, est difficile d'accès aux élèves. Elle montre que l'énergie peut se manifester dans l'environnement direct des élèves et devenir un véritable outil d'analyse du monde physique.

Mesurer et représenter avec le numérique : l'exemple de FizziQ

Les outils numériques renouvellent profondément les pratiques expérimentales en classe en facilitant l'accès à la mesure quantitative et cumulative des phénomènes physiques. L'application FizziQ^(f) codéveloppée par Trapeze-Digital et la fondation *La main à la pâte* permet d'exploiter les capteurs intégrés des smartphones et des tablettes – accéléromètre, microphone, capteur de luminosité, caméra... – pour mesurer des grandeurs physiques telles que l'accélération, la fréquence sonore ou encore l'éclairement, et pour en proposer une analyse graphique immédiate.

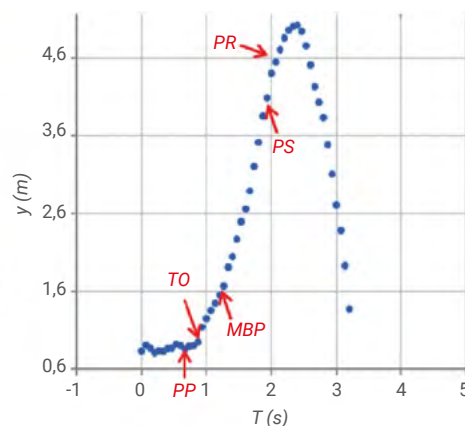
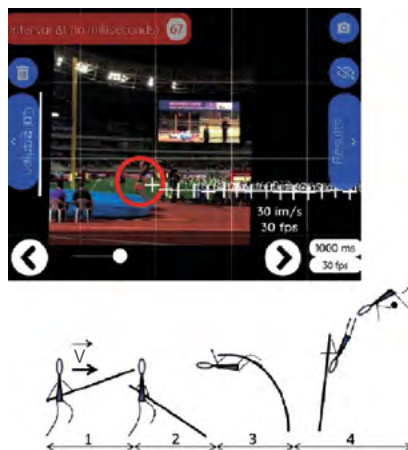
Un exemple particulièrement parlant est celui de l'analyse cinématique par capture vidéo, telle que présentée dans un article récent consacré à l'étude du saut à la perche^(g). À partir d'une simple vidéo prise avec un *smartphone*, les élèves peuvent suivre la position d'un mobile image par image, construire les graphes de position, de vitesse ou d'accélération, et relier ces représentations à différentes phases du mouvement (fig. 5). Cette démarche permet de mettre en évidence, de manière expérimentale, des notions centrales de la physique comme le mouvement, la chute libre ou les transformations d'énergie, tout en restant accessible grâce à une interface intuitive.

Ces activités rendent explicite le rôle central de la mesure, du traitement des données et de la modélisation dans la démarche scientifique. Elles montrent également que les représentations graphiques ne sont pas de simples outils mathématiques, mais des objets intermédiaires essentiels pour interpréter les phénomènes physiques.

En outre, FizziQ ne se limite pas aux capteurs intégrés des appareils mobiles. L'application peut être interfacée avec des capteurs externes (capteurs de CO_2 , de température, de pression...), ouvrant la possibilité de transformer smartphones et tablettes en véritables laboratoires de poche. Cette continuité entre instrumentation simple et instrumentation plus élaborée permet d'enrichir progressivement les investigations expérimentales, du primaire au collège, et d'ancrer encore davantage l'apprentissage de la physique dans des pratiques proches de celles des scientifiques.

Les scientifiques participent à la formation des enseignants

Que ce soit pour renouveler les approches d'enseignement ou pour consolider les connaissances scientifiques, la formation continue des enseignants joue un rôle essentiel. C'est dans cet objectif que la fondation *La main à la pâte* a créé en 2011, au cœur des universités et en partenariat avec les rectorats, les *Maisons pour la science*. Initialement déployées dans quatre académies et aujourd'hui présentes dans quinze, elles occupent une place centrale dans la formation en sciences des professeurs des écoles et des enseignants de collège. Elles proposent notamment des formations à la physique expérimentale en associant systématiquement des physiciens aux équipes de formateurs. Celles-ci portent notamment sur la physique fondamentale et les phénomènes du quotidien (lumière, son, air, équilibre, masse et volume, temps, ondes), l'énergie et ses enjeux sociétaux (ressources énergétiques, conversions, climat...), l'astronomie (système solaire, histoire des sciences, mesure du temps...), la matière (nanomonde, plasmas, verre, microélectronique) ou encore l'interdisciplinarité (liens avec les arts, la musique, le sport...).



5. Mesure et représentation graphique avec FizziQ. Le suivi vidéo et l'exploitation des capteurs d'un *smartphone* permettent de passer du phénomène observé à la donnée mesurée, puis à sa représentation graphique, renforçant les liens entre physique et mathématiques. (PP : perche plantée, TO : décollage, MPB : flexion maximale, PS : perche droite, PR : largage de la perche). Extrait de la publication^(e).

