

science Le Monde & médecine



Les nouveaux paradoxes de la physique quantique

« Out of Joint », 2019, travail sur une photo vintage de Kensuke Koike, artiste japonais. KENSUKE KOIKE

Omniprésente dans les nouvelles technologies, la physique quantique façonne notre quotidien. Pourtant, elle met en déroute l'intuition commune et trouve le moyen de surprendre encore dans ses derniers développements

DAVID LAROUSSERIE

Avertissement au lecteur. Ce qui va suivre peut étonner, troubler, choquer, au point de faire douter d'avoir bien lu. Pourtant, les personnages sont réels, les expériences validées par la communauté scientifique et reproduites. Mais « ne tentez pas cela chez vous », comme préviennent les retransmissions de catch. L'usage des concepts, conclusions, réflexions rapportés ici doit être réservé aux professionnels sous peine de dérapages incontrôlés et d'extrapolations risquées.

Il ne s'agit cependant que d'un coup de projecteur sur un monde en ébullition autour d'une théorie presque centenaire, la mécanique quantique. Elle est la meilleure, avec la relativité générale, pour décrire la nature qui nous entoure, qu'il s'agisse du bleu du ciel, de la vie des étoiles ou de la solidité d'une table. Son exploitation technologique a fourni les lasers, les ampoules LED, les mémoires et processeurs informatiques des téléphones et ordinateurs... Mais, depuis ses débuts, elle charrie aussi tout un tas de questions, bizarreries ou paradoxes qui enflamment les physiciens tout autant que les philosophes. Elle autorise un objet à être dans deux états contradictoires à la fois, comme si un chat pouvait être et mort et vivant. Ses créatures sont des Janus mi-onde mi-particule, qui peuvent passer par deux endroits simultanément. Elle permet des interactions instantanées à des distances infinies... Tels sont les premiers concepts au maniement déjà risqué. Désormais, il y a pire. Ces dernières années, les physiciens ont découvert de nouveaux paradoxes.

Les faits sont relatifs et dépendent de leurs observateurs. Respirez.

Les choses comptent moins que les relations entre ces choses. Méditez.

Les effets peuvent précéder les causes, et il n'est parfois pas possible de distinguer quel événement est arrivé avant l'autre. Relisez.

Comme au pays merveilleux d'Alice, le sourire d'un chat peut demeurer, alors que le chat n'est plus là... Imaginez.

Tout ça, forcément, est déconcertant. « *On marche sur des œufs lorsque nous utilisons de telles expressions. Elles risquent d'être récupérées par des absurdités du genre médecine quantique, télépathie, paranormal...* », prévient Carlo Rovelli, professeur de physique à Aix-Marseille Université, par ailleurs attaché à l'Institut Périphère pour la recherche théorique, à Waterloo, au Canada, et à l'université occidentale du Canada pour la philosophie. Il consacre un chapitre de son dernier livre, *Helgoland* (Flammarion, 272 pages, 21,90 euros), aux relations entre les dernières découvertes de la mécanique quantique et leur effet possible sur la société. « *Oui, il reste de grandes questions en biologie, comme la mémoire, la conscience, le cerveau... mais je ne pense pas que la réponse sera quantique. En revanche, ces découvertes apportent de nouvelles idées et perspectives* », complète-t-il.

→ LIRE LA SUITE PAGES 4-5

Entretien Les sols, matière première

Spécialiste des relations entre champignons et plantes, Marc-André Selosse décrit l'importance pour la planète de la vitalité des sols

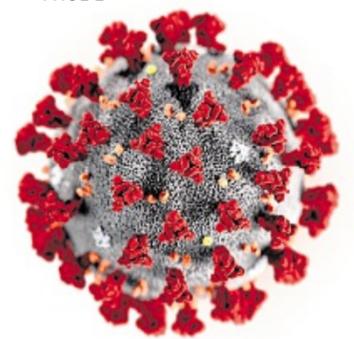
PAGE 7



Le Covid-19 a cannibalisé la biomédecine

L'analyse des dix plus grandes revues de médecine et d'infectiologie montre une baisse de 18% des études n'ayant pas trait à la pandémie

PAGE 2



Inquiétude dans la recherche sur les prions

Le récent décès de la maladie de Creutzfeldt-Jakob d'une technicienne de laboratoire ayant travaillé sur les prions repose la question de la sécurité des personnes étudiant ces agents infectieux. En 2019, une jeune femme était décédée de la même maladie après s'être blessée lors d'une manipulation

PAGE 3

Comment le Covid-19 a bouleversé l'édition scientifique

RECHERCHE - En 2020, la croissance spectaculaire du nombre d'articles scientifiques consacrés au Covid s'est accompagnée d'une baisse de 18 % des publications sur les autres sujets, selon une étude sur les dix principaux journaux de médecine et infectiologie

Explosion d'articles mis en ligne sur des plates-formes de prépublication comme MedRxiv, Research Square ou encore BioRxiv. Publications d'études dans des temps record dans les journaux scientifiques habituels, au risque de rétractation quelques semaines plus tard, y compris au sein de revues considérées comme les plus prestigieuses tels le *New England Journal of Medicine* ou *The Lancet*...

Dès février 2020, la pandémie de Covid-19 a eu un impact considérable sur les recherches scientifiques et leur production d'articles. Dans quelles proportions, et avec quelles conséquences sur les publications dans d'autres domaines de la médecine ? C'est ce qu'a exploré une équipe principalement française, sous la direction d'Alexandre Loupy (directeur du Centre de recherche translationnelle pour la transplantation d'organes de Paris, Inserm), en analysant les dix revues les plus cotées de médecine et de maladies infectieuses, sur les années 2019 et 2020.

Leurs travaux, publiés en ligne le 22 novembre dans la revue *BMC Medical Research Methodology*, concluent que la croissance spectaculaire du nombre d'articles scientifiques consacrés au Covid s'est accompagnée d'une baisse de 18 % des publications sur les autres sujets. Ces auteurs mettent aussi en évidence plusieurs particularités des « publications Covid ». Les articles « originaux » (c'est-à-dire des études présentant de nouvelles données, et qui ne sont pas des éditoriaux ou des points de vue) sont en proportion bien plus faible (47,9 %) que dans les articles relatifs à des sujets non Covid (71,3 %). Le nombre de signataires par publication est, lui, plus élevé, notamment s'agissant des études de cas : neuf auteurs en moyenne dans les *case reports* Covid, contre quatre pour les autres thèmes.

