vers des stations séparées (de 184 mètres dans l'expérience du NIST, de 60 mètres dans l'expérience de Vienne) où l'on mesurait les états de polarisation. La direction de mesure était décidée pendant le temps de vol des photons, ce qui éliminait la faille de localité.

Pour la faille de détection, il fallait récupérer plus des deux tiers des photons intriqués pour que l'on soit sûr d'avoir un échantillon représentatif. Au NIST, nous avons développé des détecteurs de photons uniques ultraperformants et constitués de matériaux supraconducteurs froids. Ces capteurs sont capables d'observer plus de 90% des photons qui les atteignent. La faille de détection était ainsi supprimée.

En répétant plus de 100 000 fois par seconde ces mesures, nous avons très vite accumulé des résultats statistiques significatifs sur les corrélations entre les états de polarisation des photons ; les corrélations observées dans les deux expériences étaient beaucoup plus fortes que celles prédites par les théories à variables cachées. De fait, la probabilité que les résultats du NIST soient le fruit du hasard est de l'ordre de un milliardième, et les chances sont encore plus faibles avec l'expérience viennoise. Aujourd'hui, le groupe du NIST utilise une version améliorée du dispositif pour violer les inégalités de Bell à un degré similaire en moins de une minute, et des perfectionnements attendus accéléreront encore le processus de deux ordres de grandeur.

DES GÉNÉRATEURS D'ALÉA

Ces expériences nous obligent à conclure que tous les modèles à variables cachées, tels ceux que soutenait Einstein, sont incompatibles avec la nature. Les corrélations que nous avons observées entre particules défient notre intuition, et nous démontrent que la fantomatique action à distance a bien lieu.

Nos résultats mettent aussi en avant la remarquable puissance de l'intrication pour d'éventuelles applications. À court terme, une situation où des tests de Bell sans faille seraient utiles est la génération de nombres aléatoires. De nombreuses techniques de cryptographie reposent sur la capacité à produire des nombres aléatoires. Or, en pratique, ces derniers sont difficiles à produire. Les générateurs de nombres aléatoires sont loin d'être infaillibles et s'il est possible d'anticiper les nombres qu'ils produisent, de nombreux systèmes financiers et de communication seraient en danger. Une bonne source de nombres aléatoires est donc d'une importance cruciale.

Pour générer des nombres aléatoires, on recourt le plus souvent à des algorithmes ou à des processus physiques. Avec les algorithmes, si l'on connaît les paramètres utilisés comme valeurs initiales, il est souvent possible de prédire le résultat. Avec les processus physiques, une compréhension détaillée de la physique sous-jacente du système est nécessaire. Il suffit qu'un détail vous échappe, et un pirate exploitera cette faille. L'histoire de la cryptographie regorge d'exemples de générateurs de nombres aléatoires des deux types qui ont été cassés.

La physique quantique est une aubaine pour ces applications. Il est possible d'« extraire » le hasard inhérent aux processus quantiques afin de produire des nombres véritablement aléatoires. On peut convertir les corrélations mesurées dans un test de Bell sans échappatoire en une chaîne de nombres aléatoires. En 2018, l'équipe du NIST a utilisé son dispositif pour produire 1024 bits véritablement aléatoires à partir de 10 minutes de données expérimentales. La violation des inégalités de Bell garantit que la chaîne de bits est aléatoire.

Il est possible de quantifier la robustesse du système : il y a une chance sur un billion que la chaîne de bits du NIST ne soit pas parfaitement aléatoire. En comparaison, il faudrait plusieurs centaines de milliers d'années à un générateur classique de nombres aléatoires pour acquérir assez de données assurant une telle qualité d'aléa. Les chercheurs travaillent maintenant à développer un outil public : le générateur servirait de source de référence de nombres aléatoires datés et transmis sur internet à intervalles fixes pour être utilisés dans des applications de sécurité.