La diversité et la richesse des thématiques permettent de donner à voir des notions de physique inscrites dans une histoire et en prise avec les enjeux contemporains tout en suscitant le goût pour les sciences et en développant l'esprit critique des élèves.

Un apprentissage à cultiver tout au long de la scolarité

De la maternelle au collège, il est possible de faire vivre aux élèves une physique concrète et expérimentale, fondée sur l'observation des phénomènes, la mesure et la recherche de relations entre grandeurs. En explorant des situations issues du quotidien – une ombre qui se déplace, un équilibre

qui se modifie, des ampoules qui brillent – les élèves découvrent progressivement que le monde physique obéit à des régularités accessibles à la raison.

En articulant expérience, raisonnement et modélisation, et en établissant des liens féconds avec les mathématiques, l'histoire des sciences et les enjeux contemporains, l'enseignement de la physique dès le plus jeune âge contribue à former des élèves capables d'interroger et de comprendre le réel. Cette familiarité précoce avec la démarche scientifique constitue un enjeu éducatif majeur, qui repose sur le développement professionnel des enseignants et sur la rencontre entre le monde de la recherche et celui de l'école. ■



(a) Voir <https://fondation-lamap.org/sequence-d-activites/ombres-et-lumiere-en-maternelle>

(b) M. Hibon-Hartmann et al., *Mesurer la Terre est un jeu d'enfant*, Le Pommier (2009).

(c) Voir <https://cutt.ly/mesurer-la-circonference-terrestre-avec-un-baton>

(d) H. Arribart, E. Bernard et D. Jasmin (dir.), *40 expériences de physique élémentaire issues des leçons de Marie Curie*, EDP Sciences (2024).

(e) Voir <https://cutt.ly/comment-enseigner-le-concept-d-energie-du-cycle-3-a-4>

(f) Voir www.fizziq.org

(g) C. Chazot and U. Delabre, "Using Smartphones to Perform Kinematic Analysis in Sports with the FizziQ App: Example of the Pole Vault", *The Physics Teacher* **63** (2025) 791-793

• Fondation *La main à la pâte*, rapports d'activité et impact : <https://fondation-lamap.org/qui-sommes-nous/rapports-d-activite>

• Ressources pédagogiques en ligne : <https://fondation-lamap.org/preparez-votre-classe/themes-scientifiques-et-pedagogiques>

• Réseau des *Maisons pour la science* : www.maisons-pour-la-science.org

• Plateforme d'autoformation I@map : <https://elearning-lamap.org/>

• G. Charpak, P. Léna et Y. Quéré (dir.), *L'Enfant et la science*, Le Pommier (2005)



Hommage

à Bart van Tiggelen

(1965-2025)

Bart van Tiggelen nous a quitté prématurément le 20 décembre 2025. Né aux Pays-Bas en 1965, Bart avait étudié l'astrophysique à Leiden, puis soutenu sa thèse de doctorat en 1992 à Amsterdam. Consacrée à la diffusion multiple et à la localisation de la lumière dans les milieux désordonnés, sa thèse posait les bases d'un champ de recherche entier, qui demeure pleinement d'actualité aujourd'hui. Bart était très actif à la SFP et il se passionnait pour les questions liées à l'édition scientifique.

Disparition d'un compagnon exemplaire

Les résultats scientifiques remarquables obtenus par Bart après son entrée au CNRS en 1996 ont été récompensés par de nombreux prix et distinctions, parmi lesquels le prix Anatole et Suzanne Abragam (2002) et le prix Paul Langevin (2004), décernés respectivement par l'Académie des Sciences et la SFP. Parmi ses contributions scientifiques majeures figurent l'introduction du concept de vitesse de transport des ondes dans les milieux désordonnés, la théorie de la diffusion multiple des ondes sismiques, la théorie de la diffusion multiple de la lumière dans les milieux anisotropes et en présence d'un champ magnétique externe, ainsi que la généralisation au cas de milieux de taille finie de la théorie autocohérente de la localisation.

Les travaux théoriques de Bart ont souvent inspiré d'autres chercheurs à concevoir des expériences nouvelles et ambitieuses. Ils ont joué un rôle déterminant dans l'observation des effets magnéto-optiques dans les milieux désordonnés, de l'équipartition et de la rétrodiffusion cohérente des ondes sismiques, des corrélations mésoscopiques à longue portée pour les ondes électromagnétiques, ainsi que de la localisation d'Anderson des ondes élastiques. Au-delà de la diffusion multiple des ondes, Bart a également apporté des contributions importantes à d'autres domaines de la physique, notamment la physique des atomes froids, l'électrodynamique quantique, l'imagerie et le contrôle du front d'onde.