Deux stratégies possibles

Pour étudier l'impact de la pandémie sur l'édition scientifique, le docteur Marc Raynaud, épidémiologiste et premier auteur de l'étude, et ses collègues ont recensé les articles publiés entre le 1^{er} janvier 2019 et le 1^{er} janvier 2021 dans le top 10 des journaux médicaux et d'infectiologie anglophones : *New England Journal of Medicine* (NEJM), *The Lancet*, *Journal of the American Medical Association* (JAMA), *Nature Medicine*, *British Medical Journal* (BMJ), *Annals of Internal Medicine*, *Lancet Global Health*, *Lancet Public Health*, *Lancet Infectious Diseases* et *Clinical Infectious Diseases*.

Parmi les quelque 22 525 articles publiés sur cette période de deux ans au sein des dix revues, ils ont retenu les 6 319 correspondant à des articles originaux, des lettres de recherche (un format plus court que les articles originaux correspondant à des études de moindre ampleur), et les études de cas. Un peu plus de 16 % (1 022) se rapportaient au Covid-19.

La production d'articles consacrés à la pandémie a augmenté de façon spectaculaire entre février et avril 2020 dans les revues médicales gé-

nérales, passant de 4 à 19,5 publications hebdomadaires en moyenne, avant de se stabiliser aux alentours de 10, écrivent les auteurs de la publication dans *BMC Medical Research Methodology*. Face à l'afflux d'articles concernant le Covid-19, ces revues ont adopté deux stratégies. Certaines ont maintenu leur volume concernant les autres publications et donc augmenté leur production globale. Cela a été le cas du *New England Journal of Medicine*, des *Annals of Internal Medicine* et de *Lancet Infectious Diseases*. D'autres ont choisi de réduire la voilure des articles non Covid : *The Lancet*, le *JAMA*, le *BMJ*, *Nature Medicine*, *Lancet Global Health* et *Lancet Public Health*.

Délais de publication divisés par deux

En réalisant une simulation à partir de neuf de ces revues (*Clinical Infectious Diseases* n'ayant pas été prise en compte du fait d'une situation particulière), Marc Raynaud et ses collègues ont calculé qu'en 2020, hors pandémie, elles auraient pu accueillir 1 632 études originales non Covid. Seulement 1 344 ayant été publiées sur la période, le déficit est de l'ordre de 18 %. Certaines disciplines médicales ont-elles été plus affectées

que d'autres par cette baisse des publications ? Sur ce point précis, la publication de l'équipe française n'apporte pas d'éléments. « Nous avons fait un travail titanesque, en lisant des milliers d'articles. L'idée était de quantifier le phénomène, mais regarder par spécialités aurait considérablement augmenté le temps de recherche, et retardé cette publication de plusieurs mois, voire plusieurs années », justifie le docteur Raynaud.

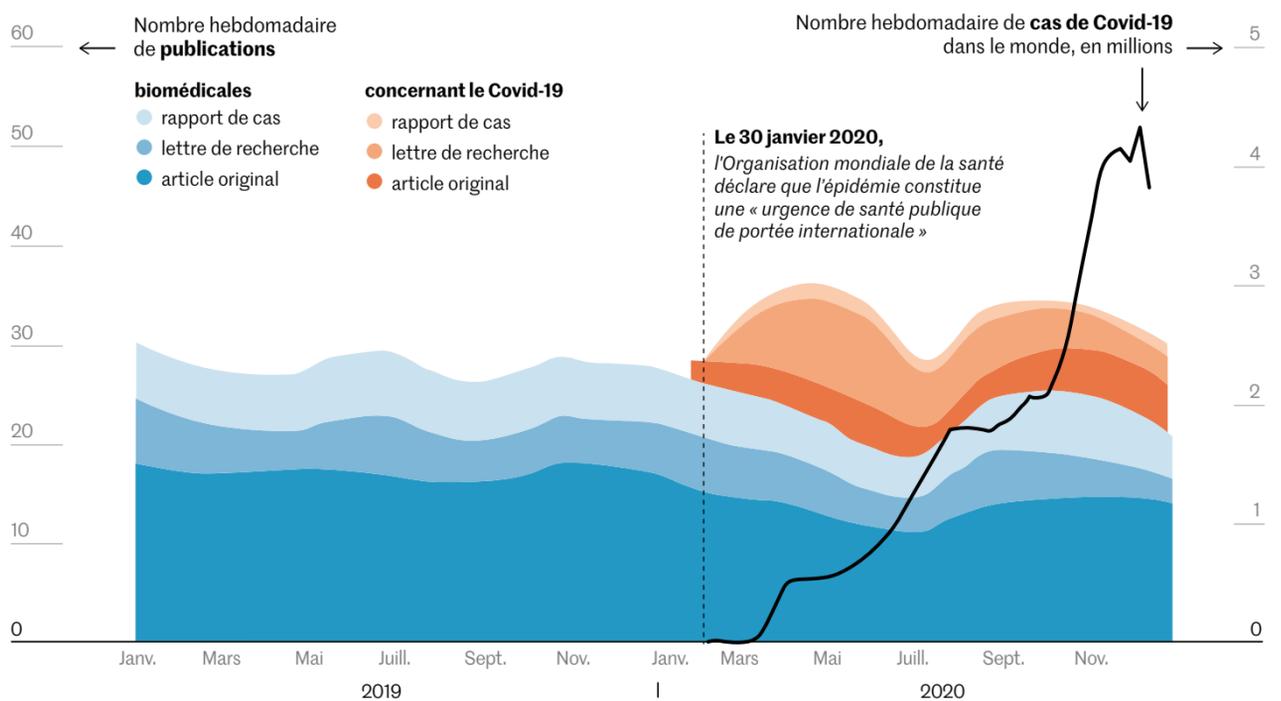
Dans ce contexte de pression scientifique et médiatique lié à la pandémie, et de concurrence effrénée, se pose aussi la question de la qualité des articles de recherche sur le Covid, souvent publiés dans des délais très raccourcis. Prudents, les auteurs du travail publié dans *BMC Medical Research Methodology* soulignent que les revues qui ont maintenu leur flux pour le hors-Covid, et donc augmenté leur production globale, ont probablement consacré en moyenne moins de temps au processus éditorial. « Par conséquent, il est possible que les normes scientifiques aient été considérées avec moins d'attention en raison de la nécessité de fournir un temps réel des avancées scientifiques liées à la pandémie », écrivent-ils. En revanche, dans les journaux qui ont réduit la

publication de recherches non Covid, « les rédacteurs ont rejeté plus d'articles que d'habitude, ce qui témoigne de leur engagement à respecter des normes scientifiques élevées ».