Plus généralement, les techniques développées dans les expériences de Bell sans faille rendraient possibles le déploiement de nouveaux types de réseaux de communication. De tels réseaux, qui constituent ce que l'on appelle souvent l'« internet quantique », effectueraient des tâches dépassant les capacités des réseaux classiques. Un internet quantique garantirait des communications sécurisées, la synchronisation des horloges, et bien d'autres tâches sensibles.

De tels projets reposent sur l'intrication quantique et la qualité des dispositifs, comme dans nos expériences. En 2017, l'équipe de Delft a fait la démonstration d'une méthode pour améliorer la qualité des spins intriqués, et en 2018, elle a amélioré ses taux d'intrication de trois ordres de grandeur. En s'appuyant sur ces progrès, les chercheurs travaillent au développement d'une première version rudimentaire d'un internet quantique qui devrait être déployé en 2020 dans quelques villes des Pays-Bas.

Il y a quatre-vingts ans, quand la théorie quantique faisait ses débuts, les sceptiques se chagrinaient de sa contradiction apparente avec des siècles d'intuition physique. Désormais, quatre expériences ont asséné le coup final à cette intuition ; mais, en même temps, ces résultats ont ouvert une porte pour exploiter la nature d'une façon que ni Einstein ni Bell n'avaient anticipée. La révolution silencieuse que John Bell a mise en branle bat maintenant son plein. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Maldacena, **L'intrication quantique est-elle un trou de ver ?**, *Pour la Science*, n° 475, mai 2017.

B. Hensen *et al.*, **Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers**, *Nature*, vol. 526, pp. 682-686, 2015.

M. Giustina *et al.*, **Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250401, 2015.

L. K. Shalm *et al.*, **Strong loophole-free test of local realism**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250402, 2015.

L'ESSENTIEL

> Les Balo sont de petites bactéries qui se nourrissent exclusivement d'autres bactéries.

> Contrairement à d'autres bactéries prédatrices, elles chassent en solitaire.

> Depuis quelques années, on s'aperçoit que les Balo sont présents partout où on les cherche et que ce sont sûrement de puissants régulateurs écologiques.

> Leurs applications potentielles sont multiples, notamment dans la lutte contre l'antibiorésistance.

LES AUTEURS

STÉPHAN JACQUET
directeur de recherche à l'Inra, au Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques et écosystèmes limniques, à Thonon-les-Bains

JADE EZZEDINE
doctorant au sein du même laboratoire

Ces bactéries qui en dévorent d'autres

Dans les profondeurs des grands lacs de montagne et ailleurs, des bactéries se nourrissent de leurs semblables avec une efficacité redoutable. Nommées Balo, ces bactéries prédatrices offrent une alternative prometteuse aux antibiotiques.