Il ne fait aucun doute que la physique était la passion de Bart. Il trouvait cependant aussi le temps et l'énergie – et souvent beaucoup de temps et d'énergie – pour œuvrer au service du collectif, au sens le plus large du terme. Bart a été directeur (2007-2012) du laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés

à Grenoble, directeur du GDR IMCODE (2003-2008), membre du Comité National de la Recherche Scientifique (2004-2008) et directeur adjoint scientifique de CNRS Physique (2012-2018). Il a été éditeur de la revue *Waves in Random and Complex Media* (2006-2012) et rédacteur en chef d'*Europhysics Letters* (2018-2024).

De plus, Bart a été un membre très actif de la Société Française de Physique ; il a été membre de son Conseil d'administration, puis membre de son Bureau, au sein duquel il jouait un rôle central avec ses remarques toujours pertinentes et son rôle moteur dans une multitude d'activités. Il a également participé activement au jury des grands prix de la SFP. Son absence se fera cruellement sentir.

Soucieux d'éthique autant que de diffusion de la science et de bonne utilisation des deniers publics, Bart a par ailleurs apporté une contribution majeure à l'évolution des publications scientifiques. Défenseur ardent, et néanmoins nuancé, de la « science ouverte », il a œuvré à faire comprendre ce modèle et à le promouvoir. Toujours au sein de la SFP, il a présidé la commission des publications, et, ardent défenseur de la libre diffusion de l'information scientifique, il a conçu et animé une *master class* sur la science ouverte, dont les sessions ont eu lieu dans plusieurs villes de France.

En plus d'être un grand physicien, Bart avait une véritable passion pour la SFP. Son engagement à ce qu'aucun projet ne soit "*business as usual*" lors de la célébration des 150 ans de la SFP a marqué les esprits. Il était de très bon conseil et vraiment dévoué à notre cause. Nous perdons un véritable ami et un magnifique ambassadeur.

Ses collègues du Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés à Grenoble et de la SFP

Bart et la SFP : un engagement passionné

Bart s'est investi avec enthousiasme et générosité pour la Société Française de Physique (SFP), incarnant ses valeurs avec sincérité et constance. Son engagement, initié aux côtés de Roger Maynard, s'est particulièrement illustré dans les questions de publication scientifique.

En 2009, Michèle Leduc, alors présidente de la SFP, lui a confié la responsabilité de la commission Publications, composée de personnalités comme Jean-François Joanny, Denis Jérôme, Jean-Michel Raimond, Roger Maynard et Jean-Marc Quilbé, président d'EDP Sciences. Deux d'entre nous (Jean et Martina) ont rejoint ce comité la même année, suivi plus tard par Agnès, directrice générale d'EDP Sciences, qui a succédé à J.M. Quilbé.

À cette époque, le paysage des publications scientifiques était en pleine mutation : la révolution numérique s'accélérait, la science ouverte émergeait, et des plateformes comme arXiv fêtaient leurs dix ans. La SFP, propriétaire d'EDP Sciences, devait naviguer entre enjeux européens et internationaux, face aux sociétés savantes britannique et italienne, éditeurs elles aussi.

Les travaux de la commission se sont articulés autour de questions centrales : comment pérenniser les revues européennes, comme *European Physics Journal* et *European Physics Letters* ? Comment soutenir EDP Sciences dans un environnement en constante évolution ? Et surtout, comment promouvoir une publication scientifique ouverte et équitable ? Bart, qui a aussi siégé au Conseil d'Administration d'EDP Sciences, a été un ardent défenseur de l'accès ouvert, convaincu que la physique devait être accessible au plus grand nombre. Il a également œuvré pour la bibliodiversité, afin d'éviter les monopoles et les biais dans la diffusion des connaissances.

Nos échanges étaient toujours riches en idées, en projets et en bonne humeur. Ils portaient sur des sujets comme la durabilité de l'*Open Access*, son impact sur l'évaluation de la recherche ou encore la définition de l'excellence scientifique. Comment l'évaluer ? Comment la promouvoir sans sacrifier la qualité ?

Sous l'impulsion de Bart, la commission a organisé plusieurs journées dédiées à l'*Open Access*, de nombreuses sessions thématiques lors des congrès généraux de la SFP ou des Journées de la Matière Condensée, dans des formats variés et toujours très interactives, et même une expérimentation sur le *peer-review*. Pour les 150 ans de la SFP, Bart a coordonné la mise en place de *master classes*, veillant à leur succès dans toutes les sections locales. Un projet dont il était particulièrement fier, et à juste titre. Plus récemment, il a initié des réflexions sur l'impact de l'IA dans la publication scientifique, avec encore une session riche et très animée au dernier congrès de la SFP à Troyes en juillet dernier.

Bart croyait profondément à la dimension européenne de la recherche. Il a consacré quatre ans à la revue *European Physics Letters* en tant qu'éditeur en chef, défendant une vision ambitieuse : celle d'un écosystème scientifique européen capable de rivaliser avec les grands acteurs internationaux comme l'*American Physical Society*.

C'est à l'automne 2025 que Bart a passé le relais à Quentin Glorieux, sûr d'avoir semé des graines pour l'avenir de la commission ; on n'imaginait pas que notre ami partait définitivement.