« C'est intéressant d'avoir des preuves concernant un phénomène que l'on pressentait, ce qu'apporte cette étude de bonne qualité, notamment en montrant les différentes stratégies des éditeurs scientifiques », commente Hervé Maisonneuve, médecin de santé publique. Pour ce spécialiste de l'intégrité scientifique, la pandémie a eu des conséquences majeures sur tout le système éditorial. Les délais de publication ont été globalement divisés par deux, et le mode rapide (dit « fast track ») est même devenu la norme dans certains journaux. « Certaines revues ont clairement recherché des papiers chauds, quitte à rogner sur leurs standards en acceptant des essais ouverts, sans groupe contrôle, avec des critères de jugement non pertinents, poursuit le docteur Maisonneuve. Cela a été le cas par exemple, pour le NEJM, qui a publié, en avril 2020, un essai ouvert avec le remdesivir portant sur 53 patients, signé par une cinquantaine d'auteurs. » ■

SANDRINE CABUT

Une flambée de publications sur le Covid-19 au détriment des autres publications biomédicales



Echantillon : les dix revues les plus cotées de médecine et sur les maladies infectieuses

Source : BMC Medical Research Methodology • Infographie : Le Monde

Les incendies dopés par la disparition des grands herbivores

PALÉONTOLOGIE - Des scientifiques ont établi un lien entre l'extinction de la mégafaune à la fin du quaternaire et l'augmentation des feux de prairie

La multiplication des mégafeux au cours des dernières années a fait de la science des incendies une discipline en plein essor. Comment les affronter ? Comment les prévenir ? Une équipe de l'université Yale a publié, jeudi 25 novembre, dans la revue *Science*, une étude qui promet de susciter un sérieux débat. Pour tenter d'en percer la cause, elle n'a pas scruté les récents désastres en Californie ou en Australie. Elle a choisi de se pencher vers le passé lointain. Et sa conclusion est sans appel : les incendies de prairie ont été nourris par la disparition des grands herbivores.

« Depuis longtemps, nous savions que les grands herbivores mangent suffisamment de plantes pour transformer la structure végétale, rappelle Allison Karp, chercheuse à la prestigieuse université et première autrice de l'étude. Cela

avait conduit à l'hypothèse qu'ils pouvaient aussi modifier le comportement des feux. » Le mécanisme semblait assez naturel : une diminution des grands brouteurs entraîne une accumulation de biomasse qui viendra transformer le premier feu en brasier. Quelques études conduites localement, dans les plaines tanzaniennes du Serengeti ou en Afrique du Sud, plaident en ce sens. « Nous avons voulu tester cette idée à la plus grande échelle possible, celle du continent à travers le temps géologique », poursuit l'écologue.

302 espèces observées

La période s'ouvrant il y a 50 000 ans et s'interrompant il y a 6000 ans, qui a vu disparaître – pour des raisons diverses et parfois mal expliquées – des espèces iconiques comme le mammoth laineux, le bison géant ou encore

les chevaux anciens, présentait un terrain d'observation idéal. Les chercheurs ont suivi la trajectoire des 302 espèces de grands herbivores de la fin du quaternaire. Ils ont regardé comment les extinctions s'étaient réparties sur quatre continents sur lesquels ils disposaient de suffisamment d'informations et ont constaté une grande inégalité. En perdant 83 % de sa mégafaune, l'Amérique du Sud a payé le plus lourd tribut, suivie par l'Amérique du Nord (68 %). L'Australie (44 %) et, surtout, l'Afrique (22 %) ont été nettement plus épargnées.

Les chercheurs ont ensuite plongé leur attention dans la Global Paleofire Database, la base de données des incendies anciens. Les charbons retrouvés dans les sédiments de certains lacs y sont répertoriés, qui permettent de dater mais également

d'estimer l'importance des feux du passé. Sur l'essentiel des 410 sites correspondant à leur période, ils ont constaté que partout l'activité des feux augmentait après la disparition des herbivores – indépendamment du facteur climatique. En répartissant ensuite ces événements par continent, le même palmarès est apparu : c'est en Amérique du Sud que l'activité des incendies a connu la plus grande croissance, suivie de l'Amérique du Nord, l'Australie et l'Afrique.

L'empreinte carbone du bétail

L'équipe de Yale a voulu voir si ce résultat se vérifiait avec tous les types de végétation et avec tous les animaux. Pour les « pâtureurs », qui se nourrissent d'herbe à même le sol, le résultat était clair. Mais qu'en était-il des mastodontes ou des paresseux géants

et autres brouteurs de feuilles, de bourgeons, de pousses d'arbre ou de buissons ? « A notre grande surprise, nous avons constaté que la disparition de ces brouteurs n'entraînait pas de multiplication des incendies », indique Allison Karp. Des études locales semblaient pourtant plaider pour un résultat équivalent dans les deux types de paysage. Les chercheurs évoquent la possibilité d'une mauvaise interprétation de leurs collègues. Ils rappellent également que, dans les forêts ou les sous-bois, c'est le degré d'humidité et non la quantité de combustible qui constitue le facteur essentiel à l'expansion du feu.

Ces résultats promettent de faire du bruit dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de multiplication des mégafeux. Car aujourd'hui, l'écrasante majorité des herbivores sont des

animaux d'élevage. « Même s'ils ne sont pas fonctionnellement équivalents à des communautés sauvages diverses, ils réduisent les surfaces brûlées », assure l'article.

