

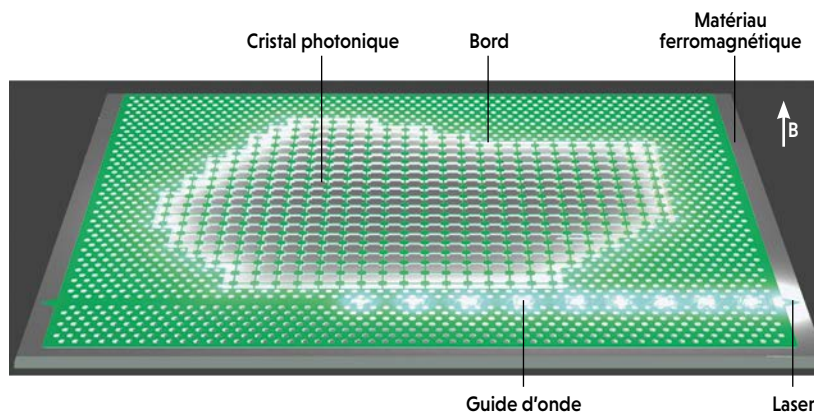
lumière-matière, les excitons-polaritons, dont nous avons déjà évoqué l'intérêt pour constituer un superfluide de lumière. Ici, en raison de leur partie électronique, ces quasi-particules ont une activité magnétique pour des ondes se propageant à des fréquences optiques.

Ainsi, en 2015, notre équipe a montré théoriquement qu'en plaçant ces excitons-polaritons dans un réseau périodique approprié, il était possible d'obtenir un analogue polaritonique de l'effet Hall quantique anormal. L'observation expérimentale de cet effet vient d'être rapportée par le groupe de Sven Höfling, de l'université de Würzburg, en Allemagne. Nous avons aussi montré qu'il était possible d'utiliser cet effet pour réaliser des micro-isolateurs photoniques fonctionnant à des longueurs d'onde optiques, ce qui est un prérequis indispensable à leur utilisation pratique. En garantissant un transport non réciproque, ces micro-isolateurs, placés en série après une diode laser, empêchent la lumière de revenir dans la diode et d'en perturber le fonctionnement. Nous sommes donc en passe de résoudre le problème de la photonique intégrée et de la question du transport non réciproque.

## UN LASER INTÉGRÉ

La richesse du domaine nous permet d'aller plus loin encore, avec le développement des lasers topologiques. Notre équipe a proposé cette idée en 2016 : l'effet laser se développerait directement dans un état topologiquement protégé, ce qui permet d'intégrer dans le même composant le laser et l'isolateur. Dès 2017, le groupe de Jacqueline Bloch, au C2N (le Centre de nanosciences et de nanotechnologies, à Palaiseau, près de Paris), a concrétisé cette idée dans des réseaux à une dimension. La même année, Boubacar Kanté, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont fait état d'un laser topologique bidimensionnel, fondé sur l'effet Hall quantique anormal (voir l'image ci-dessus).

Cette démonstration résulte d'un tour de force technique, à savoir obtenir un effet magnétique pour des modes photoniques aux fréquences « télécoms » proches de l'optique. En effet, les semi-conducteurs ont normalement une faible réponse magnétique dans ce domaine de longueurs d'onde. L'équipe de Boubacar Kanté a combiné son réseau bidimensionnel avec un matériau ferromagnétique qui amplifie l'effet d'un champ magnétique appliqué, en permettant aux électrons du semi-conducteur de ressentir une intensité de champ d'une quinzaine de teslas. Ce champ magnétique a permis la formation d'un gap topologique, et l'existence d'un état de bord unidirectionnel autour du cristal photonique. Ce dispositif s'est aussi comporté comme une cavité où l'effet laser s'est développé. Une partie de la lumière était ensuite



En 2017, Boubacar Kanté et son équipe ont mis au point un laser topologique. Sur un matériau ferromagnétique qui amplifie un champ magnétique  $B$ , les chercheurs ont gravé un cristal photonique dans un matériau semi-conducteur au bord duquel se développe un mode photonique unidirectionnel. Ce système forme une cavité où l'émission stimulée du laser se développe. Un guide d'onde placé à proximité permet d'extraire la lumière.

extraite en couplant le dispositif à un guide d'onde. Grâce au caractère unidirectionnel du mode topologique du dispositif, une onde rétro-diffusée dans le guide d'onde ne pénètre pas dans la cavité laser. Le dispositif se comporte donc comme un laser suivi d'un isolateur, les deux intégrés dans la même structure.