Jean Daillant, Agnès Henri et Martina Knoop

Bart van Tiggelen, une incarnation du scientifique idéal

Bart Van Tiggelen ne laissait personne insensible. Pour le grand public qui le découvrait aux Utopiales (le plus grand festival européen de science-fiction, à Nantes), il incarnait LE scientifique idéal, profond mais modeste, drôle dans ses réparties avec ce petit accent qui invitait à l'écoute attentive, ses grands gestes qui accompagnaient sa pensée, sa passion communicative et ses réponses sans détour, ne cherchant jamais à glisser la poussière sous le tapis. Une intelligence toujours tournée vers l'autre, subtile et motivante, toujours prompte à la dérision. Qu'on ait eu la chance de passer une soirée à échanger à bâtons rompus avec lui, une

semaine à participer avec lui à une évaluation, des années à ses côtés à la SFP, sa présence en faisait toujours un moment mémorable. Certaines et certains retiendront sa gentillesse, son écoute et son attention à l'autre, sa vivacité d'esprit, ses yeux brillants d'excitation, d'autres son honnêteté et son intégrité, son refus intransigeant de l'injustice et des à-peu-près, d'autres encore sa fidélité à ses engagements, nous pourrions continuer longtemps... Bart van Tiggelen nous a toutes et tous touchés au cœur et nous l'en remercions.

Le Conseil d'Administration de la SFP

Nouvelles des commissions

La Société Française de Physique se dote d'un groupe de travail « Futur Sustainable »

Créé à l'hiver 2025, ce groupe de travail est une continuité des réflexions de la SFP en matière de futur soutenable initiées par la commission Énergie et environnement. Ce groupe de travail a deux ambitions fortes : fédérer la communauté des physiciennes et physiciens autour des enjeux planétaires et ancrer la réflexion de la SFP dans une démarche scientifique transversale.

Pour répondre à la première ambition, le groupe de travail envisage l'organisation d'évènements récurrents, ouverts aux membres de la Société, permettant d'échanger et de s'informer sur les enjeux d'un futur soutenable. Également, le groupe de travail se chargera de recueillir les postulats existants sur ce sujet complexe afin de créer un référentiel clair et à l'image de la communauté des physiciennes et physiciens.

Satisfaire la deuxième ambition nécessite d'impliquer d'autres communautés scientifiques. Le groupe de travail se chargera donc de faire rayonner une culture soutenable en impliquant des représentants et représentantes d'autres disciplines, par l'intermédiaire par exemple du Collège des Sociétés Savantes.

Ce projet vous intéresse ? N'hésitez pas à nous contacter pour vous joindre à nous !
(mspiro@admin.in2p3.fr et gaelle.vitali-derrien@centralesupelec.fr)

Nouvelles des sections locales

Prix Louis Néel de l'Académie Delphinale

Louis Néel (prix Nobel de physique 1970), physicien du magnétisme, professeur à Strasbourg replié à Grenoble en 1940, décide en 1945 d'y rester et développe des interactions fortes avec les industriels isérois. Promoteur inlassable de l'intrication « recherche académique - innovation », il promeut les implantations du CEA à Grenoble en 1958 et du CNRS en 1962. Cette dynamique conduit à l'implantation de l'Institut Laue-Langevin en 1970, qui a lui-même induit la venue de l'ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) en 1992, deux grands équipements qui ont contribué à faire de Grenoble un pôle scientifique international.

Soucieux d'honorer la trajectoire exceptionnelle de ce scientifique exceptionnel, l'Académie Delphinale a décidé de créer le « Prix Louis Néel de l'Académie Delphinale » attribué pour la première fois le 13 décembre 2025 et matérialisé par une médaille de bronze créée par l'artiste Tineke Bot.

Parmi les sept nominations issues de binômes constitués du laboratoire porteur de la propriété intellectuelle initiale et d'une *start-up*, le jury a attribué le prix Louis Néel 2025 à Sophie Rivoirard et Erick Petit, fondateurs de MagREEsources, *start-up* fondée en 2020 pour recycler les terres rares d'aimants permanents. MagREEsources bénéficie de 30 ans de recherches et de développement au CNRS. Sophie Rivoirard au sein de l'Institut Néel (CNRS - Université Grenoble Alpes) a contribué à la mise au point d'un procédé d'hydruration qui fragilise et transforme en poudre les aimants en fin de vie afin d'en fabriquer de nouveaux. Erick Petit, pur produit de l'industrie métallurgique, passé par Eramet et Arcelor, apporte entre autres le savoir-faire entrepreneurial.

MagREEsources a construit une usine pilote à Noyarey qui, avec 40 personnes, a produit 50 tonnes d'aimants permanents en 2025. Elle construit pour 2026-2027 une usine pouvant produire jusqu'à 1000 tonnes d'aimants permanents en économie circulaire soit 1/3 de l'objectif de l'Europe.



Erick Petit et Sophie Rivoirard, lauréats du prix Louis Néel 2025.