A l'inverse, « nous savons bien que le bétail impose une très forte empreinte carbone, due tout à la fois au CO₂ et au méthane, insiste Carla Staver, maîtresse de conférences en écologie et en biologie évolutive de Yale et coordinatrice de cette recherche. Alors il va falloir faire les calculs attentivement. Et garder en tête qu'une source d'émission peut en remplacer une autre. » Réduire le bétail pour diminuer le rejet de gaz à effet de serre, ou le conserver et même le protéger pour éviter une explosion des mégafeux ? « La question est intéressante », juge tranquillement Carla Staver. « Brûlante » serait plus juste. ■

NATHANIEL HERZBERG

Second décès en France en lien avec des études sur le prion

INFECTIOLOGIE - Un moratoire sur les travaux sur cet agent pathogène est prolongé après deux cas mortels de Creutzfeldt-Jakob à l'Inrae

La maladie de Creutzfeldt-Jakob a emporté, il y a quelques jours, une technicienne de recherche retraitée de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae), qui avait travaillé à Toulouse au contact de tissus biologiques infectés par des prions. Ce décès sème la consternation et l'inquiétude dans la communauté scientifique travaillant sur ces agents infectieux. Il fait suite à la mort, le 17 juin 2019, d'Emilie Jaumain, une technicienne de laboratoire de 33 ans, atteinte de cette même maladie neurodégénérative incurable. La jeune femme l'aurait contractée en 2010, en se coupant au cours de la manipulation de fragments de cerveaux de souris infectées par des prions, dans une autre unité de l'Inrae, à Jouy-en-Josas (Yvelines).

Concernant la retraitée toulousaine, il faudra déterminer si elle a été victime d'une forme génétique ou sporadique de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, si la maladie peut avoir été causée par l'ingestion de viande contaminée par l'agent de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB, maladie dite aussi de la vache folle) ou, comme dans le cas d'Emilie Jaumain, si une exposition professionnelle accidentelle peut être invoquée. Les maladies à prions sont engendrées par des protéines prenant une conformation aberrante, qui leur donne la propriété de se répliquer pour former des agrégats délétères pour les neurones. On en dénombre 150 cas environ par an, en France, ayant pour effet une dégénérescence fatale du système nerveux central.

Un moratoire sur les recherches portant sur le prion avait été annoncé le 27 juillet, après que l'Inrae avait pris connaissance du second cas suspect. Il avait été décidé par les directions générales des cinq organismes concernés par ces activités – Anses, CEA, CNRS, Inrae et Inserm –, « conjointement et en accord » avec les ministères de tutelle, ceux de la recherche et de l'agriculture. Ce nouveau décès repose de façon aiguë la question des précautions passées et actuelles prises pour protéger les personnes travaillant sur les prions.

Mission d'inspection

Le 26 octobre, lors du comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail ministériel de l'enseignement supérieur et de la recherche, tous les représentants des personnels avaient demandé à la ministre Frédérique Vidal « de prendre enfin la mesure de la gravité de la situation et d'arrêter de fuir ses responsabilités ». Ils réclamaient, notamment, le recensement exhaustif de l'ensemble des personnes ayant travaillé sur les agents transmissibles non conventionnels (ATNC) dont font partie les prions; un bilan des accidents lors de manipulations de prions depuis 1990 – la maladie peut en effet se déclarer des décennies après la contamination; un dispositif de traçabilité des expositions de chaque agent concerné; une réflexion sur la mise en place d'une certification des locaux et d'une habilitation des personnels... Certains représentants syndicaux se demandent aussi quel retentissement la course aux publications scientifiques peut avoir sur la sécurité des agents.

Le lendemain, le gouvernement indiquait dans un communiqué que le moratoire serait prolongé jusqu'à la fin 2021, et qu'il serait « mis à profit par les établissements

pour réévaluer l'ensemble des mesures de sécurité dans leurs laboratoires, en tenant compte de l'analyse des sources possibles d'expositions au prion de la personne malade » – et aujourd'hui décédée. Cela se traduira par la mise en œuvre d'un guide commun à l'ensemble des établissements. Parallèlement, les ministères de tutelle ont diligemment une mission d'inspection « afin d'accompagner cette démarche interétablissements et d'éclairer les conditions à remplir pour sortir du moratoire en assurant la sécurité des expérimentations ». Ses conclusions sont attendues pour la fin de 2021.

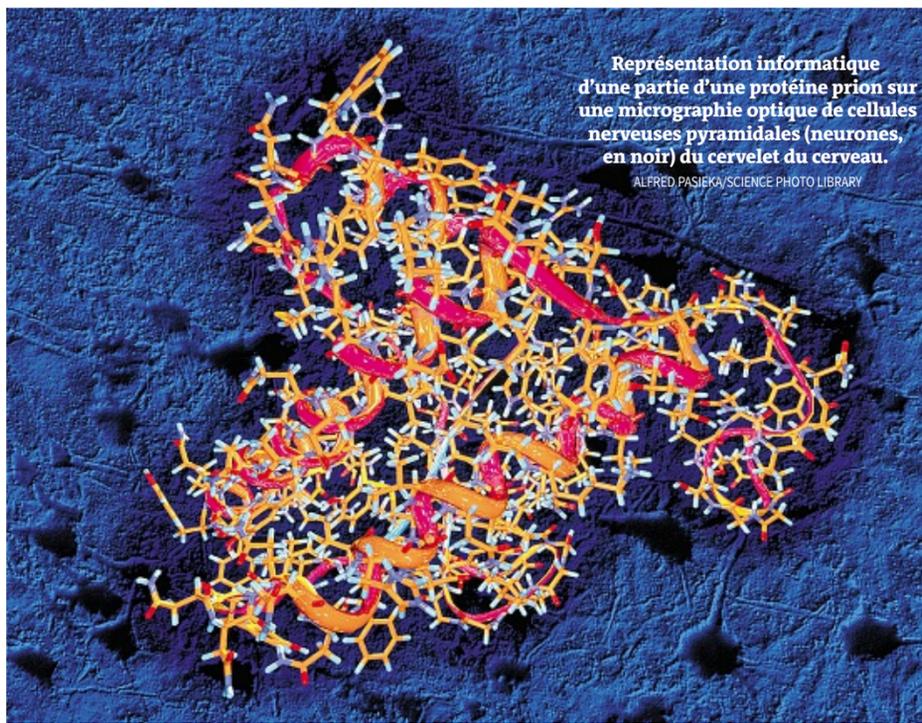
Un rapport des mêmes structures d'inspection, commandité après le décès d'Emilie Jaumain, avait été publié à l'automne 2020. Il pointait, entre autres, « une conformité réglementaire globale au regard des pièces fournies mais susceptible d'être améliorée »; « un accompagnement effectif des équipes de recherche par leurs tutelles en matière de sécurité, mais ne prenant pas en compte les spécificités du risque prion »; « un suivi médical professionnel insatisfaisant, une conduite à tenir en cas d'accident non encadrée nationalement et, de ce fait, diverse localement et des risques psychosociaux peu pris en compte »; « des manipulations pour lesquelles une harmonisation des pratiques reste à engager à des fins de sécurité renforcée »; « une vigilance des équipes sur les procédés de décontamination spécifiques aux prions, mais un cadre de prise en compte du risque perfectible »... Il en découlait sept recommandations qui sont, semble-t-il, restées en jachère.