En 2018, Mordechai Segev, du Technion, en Israël, et ses collègues ont développé un autre type de laser topologique, cette fois fondé sur un analogue de l'effet Hall quantique de spin et l'utilisation d'un réseau de résonateurs couplés similaire à celui considéré par Mohammad Hafezi (voir l'image page 65). Il n'y a cette fois pas besoin de champ magnétique externe, mais il n'y a pas non plus d'unidirectionnalité (puisque l'on a seulement des pseudo-spins et non des spins comme pour les électrons). L'amplification laser se développe dans les deux composantes de spins se propageant chacune dans une direction opposée.

Récemment, notre équipe a proposé de combiner la notion de superfluide et de topologie des bandes d'énergie pour obtenir un nouvel analogue de l'effet Hall quantique de spin. Dans ce cas, le rôle du spin est assuré par le sens de l'enroulement des vortex du superfluide de lumière. Cette quantité étant elle-même topologiquement protégée, la conservation du spin est garantie et le caractère non réciproque du transport topologique est entièrement restauré. Il reste à mettre en œuvre cette idée.

Les développements de ces dernières années sont impressionnants. Grâce à la topologie, nous sommes en mesure d'imaginer une grande variété de solutions théoriques à la question du transport non réciproque, dont certaines ont été réalisées expérimentalement. Ces résultats sont encourageants et l'intérêt de ces systèmes est incontestable. Le développement de micro-isolateurs optiques et leur intégration semblent un objectif à portée de main, ce qui ouvrira la voie aux circuits intégrés optiques de demain. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- B. Bahari et al., **Nonreciprocal lasing in topological cavities of arbitrary geometries**, *Science*, vol. 358, pp. 636-640, 2017.
- P. St-Jean et al., **Lasing in topological edge states of a one-dimensional lattice**, *Nature Photonics*, vol. 11, pp. 651-656, 2017.
- D. Solnyshkov et al., **Kibble-Zurek mechanism in topologically nontrivial zigzag chains of polariton micropillars**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, 046402, 2016.
- A. V. Nalitov et al., **Polariton Z topological insulator**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 114, 116401, 2015.
- F. D. M. Haldane et S. Raghu, **Possible realization of directional optical waveguides in photonic crystals with broken time-reversal symmetry**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, 013904, 2008.
- F. D. M. Haldane, **Model for a quantum Hall effect without Landau levels**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, pp. 2015-2018, 1988.

## JEAN-PAUL MOATTI

est président-directeur général de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et président de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (Allenvi). Il est l'un des quinze experts nommés par l'ONU pour rédiger le rapport 2019 sur les Objectifs de développement durable (ODD) fixés pour 2030.

# La science doit jouer son rôle pour garantir un monde durable



© IRD-Studio Cabrelli

## En 2015, l'Organisation des Nations unies (ONU) a fixé des objectifs de développement durable (ODD). Quatre ans plus tard où en est-on ?

La situation est loin d'être satisfaisante. Les 17 objectifs définis en 2015 ont été déclinés en 169 cibles et un nombre très limité d'entre elles sont en voie d'être atteintes en 2030 ! Il s'agit, par exemple, de la baisse de la mortalité infantile, de l'accès à l'éducation primaire y compris pour les filles et de la réduction de l'extrême pauvreté. Mais même pour ces objectifs-là, il est difficile de crier victoire. D'abord parce que ces indicateurs sont obtenus en extrapolant linéairement la tendance actuelle, ce qui est une hypothèse discutable. Ensuite, parce que ces indicateurs reflètent des moyennes mondiales et masquent les grandes disparités réelles. Plus de la moitié de l'extrême pauvreté (personnes vivant avec moins de 1,9 dollar par jour) se concentre par exemple dans cinq pays, en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud.