Prochains rendez-vous

19 AU 21
MAI MAI

18^e Congrès de la Division Plasmas de la SFP à Massy

La division Plasmas organise son 18^e congrès au Palais des congrès Paris-Saclay à Massy. Les thèmes abordés, fortement pluridisciplinaires, s'inscriront dans les trois grandes familles de plasmas qui recouvrent l'ensemble de la discipline, les plasmas froids ou industriels, les plasmas naturels et les plasmas chauds, ainsi que dans les thèmes transverses. <https://sfp-plasma-2026.sciencesconf.org/>

8 AU 10
JUILLET

Rencontres Enseignement de l'Optique et Didactique à OPTIQUE BFC à Dijon

Pendant le congrès OPTIQUE BFC de la Société Française d'Optique, les commissions Enseignement de la SFO et de la SFP organisent ces rencontres qui permettront de partager innovations pédagogiques et retours d'expériences. www.sfoptique.org/pages/sfo/congres-optique/optique-bfc-2026/

26 AU 30
OCTOBRE

Journées de la Matière Condensée 2026 à Toulouse

Les thématiques abordées couvrent l'ensemble des domaines relevant de la matière condensée, des concepts aux applications. Le succès de ces journées en fait le plus grand congrès national de physique de la Matière Condensée en France (500-700 participant-e-s) <https://jmc2026.sciencesconf.org/>

16 AU 20
NOVEMBRE

Conférence MATERIAUX 2026 à Grenoble

Organisé par la Fédération Française des Matériaux qui regroupe 26 associations scientifiques, dont la SFP, cet évènement s'inscrit dans la série des conférences MATÉRIAUX qui se sont imposées comme le rendez-vous francophone incontournable de l'ensemble des acteurs académiques et industriels du monde des matériaux. <https://matériaux2026.org>

Relation avec les sociétés sœurs

Articles récents relevés dans *L'Actualité Chimique*

Dans les numéros récents de la revue de la Société Chimique de France, vous pouvez lire notamment :

- **L'étonnante mémoire des polymères**, par Philippe Poulin (*L'Actualité Chimique* 508-509 (2025) 33)

Les polymères à mémoire de forme présentent la capacité de retrouver une forme initiale après déformation grâce à une transition thermique, souvent liée à la température de transition vitreuse. Des travaux récents ont révélé un effet de mémoire de température : le matériau peut restituer une réponse mécanique à la température précise où il a été programmé. Ce phénomène découle des hétérogénéités dynamiques de la phase amorphe, capables de stocker localement l'énergie mécanique. Il ouvre la voie à des actionneurs séquentiels, des micromoteurs ou des implants adaptatifs.

- **Explorer les surfaces des matériaux. Comment la RMN exaltée par la polarisation dynamique nucléaire révèle l'invisible**, par Salah-Eddine Akrial et Anne Lesage (*L'Actualité Chimique* 508-509 (2025) 39)

Cet article présente les principes de la RMN (résonance magnétique nucléaire) du solide hyperpolarisée par polarisation dynamique nucléaire appliquée à l'étude structurale de la surface des matériaux fonctionnels. Cette technologie émergente repose sur le transfert de la polarisation d'électrons non appariés, introduits sous forme de radicaux organiques libres, vers les noyaux environnants, puis vers les espèces de surface. Cette approche permet d'en amplifier considérablement les résonances, rendant accessibles des expériences avancées, impossibles par RMN conventionnelle.

Pour obtenir gratuitement ces articles, faites-en la demande à reflets@sfphysique.fr



Société Chimique de France

Prix scientifiques



Christophe Jurczak, Thierry Lahaye, Georges-Olivier Reymond et Antoine Browaeys

Prix Yves Rocard 2025 de la Société Française de Physique

Le prix Yves Rocard 2025 est décerné à Antoine Browaeys, Christophe Jurczak, Thierry Lahaye et Georges-Olivier Reymond, véritables pionniers français de la physique quantique et créateurs de la société Pasqal, à l'avant-garde des technologies quantiques.

L' aventure commence avec les travaux d'Antoine Browaeys, lorsqu'il y a près de 20 ans il utilise des atomes de rubidium piégés individuellement dans des pinces optiques et les prépare dans des états électroniques très excités appelés états de Rydberg. En isolant une transition optique parmi les très nombreuses transitions de ces atomes, on peut utiliser ces derniers comme un système quantique à deux niveaux, les préparer dans un état quantique contrôlé, les laisser évoluer, puis lire leur état quantique après un certain temps.