Cinq risques de contamination

Le rapport précisait que neuf équipes, comprenant cent vingt-deux chercheurs, techniciens et animaliers, étaient alors engagées dans des activités de recherche sur les prions, celles-ci constituant « un enjeu important ». Huit de ces équipes manipulent des protéines ayant des modes d'action proches de celui du prion (dites « prion-like »), impliquées dans d'autres maladies neurodégénératives comme les maladies d'Alzheimer ou de Parkinson: protéines bêta-amyloïde, tau et alpha-synucléine ou TDP-43 – qui ne sont pas concernées par le moratoire. Toutes ces équipes sauf une manipulent des souches humaines ou animales de prions transmissibles à l'homme.

Les inspecteurs présentaient une recension « non exhaustive des accidents », selon laquelle cinq agents se sont piqués ou coupés avec des seringues ou des lames contaminées. Sept agents ont connu de tels épisodes sans contact avec des matériaux infectés, et cinq autres divers accidents de morsures et de projections « a priori sans gravité car sans contact avec du matériel contaminé ». Les équipes concernées travaillent dans des locaux confinés de type L2 et L3.

Faudrait-il réserver les activités sur le prion à des installations de très haute sécurité de type P4? Carsten Korth, de l'Institut de neuropathologie de l'université de Dusseldorf, ne pense pas que ce soit indispensable. Sous réserve de travailler avec des équipements de protection adéquats, sous des hottes à flux laminaire qui évacuent les aérosols, une voie de contamination qui fait débat dans la communauté scientifique. Mais, selon lui, « il est raisonnable de réévaluer toutes les procédures quand deux événe-



Représentation informatique d'une partie d'une protéine prion sur une micrographie optique de cellules nerveuses pyramidales (neurones, en noir) du cervelet du cerveau.

ALFRED PASIEKA/SCIENCE PHOTO LIBRARY

ments très improbables, comme deux infections à Creutzfeldt-Jakob, surviennent chez deux agents travaillant dans des laboratoires sur les prions ». Il souligne aussi l'enjeu de la difficile décontamination de routine des matériels et des locaux.

La question du risque de contamination par aérosols est très sensible depuis qu'il a été mis en évidence dans des recherches publiées en 2011, sous la direction d'Adriano Aguzzi, de l'Institut de neuropathologie de l'hôpital universitaire de Zurich. Répondant à des critiques de ce travail sur le site PubPeer, celui-ci rappelait en 2016 que, « en améliorant de façon drastique la sécurité des personnes tra-

vailant dans ces laboratoires, cette étude aura sans doute sauvé des vies humaines ». A-t-elle été suffisamment prise en considération en France?

Le chercheur ajoutait que la découverte du fait que d'autres protéines pathogènes peuvent se diffuser de la même façon « suggère que cette protection vis-à-vis des aérosols devrait être adoptée par tous les laboratoires manipulant ces agrégats de protéines ». Lors de ces travaux, « nous faisons extrêmement attention à ne jamais produire d'aérosols », confirme Ronald Melki (Institut François-Jacob, CEA, CNRS). Adriano Aguzzi a, en outre, récemment indiqué à Science s'interdire de manipuler

des prions humains ou bovins à des fins de recherche.

Dans le cas d'Emilie Jaumain, c'est un manque de protection (gants en latex, mais non de sécurité) et des outils inadaptés (un forceps métallique plutôt qu'une pince en plastique non coupante) qui ont pu conduire au drame. D'autres questions se posent: sa prise en charge médicale immédiate a-t-elle été adéquate? Avait-elle été suffisamment formée à ces manipulations? Les risques encourus étaient-ils justifiés au regard de la question scientifique explorée? Une information judiciaire a été ouverte à la suite d'une plainte pour homicide involontaire déposée par sa famille. Elle

visait l'Inrae, en parallèle à une procédure administrative.

M^e Julien Bensimhon, avocat de la famille Jaumain, indique avoir été contacté par une autre employée du laboratoire qui se serait blessée cinq ans plus tôt sans que le signalement de cet « incident de service » ait apparemment été dûment enregistré par l'Inrae – et qu'il ait conduit à une meilleure prise en compte de ce risque mortel. Un témoignage corroboré par l'association Emilys, créée après le décès de la jeune femme.

« Plausible » corrélation

Il est cruel de constater que cette dernière est cosignataire d'un article de *PLOS Pathogens* de 2011 concluant que « le risque pour les humains d'un agent ovin ou caprin de type ESB ne doit pas être sous-estimé » – précisément le type de prion, transmis à la souris, qu'elle manipulait lorsqu'elle s'est coupée. Une étude parue le 2 juillet 2020 dans *The New England Journal of Medicine*, écartant les autres voies de contamination, a conduit l'Inrae à admettre, du bout des lèvres, sa « plausible » origine professionnelle.

Dans un courriel adressé à Emilys le 24 juin, Philippe Mauquin, PDG de l'Inrae, indiquait que, « en tant qu'organisme de recherche scientifique, nous reconnaissons dès lors, sans ambiguïté, l'hypothèse d'une corrélation entre l'accident d'Emilie Jaumain le 31 mai 2010 et sa contamination. Nous n'avons pas pris position publiquement sur l'origine effective de cette contamination, car cela relève de l'expertise judiciaire et de l'évaluation par les pairs ». Un numéro vert renvoyant à un service d'accueil psychologique est mis à la disposition des agents de l'établissement. ■

HERVÉ MORIN

PRIX
INSERM
2021

La remise de Prix
qui rend tout le monde
vainqueur.