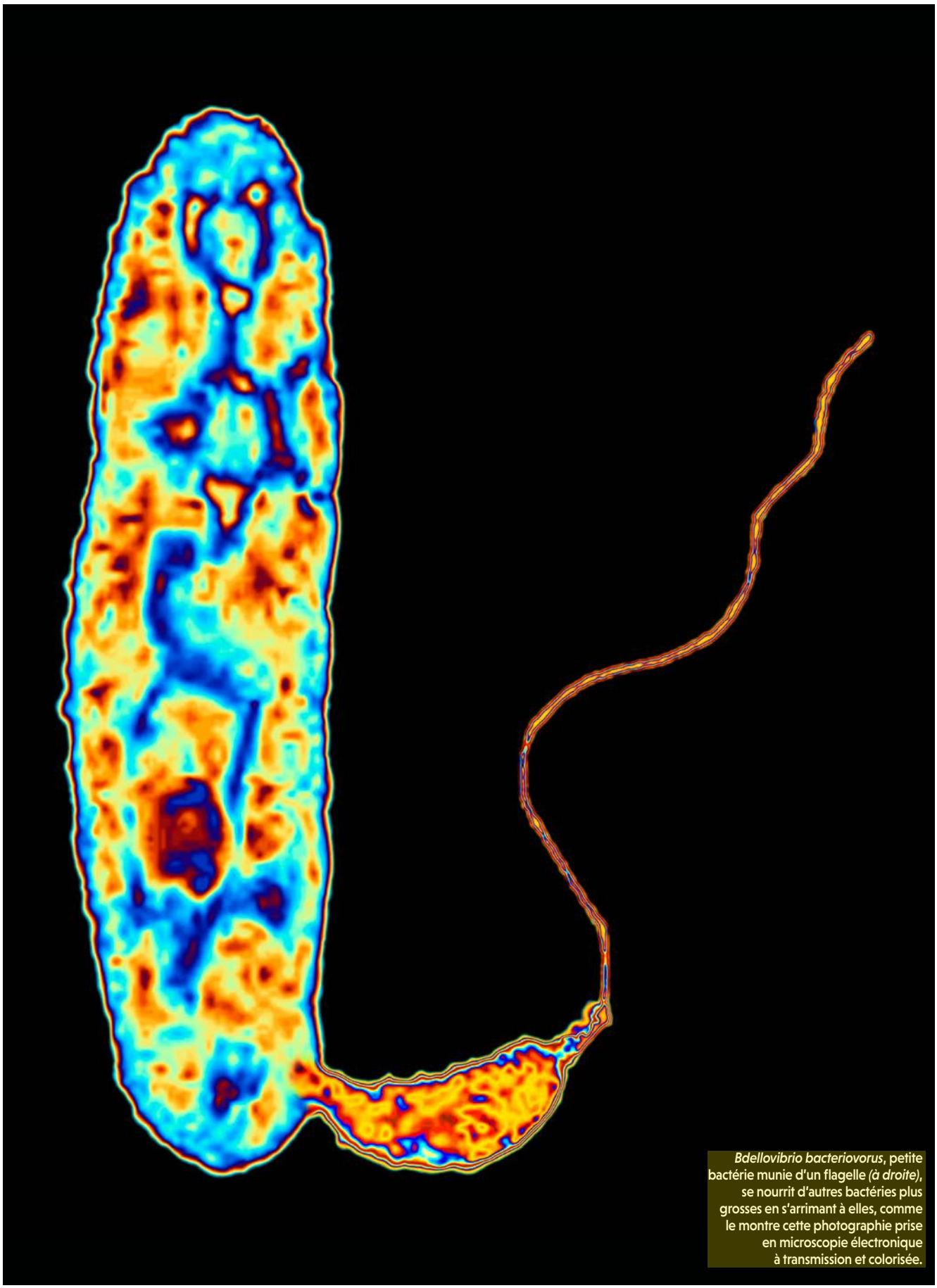
Au beau milieu du Léman, le plus grand lac naturel profond d'Europe occidentale, l'attaque a été foudroyante. Peu de chance d'en réchapper ! La victime est une bactérie aquatique, *Limnohabitans planktonicus*, dont la taille ne dépasse pas deux micromètres. Sa prédatrice… est aussi une bactérie, plus petite. Du genre *Peredibacter*, elle se délecte de ses semblables. La proie, qui se nourrissait de matière organique dissoute libérée par le phytoplancton alentour, n'a rien senti venir. Force est de constater que la loi de la jungle s'applique aussi au monde microbien.

Les bactéries aquatiques jouent un rôle fonctionnel clé au sein des écosystèmes, ce qui n'empêche pas qu'elles soient les proies de prédateurs ou de parasites très efficaces. Outre les bactériophages ou phages – des virus mangeurs de bactéries –, qui se sont révélés, au cours des trois dernières décennies, un facteur majeur de régulation de l'abondance des bactéries dans les milieux aquatiques et de leur diversité, d'autres prédateurs, comme les organismes unicellulaires flagellés, les ciliés ou certains métazoaires appartenant au zooplancton (ou plancton animal), sont bien connus des biologistes. Les bactéries qui se nourrissent de leurs consœurs le sont moins, mais depuis peu, on s'accorde à y voir un groupe qui compte aussi dans le contrôle des populations bactériennes. Certaines sont regroupées dans un groupe fonctionnel, les *Bdellovibrio* et organismes apparentés ou Balo (pour *Bdellovibrio and like organisms*).