## Sur la réduction de la pauvreté, vous appelez à une grande vigilance, pourquoi ?

Entre 2000 et 2017, un milliard de personnes sont sorties de l'extrême pauvreté. C'est bien sûr une bonne nouvelle. Néanmoins, la littérature scientifique montre que ce résultat est fragile, d'abord parce que sur la même période le nombre de personnes vivant entre 2 et 3 dollars par jour a lui augmenté de un milliard et que ces individus demeurent vulnérables aux crises économiques

Fin septembre, les chefs d'État se réunissent au siège des Nations unies, à New York, à l'occasion du premier bilan du Programme de développement durable fixé en 2015 pour l'horizon 2030. Jean-Paul Moatti, PDG de l'IRD et rapporteur pour l'ONU, tire la sonnette d'alarme : l'agenda n'est pas tenu. Pourtant nous connaissons la clé pour avancer enfin : renforcer la *Sustainability science*, une science interdisciplinaire au service du développement durable.

ou écologiques et aux situations de conflit. Ensuite parce que la pertinence de ce seuil monétaire est très discutée car il ignore le caractère multidimensionnel de la pauvreté.

L'autre motif d'inquiétude est l'accroissement sans précédent des inégalités. Les 1 % les plus riches de la planète détenaient 25 à 30 % de la richesse mondiale en 1980, pour 40 % en 2016, alors que les 75 % les plus pauvres stagnaient autour de 10 % seulement du total. Il faut aussi en finir avec l'idée fausse selon laquelle, pour éliminer la pauvreté, il suffit d'augmenter la croissance quitte à creuser les inégalités. Soit-disant parce que par un effet de ruissellement, la richesse amassée par les plus riches finirait par profiter >





> aussi aux plus pauvres. Les données le démentent. Depuis les années 1980, les 1 % les plus riches captent 27 % de la croissance des revenus, tandis que les 50 % les plus pauvres en perçoivent 12 % ! Ce que montrent les analyses aujourd'hui c'est qu'il est possible de concilier la lutte contre la pauvreté et les inégalités, l'amélioration du bien-être social avec la protection des écosystèmes planétaires. Et que la défense des modèles actuels par les plus riches pour conserver leur position est une entrave inquiétante au développement durable pour tous.

### Quid des autres objectifs ciblés ?

Pour toute une part d'entre eux, nous ne sommes pas du tout sur la bonne voie. Mais plus inquiétant encore, comme pour les inégalités, nous allons dans le mauvais sens dans plusieurs domaines clés : les émissions de gaz à effet de serre, l'empreinte écologique de nos modes de production, la chute de la biodiversité qui s'est accélérée entre 2015 et 2019. C'est très préoccupant car si on ne tient pas ces objectifs-là, les autres seront vains. Si certaines régions deviennent totalement inhabitables à cause du réchauffement climatique, envoyer les filles à l'école ou garantir à tous l'accès à Internet à un coût abordable ne seront plus des sujets ! Tant que l'on poursuivra avec un modèle qui ne tient pas compte de son coût environnemental on ira dans la mauvaise direction ; le groupe d'experts indépendant en charge de rédiger le rapport d'évaluation des ODD lance un cri d'alarme et un appel à la prise de conscience de l'urgence d'agir. Cela concerne d'abord les gouvernements, mais passe aussi par une réorientation massive des investissements du secteur privé vers le développement durable ainsi que par une mobilisation de la société civile.

### Malgré le côté alarmant de la situation, vous parlez d'une opportunité historique. Pourquoi ?

En 2015, les négociations qui ont abouti aux ODD ont bénéficié d'une conjoncture historique particulière. Deux facteurs ont joué en faveur de compromis intéressants. Premièrement, dans le climat de post-crise économique mondiale, beaucoup de pays à revenus intermédiaires, comme la Colombie, le Costa Rica, l'Afrique du Sud, ne voulant pas être en reste, se sont emparés des négociations. Deuxièmement, ces négociations n'ont pas été le seul fait des gouvernements. La société civile et le secteur privé en ont été des acteurs importants. Tout comme les scientifiques, rompus à ce type d'exercice depuis le sommet de Rio de 1992 et les conférences successives sur le climat et la biodiversité. Aujourd'hui, vu le contexte politique, le monde de la recherche n'arriverait plus à se faire entendre. Et des cibles comme la couverture maladie universelle ou même la lutte contre le réchauffement climatique auraient plus de mal à recueillir un consensus multilatéral.