Cette année encore, l'Inserm récompense 5 lauréates et lauréats qui, par leurs travaux, leur engagement et leur mobilisation, contribuent à améliorer la santé de tous.

À suivre en direct sur inserm.fr
le jeudi 2 décembre à partir de 18 h.

Inserm

La science pour la santé
From science to health

« Fantômas », 2013.
Photo vintage découpée
par Kensuke Koike.
Cet artiste japonais
transforme des objets,
notamment par le biais
du collage, en modifiant
ainsi la perception
subjective.
KENSUKE KOIKE



Quantique, quantique... Vous avez dit quantique ?

► SUITE DE LA PREMIÈRE PAGE

En effet, ces paradoxes et « jeux de mots », auxquels ces physiciens se livrent volontiers, servent des motivations précises et ambitieuses. « *L'intérêt de jouer avec le formalisme quantique est qu'il peut conduire à des innovations technologiques, comme cela a été le cas par le passé* », apprécie Cyril Branciard, de l'Institut Néel. Il pense à ce qu'il est convenu d'appeler la deuxième révolution quantique, qui promet des communications plus sûres, des calculs plus efficaces ou des capteurs d'images, de position, d'IRM, etc., plus précis.

Tout ça parce que des physiciens et des mathématiciens, dans les années 1930 à 1960, ont « joué » avec les équations. « *Les nouvelles manières de poser les questions excitent beaucoup les chercheurs en ce moment, car elles pourraient déboucher sur des avancées majeures vers l'unification entre les deux théories de description de la nature que sont la relativité générale et la mécanique quantique* », estime Alexei Grinbaum, physicien et philosophe au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), coordinateur de la dernière Conférence européenne sur les fondements de la physique, qui s'est tenue à Paris du 28 au 30 octobre.

Le sourire d'un chat... sans le chat

Avant d'embarquer vers ces nouveaux paradoxes, munissons-nous d'un « passe » quantique au QR code rempli de quelques principes utiles. S'il est dans la suite beaucoup question de chat, les physiciens travaillent en réalité avec des particules dont les plus utilisées sont les grains de lumière ou photons. Ils ne meurent pas ni ne sourient, mais portent une propriété appelée polarisation, qui décrit l'orientation du champ électrique de l'onde qu'ils véhiculent. La mécanique quantique autorise des constructions de deux genres, superposées ou intriquées. La première est « floue », adoptant à la fois une polarisation et son opposé. La probabilité qu'elle soit découverte dans un état ou dans l'autre dépend d'un objet mathématique appelé fonction d'onde. La seconde construction est une paire de photons invisiblement reliés qui fait que toute mesure sur l'un précipite l'autre dans une polarisation parfaitement connue. Départ pour un voyage au pays des merveilles quantiques.

Impossible de parler mécanique quantique sans parler de chat. Le plus célèbre est celui dit de Schrödinger, du nom du physicien qui a posé l'équation centrale de la théorie quantique en 1926, et dont une conséquence est d'autoriser la création de chimère étrange, comme un chat théorique pouvant être à la fois vivant et mort.

Plus récemment, des physiciens ont ressuscité un autre matou, décrit par Lewis Carroll dans *Alice au pays des merveilles*, le chat du Cheshire, croisé par l'héroïne lancée aux trousses du lapin blanc. Sur sa branche, le félin très souriant disparaît peu à peu, ne laissant pendant plusieurs instants que son rictus. « *Comme le dit Alice, on voit souvent des chats sans sourire, mais jamais des sourires sans chat* », a rappelé Eliahu Cohen, physicien de l'université Bar-Ilan (Israël), en introduction de son exposé à la Conférence

**LES PHYSICIENS
TRAVAILLENT
NON PAS AVEC
DES CHATS,
MAIS AVEC
DES PARTICULES
DONT LES PLUS
UTILISÉES SONT
LES PHOTONS**

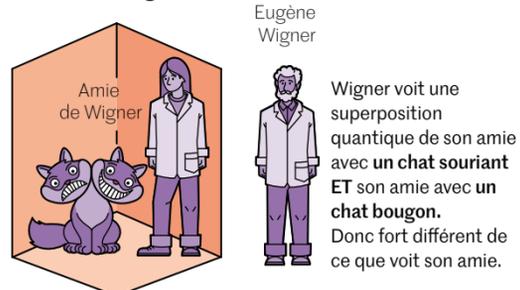
européenne sur les fondements de la physique. Sauf au pays des merveilles quantiques, comme il l'a ensuite montré.

La proposition théorique date de 2013 et émane de son directeur de thèse, Yakir Aharonov (université de Tel-Aviv), et des collègues de ce dernier des universités de Bristol et de Cambridge. Quelques mois plus tard, une tout autre équipe internationale créait le premier chat du Cheshire quantique à base de polarisation (le sourire) et de neutrons (le chat) : l'observateur confirme qu'il y a un chat dans un coin du laboratoire et dans un autre coin un sourire, mais sans le chat.

A Paris, Eliahu Cohen a présenté une variante, publiée en août dans *Nature Communications*, encore plus troublante : la possibilité de communiquer sans message. « *Au premier regard, l'idée n'est pourtant pas si étonnante. Quand on*

Une situation, deux regards

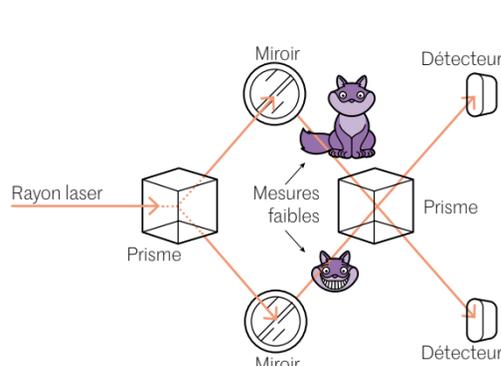
L'amie de Wigner mesure
soit un chat souriant,
soit un chat bougon.