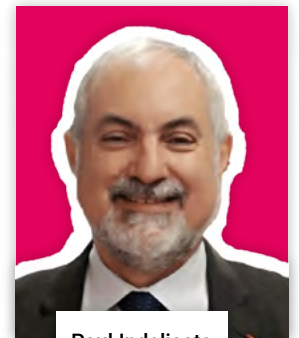
En utilisant d'autres transitions optiques, on peut également faire interagir deux atomes de Rydberg en contrôlant optiquement la force et même le signe de l'interaction. Le groupe d'Antoine Browaeys et de Thierry Lahaye réussit à arranger un grand nombre de ces atomes uniques en réseau, en étant parfaitement certain que chaque site contient un et un seul atome et en contrôlant

individuellement chacun d'eux ainsi que leurs interactions (voir l'article de Thierry Lahaye, page 7 de ce numéro). Certaines des réalisations récentes mettent en jeu un nombre suffisamment grand d'atomes pour aller au-delà de ce que les théoriciens savent calculer. Il s'agit véritablement d'expériences de simulation quantique, comme imaginée par Richard Feynman.

La deuxième partie de l'aventure que récompense ce prix est la création de l'entreprise Pasqal avec pour PDG Georges-Olivier Reymond et pour cofondateur Christophe Jurczak. L'objectif est de faire de cette plateforme expérimentale dédiée à la recherche fondamentale une plateforme fiable au sens industriel du terme et à la pointe des technologies quantiques pour réaliser les applications les plus ambitieuses en termes de résolution de problèmes complexes ou d'implémentation de calculateurs quantiques digitaux.

Prix Gentner-Kastler 2026, décerné par la *Deutsche Physikalische Gesellschaft* et la SFP

Le prix Gentner-Kastler 2026 est décerné à Paul Indelicato en reconnaissance de ses contributions exceptionnelles à la physique atomique. Ses travaux allient excellences théorique et expérimentale, en particulier dans le domaine de l'électrodynamique quantique des ions hautement chargés. Il a contribué de manière exemplaire au renforcement du partenariat scientifique franco-allemand et a construit des passerelles entre théorie et expérience au sein de la communauté scientifique internationale.



Paul Indelicato

Paul Indelicato est directeur de recherche CNRS de la classe exceptionnelle au Laboratoire Kastler Brossel de l'École normale supérieure. Il a une activité très variée, de la physique expérimentale et de l'instrumentalisation jusqu'à la physique théorique et numérique. Son activité scientifique se situe aux interfaces de la physique atomique, de la physique nucléaire, de la physique des particules et de la physico-chimie.

Côté expérimental et instrumentation, il a mené plusieurs tests de l'électrodynamique quantique (QED) en utilisant des rayons X et des ions lourds et fortement chargés, et il a mis au point un spectromètre des rayons X à double cristal. Il a effectué des mesures à haute précision de la masse du pion et du déplacement de Lamb des atomes muoniques, c'est-à-dire des atomes dans

lesquels un électron en orbite a été remplacé par un muon. Il a mesuré l'interaction forte dans l'hydrogène et le deutérium anti-protoniques.

Côté théorie et numérique, il a mis au point le code MCDF (*Multi Configuration Dirac Fock*), capable de calculer les énergies, les facteurs de Landé, ainsi que des corrections QED relativistes et hyperfines dans des atomes à plusieurs électrons, éventuellement remplacés par des muons. Plusieurs de ces travaux, tel celui sur l'expansion asymptotique de la fonction de Green pour l'équation de Dirac avec interaction coulombienne, ont été publiés dans des revues de physique mathématique. Plusieurs autres travaux concernent la variation finie de la *self-energy* d'un électron lorsqu'il est lié dans un atome.



Cécile Repellin

Prix Louis Ancel 2025 de la Société Française de Physique

Par l'originalité et la rigueur de ses travaux théoriques, et par leur impact sur la compréhension des matériaux quantiques fortement corrélés, Cécile Repellin s'impose comme une figure de premier plan dans son domaine. Le Prix Louis Ancel 2025, décerné par la Division Matière Condensée de la SFP, récompense l'ensemble de ses contributions.

Cécile Repellin a soutenu en 2015 à l'École normale supérieure une thèse portant sur l'étude numérique d'isolants topologiques fractionnaires. Elle a ensuite bénéficié d'une bourse postdoctorale Marie Skłodowska-Curie (2017-2020), puis d'une bourse de l'institut *Flatiron* (2021-2022). Elle est maintenant chargée de recherche au CNRS au Laboratoire de Physique et Modélisation des Milieux Condensés (CNRS / Université Grenoble Alpes). Elle étudie la physique des phases quantiques fortement corrélées, en développant des approches numériques avancées, comme la diagonalisation exacte ou la DMRG (*density-matrix renormalization group*), pour relier modèles microscopiques et phénomènes collectifs à N corps. Ses travaux portent en particulier sur l'ordre magnétique, les phases topologiques et l'effet Hall

quantique fractionnaire dans des matériaux bidimensionnels tels que le graphène et ses multicouches et dans les gaz quantiques.

Depuis son arrivée au CNRS en 2019, Cécile Repellin a apporté des contributions majeures à la compréhension théorique des phénomènes électroniques dans les systèmes moirés de cristaux bidimensionnels. Elle a notamment théorisé le ferromagnétisme et l'effet Hall fractionnaire anormal dans ces systèmes.