## UNE « BOÎTE NOIRE » CONTRE LA MORTALITÉ MATERNELLE

« Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge » est l'un des 17 objectifs de développement durable de l'ONU. Pour réduire la mortalité maternelle dans les pays en développement de l'Afrique de l'Ouest, où 1 femme sur 100 meurt en couches à l'hôpital, Alexandre Dumont, épidémiologiste, directeur de recherche IRD, et son équipe ont développé un outil innovant. S'inspirant d'une approche ayant fait ses preuves dans la sécurité du transport aérien pour tirer les leçons des accidents, ils ont mis au point une méthode d'audit systématique de chaque décès pour en comprendre les causes, détecter les failles et les erreurs. L'idée est de

décrypter cette « boîte noire » afin d'améliorer les soins et l'organisation des services obstétricaux. En testant cette approche dans 46 maternités sénégalaises et maliennes, soit un suivi de 190 000 cas en 4 ans, ils ont constaté une réduction de 15 % de la mortalité, allant même jusqu'à 35 % dans certains petits hôpitaux. Les chercheurs montrent aussi que ces audits qui remettent l'humain au centre du dispositif sont bien acceptés, faciles à utiliser, abordables et transposables à différents contextes. Preuve que les avancées en matière de lutte contre la mortalité ne passent pas toujours par de nouveaux traitements de pointe ou d'outils de diagnostic révolutionnaires.



© IRD - V. Briand

### Quel est aujourd'hui le rôle de la science pour atteindre ces objectifs ?

Le rôle de la science est crucial : elle est indispensable pour guider les scénarios à mettre en place. On le voit bien sur des sujets complexes comme la sortie des pesticides. Il faut des recherches à un niveau fondamental pour trouver des moyens de production plus sains, que ce soit en biologie ou en agroécologie, mais aussi sur les pratiques et sur le modèle global d'agriculture. Il ne s'agit pas de remplacer un modèle par un autre qui se révélerait peu vertueux. La science doit aider à maximiser les bénéfices visés et à éviter les effets pervers. Pour autant, que mon message soit clair, nous avons aujourd'hui les connaissances scientifiques et technologiques suffisantes pour atteindre potentiellement de nombreuses cibles en 2030. Il faut s'en







donner les moyens. Selon les estimations à peu près consensuelles, pour aider les pays du Sud à se placer sur une trajectoire de développement durable, il faudrait 2,5 trillions – mille milliards – de dollars par an. C'est un peu plus de 10 % de l'investissement annuel mondial économique et financier qui est autour de 23 trillions de dollars et moins de la moitié de l'impact total, direct et indirect, des subventions aux combustibles fossiles. L'enjeu est donc d'orienter des moyens publics et privés suffisants vers le développement durable !

### Pouvez-vous nous donner un exemple concret ?

Prenons celui de la surpêche et de la surexploitation des écosystèmes marins. Il y a quelques années, les aires marines protégées (l'équivalent des parcs nationaux en mer) passaient encore pour des projets écologiques idéologiques. Aujourd'hui, les scientifiques sont unanimes : à condition d'être bien gérées avec les bons niveaux de réglementation, elles sont vraiment le moyen d'assurer la bonne santé des écosystèmes marins tout en continuant à procurer des services aux humains.

Mais cela ne fonctionne que si les pêcheurs sont impliqués en amont et ne se retrouvent pas sans revenus. Si les pêcheurs ne survivent pas, on rate l'objectif ! La science est indispensable pour définir le temps et les moyens nécessaires au dispositif afin d'atteindre les bénéfices écologiques et économiques visés.