Source : Le Monde

Un chat découplé de son sourire

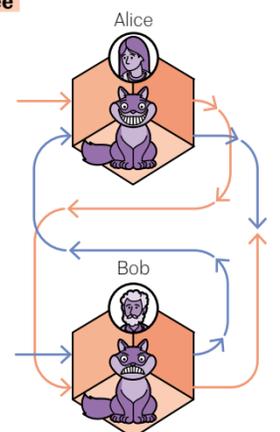
Sur deux trajectoires différentes des **mesures dites faibles** permettent pas à pas de mesurer dans une branche
soit la position du chat, soit son sourire



Une causalité indéterminée

Deux opérations successives
sont conduites dans un ordre
ou dans l'autre (chemin rouge
ou bleu) : Alice crée un chat
souriant, Bob un chat bougon.

Une technique permet
de superposer ces deux
histoires en créant un état où
l'ordre des deux opérations
devient indéterminé.



Texte : David Larousserie

Infographie : Le Monde

« IL PEUT EXISTER DES BOUCLES TEMPORELLES SANS PARADOXE LOGIQUE », ASSURE LE PHYSICIEN HIPPOLYTE LAZOUENKO-DOURDENT. SI BIEN QU'UN PETIT-FILS POURRAIT VOYAGER DANS LE TEMPS ET TUER SON GRAND-PÈRE SANS COMPROMETTRE SA PROPRE EXISTENCE

allume un phare lorsqu'il y a un incendie, on sait bien que si le phare est éteint, c'est qu'il n'y a pas de feu. On a donc une information, sans qu'aucun message n'ait été transmis », précise le chercheur après son exposé. Evidemment, envoyer un message « négatif » est moins intéressant qu'émettre un message « positif » et c'est ce que les chercheurs ont donc réussi. Dans une cavité divisée en deux par un miroir semi-transparent, ils parviennent à détecter un flux de polarisation d'un côté sans qu'un photon n'y soit. Il suffit de modifier les propriétés du miroir séparant les deux régions pour modifier la polarisation, donc le message.

Le secret est un savoir-faire développé par ces spécialistes depuis vingt ans, qui consiste en somme à savoir caresser les chats, sans les déranger, c'est-à-dire effectuer des mesures peu perturbantes sur les systèmes. Une telle maîtrise avait ainsi conduit à détecter, grâce aux photons, une « bombe » sensible aux photons, mais sans la faire exploser. « *Le corps du chat et son sourire sont séparés peu à peu, et nous suivons pas à pas cette transformation* », résume Eliahu Cohen, qui exploite cet effet pour un protocole de communication discret, sans messenger.

Le système améliore celui réalisé par une équipe chinoise, qui, en 2017, avait aussi communiqué de cette façon étrange, mais qui a le défaut, selon Eliahu Cohen, de laisser néanmoins des « traces » du messenger. Son équipe a proposé une solution sans trace en juillet 2021, mais personne ne l'a encore mise en œuvre.

A la question « qui de l'œuf ou de la poule est apparu en premier ? », les physiciens quantiques répondent clairement : ni l'un ni l'autre, mais les deux à la fois. De même qu'il est possible de créer un objet dans une superposition de deux états contraires, il est possible de créer un état superposé d'un « avant » et d'un « après ». Impossible en revanche de distinguer dans l'histoire si la poule a précédé l'œuf, ou l'œuf la poule, ou de savoir si un chat a souri parce qu'il a eu des croquettes, ou s'il sourit pour avoir des croquettes. Au passage, on perd même l'idée qu'une cause précède un effet...

Etats intriqués

Encore un résultat troublant. Et pourtant observé expérimentalement ! En 2017, une équipe de l'université de Vienne construit une machine – dite interrupteur quantique (*quantum switch*) – à mélanger l'œuf et la poule, ou le sourire du chat et ses croquettes, et confirme qu'il n'est pas possible de distinguer les deux histoires : le chat sourit, car il a bien mangé, et le chat sourit pour avoir sa ration. L'ordre temporel est perdu, indéterminé.

Certes la communauté débat encore sur l'interprétation de cette expérience, certains doutant qu'elle montre exactement ce que ses défenseurs prétendent. Néanmoins, tous gardent en tête des expériences encore plus énigmatiques où l'ordre causal serait indéterminé, mais où l'observateur ne saurait même pas ce qu'il s'est passé dans la séquence. « *Dans un quantum switch, on sait qui fait quoi dans la séquence. Mais on peut imaginer une situation où les deux opérateurs seraient libres de faire ce qu'ils veulent* », résume Cyril Branciard, de l'Institut Néel.

En 2012 puis 2016, Caslav Brukner de l'université de Vienne et divers collègues, dont Cyril Branciard, postulent que de telles situations sont permises par la mécanique quantique et ouvrent de nouvelles perspectives. Par analogie avec les états intriqués, ces physiciens parlent d'états causalement intriqués et ont même calculé un seuil pour distinguer expérimentalement si un phénomène est causalement indéfini ou non. L'approche ressemble à celle suivie en 1964 par John Bell, qui avait aussi déterminé un seuil permettant de qualifier un phénomène classique ou quantique et qui a permis de nombreuses applications utilisant ces états dits intriqués pour la communication ou le calcul. « *Les quantum switches ne dépassent pas ce seuil, et pour l'instant on*

n'arrive pas à trouver des expériences qui y arriveraient », rappelle Cyril Branciard.

Certains rêvent d'y parvenir et de rejouer la même histoire qu'avec John Bell. D'ailleurs, l'idée de « jouer » avec la causalité est venue de deux communautés très motivées. La première est celle de l'information quantique qui s'est demandé s'il ne serait pas plus efficace dans des calculs quantiques de s'affranchir de la notion d'ordre. Et dès 2013, ils ont démontré, en théorie, que des opérations avec interrupteur quantique peuvent être plus rapides que celles menées sans. D'autres envisagent aussi des protocoles de communication plus efficaces.