Elle a également étudié l'apparition de plateaux de conductivité de Hall et d'états isolants fractionnaires dans des systèmes bosoniques dilués. Ses travaux constituent un apport essentiel à l'interprétation des phases topologiques observées expérimentalement dans le graphène et dans les gaz atomiques ultrafroids.

Prix Jean-Louis Laclare 2025 de la Société Française de Physique

Le prix Jean-Louis Laclare 2025, décerné par la Division Accélérateurs de la SFP, a été attribué à Guillaume Ferrand. Le jury a particulièrement souligné sa très grande pluridisciplinarité, qui lui permet de passer avec aisance de la simulation numérique de phénomènes physiques complexes, à la conception de diagnostics, au design de systèmes radiofréquence ou cryogéniques, au suivi de fabrication, jusqu'au management global des projets.



Guillaume Ferrand

Guillaume Ferrand a débuté sa carrière scientifique au CEA-Saclay par une thèse de doctorat portant sur le développement d'antennes pour l'imagerie par résonance magnétique nucléaire à ultrahaut champ de Neurospin. Après une année en tant qu'ingénieur consultant dans la Société Alten, il a ensuite intégré en tant qu'ingénieur-chercheur le laboratoire d'ingénierie des structures accélératrices hyperfréquence du CEA/DACM (Département des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme).

En 2013, il est impliqué dans le projet Saraf destiné à fournir une source intense de neutrons rapides et de noyaux radioactifs en vue d'explorer les réactions nucléaires rares et de produire des radionucléides pour la médecine nucléaire. Guillaume Ferrand conçoit les cavités accélératrices supraconductrices demi-onde et leur coupleur. Il se voit ensuite confier la conception, la fabrication et la qualification des 29 cavités supraconductrices du projet.

Il a ensuite pris en charge deux programmes de R&D d'envergure, la simulation de sources d'ions et le développement d'un émittance-mètre 4D.

En parallèle, il s'est vu confier la responsabilité de la section DTL (*Drift Tube Linac* : accélérateur linéaire à tubes de dérive) dans l'avant-projet de l'accélérateur linéaire du projet ICONE, qui vise à développer un accélérateur linéaire compact de protons de haute intensité, fondé sur des technologies innovantes de cavités radiofréquence, avec l'objectif de proposer une alternative compétitive pour des applications industrielles, médicales et scientifiques nécessitant des faisceaux de neutrons secondaires performants et modulables. Il a proposé une alternative au DTL de type Alvarez en s'appuyant sur des cavités IH-DTL (*Interdigital H-mode DTL*) et a conduit les deux approches simultanément.

Note de lecture

Information quantique – Théorie et expériences

Michel Le Bellac et Isabelle Zaquine

EDP Sciences (2025, 618 pages, 49 €)

L'ouvrage *Information quantique – Théorie et expériences*, de Michel Le Bellac et Isabelle Zaquine, offre une présentation structurée et cohérente des fondements théoriques et des développements expérimentaux de l'information quantique. Le livre se distingue par une organisation claire, couvrant successivement l'information classique, les concepts fondamentaux de la physique quantique, l'intrication, les communications quantiques, la cryptographie quantique, puis les aspects logiciels et matériels du calcul quantique.

Le choix pédagogique des auteurs consiste à introduire la physique quantique à partir du *qubit*, fil conducteur de l'ensemble de l'ouvrage. Cette approche permet de faire émerger progressivement les concepts essentiels – superposition, intrication, non-clonage, matrices densité – tout en mettant en évidence leurs implications pour le traitement quantique de l'information. Le formalisme général est introduit de manière progressive, en lien étroit avec les situations physiques étudiées. L'ouvrage tient ainsi sa promesse d'une articulation effective entre théorie et expérience : les chapitres consacrés aux sources et détecteurs quantiques, aux répéteurs ou aux différentes plateformes matérielles offrent un état des lieux synthétique des dispositifs actuellement explorés en laboratoire et en développement technologique.

La dimension pédagogique est renforcée par la présence d'exercices, de problèmes et de corrigés, qui permettent au lecteur de consolider sa compréhension au fil des

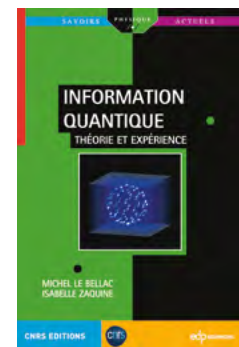
chapitres, tandis que les encadrés thématiques et le glossaire jouent le rôle de balises conceptuelles. Les auteurs veillent également à inscrire

les notions présentées dans le contexte des avancées récentes du domaine, qu'il s'agisse de la cryptographie quantique, d'algorithmes de référence comme celui de Shor, ou des problématiques centrales de correction d'erreurs et de calcul tolérant aux fautes.

Le niveau technique assumé de l'ouvrage suppose de bonnes bases en algèbre linéaire et en physique. Certains passages, notamment ceux consacrés aux codes correcteurs quantiques ou à la quantification des circuits, s'adressent clairement à un lectorat déjà à l'aise avec le formalisme mathématique. Il ne s'agit donc pas d'un ouvrage de vulgarisation, mais d'un outil de formation avancée destiné aux étudiants de master, doctorants, ingénieurs et chercheurs.