### Est-ce cela la *Sustainability science* ?

Oui, ce champ scientifique a émergé en lien avec les réflexions sur le développement durable et la nécessité de partir des problèmes posés et non plus des seules questions disciplinaires, pour proposer des solutions et anticiper les arbitrages difficiles et complexes qu'impliquent les ODD. La *Sustainability science*, la science de la durabilité, est montée en puissance au tournant des années 2000, au moment où la globalisation s'est heurtée au problème des limites des ressources planétaires. On pourrait la définir comme la science des interactions entre environnement et société qui recherche les moyens de créer un équilibre durable entre santé planétaire et bien-être humain. Comme elle s'attache à comprendre toute la chaîne causale des phénomènes écologiques et sociaux qu'elle étudie, elle doit intégrer les effets clés à toutes les échelles, du local au global, et est donc par nature interdisciplinaire. Elle a aussi une autre caractéristique, celle d'inciter les scientifiques à travailler avec les communautés impliquées et à élaborer des solutions pour et avec tous les acteurs sur le terrain (*lire les encadrés*).

En 1999, l'Académie des sciences américaine a fait de la *Sustainability science* une priorité, ainsi que l'Académie chinoise, en 2009. Depuis, la production scientifique consacrée à ce domaine ne cesse de croître de façon exponentielle.

### Beaucoup d'objectifs paraissent antagonistes. En quoi la *Sustainability science* peut-elle aider à résoudre ces contradictions ?

Tous les objectifs sont potentiellement contradictoires et ils sont tous potentiellement synergiques ! Si on travaille seulement objectif par objectif, on risque d'en améliorer un au détriment de l'autre. Une étude publiée récemment dans *Nature Sustainability* montrait par exemple comment, si on n'y prend garde, des politiques mal conçues d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> pourraient augmenter le nombre de personnes souffrant de faim, via des effets sur l'usage des terres. C'est d'ailleurs sur ces interdépendances des différents objectifs que la littérature spécialisée s'est concentrée ces cinq dernières années. C'est aussi sur le terrain à l'échelle locale qu'on peut lever les contradictions, d'où la nécessité des collaborations avec des scientifiques des pays impliqués, notamment dans la zone intertropicale et méditerranéenne comme nous le faisons par essence à l'IRD : plus de 60 % de nos publications sont cosignées par des partenaires des pays du Sud. ■

## LA NOUVELLE DONNE DU QUINOA BOLIVIEN

L'engouement planétaire pour le quinoa et ses répercussions sur les communautés rurales pauvres du sud de la Bolivie sont un cas exemplaire des transformations de pratiques ancestrales locales qui accompagnent la globalisation. Saines, bio, équitables, en 40 ans, les « graines des Incas » ont vu leur consommation exploser à l'échelle mondiale. Entre 2012 et 2014, les exportations vers les États-Unis et l'Europe ont augmenté de 260 % et le prix de la tonne a atteint les 9000 dollars. Une aubaine économique pour les familles qui cultivent le quinoa dans les

conditions extrêmes des hauts plateaux andins arides et froids. Un risque aussi : celui de déstabiliser tout leur système agricole, écologique et social. Comment gérer un tel changement d'échelle et de mode de production tout en conciliant durabilité et justice sociale ? Le projet de recherche immersive coordonné par Thierry Winkel, agroécologue à l'IRD, et coconstruit avec ces communautés rurales, avait pour but de les aider à élaborer elles-mêmes des solutions pérennes. Durant 3 ans, chercheurs et producteurs ont analysé et anticipé ensemble et sur le terrain les scénarios possibles. Ces communautés ont alors choisi de rénover les normes d'usage de leur bien commun – les terres – afin de protéger la ressource, garantir un accès juste pour tous et répondre ainsi aux critères internationaux du commerce équitable. Selon ces travaux, c'est la cohésion sociale, l'autonomie de la gouvernance et la tradition de mobilité qui, comme dans d'autres régions arides dans le monde, confèrent à ces communautés leur capacité d'adaptation.



© IRD - J.-P. Raffillac



Jusqu'en 1945, John Eccles voyait dans l'électricité la seule source de la communication neuronale. Puis il décida de mettre à l'épreuve sa propre théorie... et l'invalida. Il bascula alors vers une vision chimique de la transmission de l'influx nerveux.