Depuis quelques années, grâce aux nouvelles techniques de séquençage et de manipulation génétique, de bio-informatique et de microscopie, on commence à mieux connaître ces bactéries et leur impact écologique. Au point d'en faire de sérieux candidats dans la lutte antibactérienne en aquaculture, mais aussi en agriculture et en médecine.

UNE DÉCOUVERTE FORTUITE

En sciences, le hasard est parfois un facteur important d'innovation. La poussée d'Archimède, la radioactivité, la pénicilline, l'ADN et nombre d'autres avancées sont ainsi les fruits >



Bdellovibrio bacteriovorus, petite bactérie munie d'un flagelle *(à droite)*, se nourrit d'autres bactéries plus grosses en s'arrimant à elles, comme le montre cette photographie prise en microscopie électronique à transmission et colorisée.

> de découvertes fortuites. C'est aussi le cas des Balo. Un jour de 1962, l'année de la mort de Marilyn Monroe et de l'arrestation de Nelson Mandela, le microbiologiste allemand Heinz Stolp menait une expérience à l'Institut de bactériologie de Berlin pour isoler des bactériophages spécifiques des bactéries *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*, responsables de la graisse du haricot. Durant ce travail, Stolp, à court des filtres qu'il utilisait pour obtenir des échantillons non contaminés par des bactéries, décida de les remplacer par des filtres en verre fritté, bien qu'ils soient moins sélectifs et susceptibles de laisser passer des cellules de taille supérieure à celle de la maille de ses filtres habituels (0,2 micromètre).

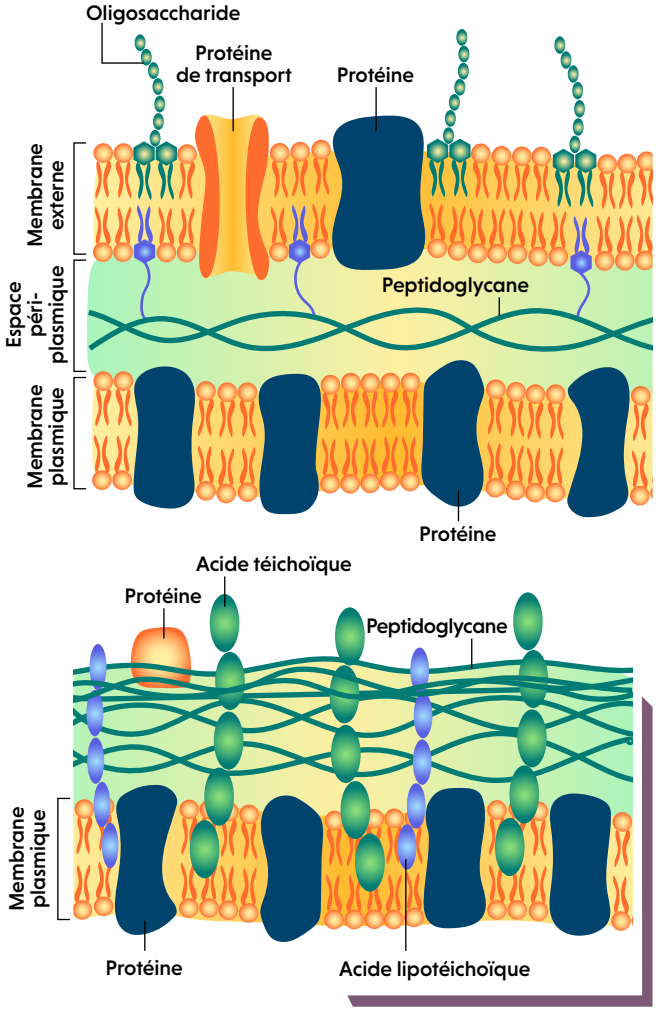
Pour détecter des bactériophages, une méthode consiste à observer sur boîte de culture ce que l'on appelle des « plages de lyse », c'est-à-dire des trous qui se forment rapidement au sein des colonies bactériennes en réponse au succès de l'infection virale des bactéries. Stolp a donc laissé incuber ses boîtes de bactéries avec ses échantillons en espérant y observer le lendemain des plages de lyse. Cependant, ce ne fut pas le cas, aucun trou n'était visible. Naturellement, Stolp aurait dû se débarrasser de ces boîtes, mais il les conserva deux jours supplémentaires. Or, contre toute attente, des plages de lyse tardives apparurent ! Intrigué, Stolp examina ces trous au microscope. Et ce qu'il vit fut une incroyable surprise : des bactéries se déplaçant à vive allure, s'attachant parfois à certaines cellules… jusqu'à les détruire. Des bactéries prédatrices de bactéries !