En résumé, *Information quantique – Théorie et expériences* est une référence complète et rigoureuse, offrant une vision structurée et actualisée des fondements et des réalisations de l'information quantique. À l'heure où les technologies quantiques entrent dans une phase de développement rapide et stratégique, ce livre constitue une lecture de choix pour qui souhaite acquérir une compréhension solide et actualisée du domaine.

Sara Ducci



Courrier des lecteurs

Bientôt un courrier des lecteurs dans *Reflets de la Physique*

Chers lecteurs et chères lectrices de *Reflets de la Physique*, nous vous informons du retour du courrier des lecteurs dans lequel vous pourrez exprimer vos idées sur notre revue. Ceci vous permettra de donner votre avis sur tous les aspects du magazine, de la maquette à l'équilibre des rubriques et, bien sûr, au contenu éditorial. Nous vous inviterons à réagir aux articles publiés, qu'ils soient scientifiques, historiques ou liés aux questions de société, en faisant des commentaires critiques ou en proposant des compléments. Vous pourrez nous faire part de vos idées sur les domaines de la physique que vous trouvez insuffisamment ou mal couverts et suggérer des articles ou des auteurs. Enfin, cet espace sera à votre disposition pour faire un retour à la SFP sur ses activités et son positionnement par rapport aux grands défis actuels qui concernent la science. Cette rubrique sera animée et modérée par Michèle Leduc.

Coup d'envoi dans le prochain numéro.



CONFÉRENCE INTERNATIONALE
MATÉRIAUX 2026
GRENOBLE 16-20 NOVEMBRE 2026



La conférence internationale MATÉRIAUX 2026 se tiendra du 16 au 20 novembre 2026 à Grenoble (Isère). Cet événement est organisé par la Fédération Française des Matériaux (FFM) qui regroupe 26 associations scientifiques et techniques concernées par les matériaux.

Elle s'inscrit dans la série des conférences MATÉRIAUX qui se tiennent tous les quatre ans depuis 2002 et qui se sont imposées comme l'événement francophone incontournable pour l'ensemble des acteurs académiques et industriels du monde des matériaux.

THÈMES SCIENTIFIQUES

14 colloques dans un même lieu !

Une occasion unique de rencontrer l'ensemble de la communauté francophone des matériaux.

Matériaux et enjeux sociétaux

- Matériaux et environnement
- Matériaux pour le transport et l'habitat
- Matériaux et énergies
- Matériaux et santé
- Matériaux fonctionnels et responsifs
- Matériaux pour l'électronique et l'optoélectronique
- Matériaux des patrimoines

Élaboration, caractérisations, modélisations et propriétés

- Méthodes d'analyse des matériaux
- Matériaux polymères et composites organiques
- Verres, céramiques
- Nanomatériaux, matériaux poreux et à grande surface spécifique
- Procédés et matériaux
- Genèse, optimisation des microstructures
- Surfaces, corrosion, durabilité

Date limite de soumission des résumés : 13 avril 2026.

SOCIÉTÉS SAVANTES COORGANISATRICES

ASSOCIATION AÉRONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE | ASSOCIATION FRANÇAISE DE L'ADSORPTION | ASSOCIATION FRANÇAISE DE CRISTALLOGRAPHIE | ASSOCIATION FRANÇAISE DE MÉCANIQUE | ASSOCIATION FRANÇAISE DE THERMODYNAMIQUE DES MATÉRIAUX | CENTRE FRANÇAIS DE L'ANTICORROSION | CERCLE D'ÉTUDE DES MÉTAUX | CONFÉDÉRATION FRANÇAISE POUR LES ESSAIS NON-DESTRUCTIFS | GROUPE FRANÇAIS DES ARGILES | GROUPE FRANÇAIS DE LA CÉRAMIQUE | GROUPE FRANÇAIS DES ZÉOLITHES | GROUPE FRANÇAIS D'ÉTUDES ET D'APPLICATIONS DES POLYMÈRES | GROUPE FRANÇAIS DE SPECTROSCOPIES VIBRATIONNELLES | GROUPE FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX | SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE | SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES MICROSCOPIES | SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE MÉTALLURGIE ET DE MATÉRIAUX | SOCIÉTÉ FRANCOPHONE D'ÉTUDE DES CARBONES | SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS | SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE LA NEUTRONIQUE | SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE | UNION POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE VERRIÈRES





JMC 2026

**Journées de la Matière
Condensée**

26-30 octobre 2026

Toulouse

Le plus grand congrès
de physique de la matière
condensée en France

Près de 25 conférences plénières
et semi-plénières ainsi que
40 mini-colloques



Dates clés :

15 avril 2026 : ouverture
des inscriptions et soumissions

30 mai 2026 : date limite
pour la soumission des résumés



| Plus d'infos : <https://jmc2026.sciencesconf.org>