En 1963, après avoir isolé et étudié ces microorganismes, Stolp et son collaborateur Mortimer Starr, de l'université de Californie à Davis, les ont nommées *Bdellovibrio*, du grec *Bdella* signifiant « sangsue » (l'attachement du Balo à sa proie et la succion du contenu cellulaire rappelant le mode d'action des sangsues) et *vibrio*, qui renvoie à la forme en virgule de

DES BACTÉRIES À GRAM NÉGATIF

Les Balo sont des bactéries à Gram négatif et se nourrissent… de bactéries à Gram négatif. Pourquoi ? La réponse n'est pas claire. La distinction entre bactéries à Gram positif et négatif ne constitue ni un critère fonctionnel ni un critère de classification, mais provient de la coloration dite de Gram. Du nom de son inventeur, le bactériologiste danois Hans Christian Gram (1853-1938), ce protocole de coloration des membranes bactériennes fait apparaître les bactéries à Gram négatif en rose et celles à Gram positif en violet. Aujourd'hui, on sait que ces couleurs correspondent à deux structures distinctes de l'enveloppe bactérienne et que certains antibiotiques, par exemple, fonctionnent mieux sur telle ou telle structure. Celle des bactéries à Gram négatif *(ci-contre en haut)* est à double membrane organisée en trois parties. En périphérie, la membrane externe est composée de phospholipides et de protéines intrinsèques, notamment de transport. Les bactéries à Gram positif *(ci-contre en bas)* en sont dépourvues. Puis, un espace dit périplasmique comportant la paroi – une couche de peptidoglycanes relativement mince, contrairement à celle des bactéries à Gram positif – sert notamment de stockage d'enzymes et de nutriments. Enfin, la membrane plasmique, commune aux deux types de bactéries, est très semblable à la membrane externe, mais contient de nombreux autres complexes protéiques d'une importance vitale pour le métabolisme.

Pour expliquer pourquoi les Balo se nourrissent préférentiellement de bactéries à Gram négatif, une hypothèse est que les Balo reconnaissent des composants de la membrane externe, voire du périplasme. Il a en effet été suggéré qu'au contact d'une proie potentielle, des biopolymères du prédateur reconnaîtraient certains sucres ramifiés (des oligosaccharides) à la surface de la paroi bactérienne, présents uniquement chez les bactéries à Gram négatif. Toutefois, on a aussi proposé que, dans certaines conditions de laboratoire, en présence uniquement de bactéries à Gram positif, certains Balo se nourrissent de ces dernières. Le prédateur changerait alors de mode de prédation. Au lieu de consommer la proie en la pénétrant, il la consommerait de l'extérieur, grâce à la production rapide de nouvelles enzymes adaptées à la paroi de ces proies. Néanmoins, ce scénario n'a pas encore été observé.



© Assya Paloma