L'autre communauté motivée est celle de la gravitation quantique, qui essaie d'unifier les deux grandes théories de description de la nature : la relativité générale d'Einstein, qui décrit l'espace-temps et la gravitation, et la mécanique quantique. Au milieu des années 2000, le mathématicien Lucien Hardy a en quelque sorte renversé la table en explorant l'étrange idée de rendre relatif le temps en mécanique quantique, comme il l'est dans la relativité générale. « *L'espoir avec ces réflexions autour des causalités indéfinies est de progresser dans la direction d'une théorie de gravitation quantique* », souligne Laurie Letertre, philosophe et physicienne à l'Institut Néel, qui a exposé ses travaux à la Conférence européenne sur les fondements de la physique le 29 octobre. Son collègue Hippolyte Lazourenko-Dourdent y a lui présenté un jeu intellectuel original, qui confirme que ces états violant la causalité ne sont pas sujets aux paradoxes temporels dits du grand-père, présents en relativité générale. Un petit-fils pourrait voyager dans le temps et tuer son grand-père sans tout chambouler. « *Il peut exister des boucles temporelles sans paradoxe logique* », tranche-t-il. Le futur peut influencer le passé tranquillement...

Les faits sont relatifs

Presque aussi célèbre que le chat de Schrödinger dans la panoplie des expériences de pensée, il y a l'amie d'Eugene Wigner, nobélisé en 1963. Deux ans plus tôt, ce physicien avait décrit un scénario paradoxal posant la question fondamentale de la place de l'observateur dans la théorie quantique. Il imagine qu'une de ses amies est en train de faire une expérience dans son laboratoire. Par exemple, elle cherche à savoir si un chat sourit ou s'il est bougon.

Pour elle, mécanique quantique oblige, avant la capture du chat, il y a une superposition chat souriant/chat bougon. Dès la capture, la réponse est univoque : soit le félin sourit, soit il ne sourit pas. En revanche, la situation est différente pour Wigner lui-même, resté à l'extérieur du laboratoire. Pour lui, avant que la porte du labo ne s'ouvre, la mécanique quantique décrit une superposition entre son amie avec un chat souriant et son amie avec un chat grognon. Il peut même faire une expérience confirmant qu'il s'agit bien d'une superposition.

Quelque chose cloche donc : deux personnes ont une vision différente d'une même réalité. Il n'y a pas de faits absolus ! Evidemment, cette subjectivité étonne. Wigner se sortait de ce paradoxe en arguant que son observateur ne pouvait pas voir la superposition, car sa conscience a la capacité de la détruire. Mais cela est loin de satisfaire tout le monde, car, comme d'autres paradoxes, cela introduit l'idée d'une particularité liée à un observateur.

En 2018, deux groupes indépendants, à Vienne et à Zürich, ont proposé une expérience pour tester pour la première fois le scénario de Wigner. Et en 2019 et 2020, deux équipes, en Ecosse et en Australie, l'ont réalisée. La « solution » de Wigner, faisant appel à la conscience de l'observateur, est évacuée, car les observateurs ne sont pas humains, mais de simples photons, plutôt décérébrés. Mais la réponse est que, en effet, on tombe sur un os. Oui, il est bien possible de faire coexister deux réalités alternatives...

« *Les faits sont relatifs* », titre même Caslav Brukner, auteur d'un des articles de 2018 à l'université de Vienne, pour présenter le résultat de 2020 de *Nature Physics*. « *Cela a le mérite de reformuler les différentes manières d'interpréter ces paradoxes quantiques* », reconnaît Hippolyte Lazourenko-Dourdent, à l'Institut Néel. Dans leur article de 2018, Daniela Frauchiger et Renato Renner ont résumé ainsi comment dix interprétations courantes se sortaient du paradoxe. Neuf vont dans le sens de la relativité des faits.

Certains physiciens relèvent que les expériences avec des photons ne correspondent pas exactement au scénario de Wigner, qui « superpose » de vrais observateurs, ce qui n'est pas une chose facile ! L'équipe australienne espère donc mettre tout le monde d'accord en réalisant une nouvelle expérience avec des détecteurs quantiques de plus grande taille. Le débat continue. ■

DAVID LAROUSSERIE

ALEXEI GRINBAUM : « IL FAUT LEVER LE MYSTÈRE »

Alexei Grinbaum est physicien et philosophe au Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Il a coorganisé la Conférence européenne sur les fondements de la physique, du 28 au 30 octobre à Paris, la première en France depuis sa création il y a trente ans.

Quels progrès constatez-vous sur les interprétations de la mécanique quantique ?

Il persiste des énigmes multiples dont certaines sont nouvelles. Plutôt que de l'interpréter, aujourd'hui on essaie de reconstruire la mécanique quantique à partir d'axiomes – des principes fondamentaux. Mais on vise toujours à expliquer le célèbre problème de la mesure des phénomènes observés : la théorie prévoit deux types d'évolution différents dans le temps de ces phénomènes, dont l'une fait une place particulière à la mesure qu'opère un observateur. Autant de notions que la théorie ne définit pas, ce qui est pour le moins déroutant. Ces dernières années, le problème de la mesure a été reformulé à l'aune de l'information quantique : celle-ci le dissout plus qu'elle ne le résout. L'information quantique a déjà permis de faire des avancées mathématiques et expérimentales, et ce n'est pas fini.

Et c'est toujours la guéguerre entre interprétations ?

Chaque approche a ses adeptes, ses avantages et inconvénients. Mais tout le monde se parle et tous s'entendent sur les phénomènes observés ! Plusieurs cultu-

res, manières de penser, langages mathématiques sont présents. Cette richesse est heureuse.

Cette aura de mystère qui entoure la mécanique quantique est-elle gênante ?

D'une certaine manière, oui. En parallèle avec des études sur les fondements de cette théorie, tous les grands pays du monde investissent dans les technologies quantiques. Cela concerne la communication quantique, le calcul quantique, la métrologie avec des exemples comme les capteurs extrêmement performants. Sur ce plan, parler de mystères ou d'énigmes dès lors qu'on se lance dans ces technologies serait simplement aberrant. Les futurs utilisateurs ne devraient pas vivre dans un monde mystérieux et opaque en abandonnant tout espoir de comprendre les technologies qui les entourent.

Au contraire, nous devons élaborer des récits qui s'écartent de ce halo de mystère. Plutôt que de jouer éternellement avec le chat de Schrödinger, mettons l'accent sur l'utilisation des ressources non classiques, comme l'intrication quantique, ou la causalité indéterminée quantique, qui permettent d'aller au-delà de ce qui était accessible aux ingénieurs du XX^e siècle.

Quels sont les risques à entretenir le mystère ?

Le risque est que différents mystères fusionnent entre eux, car les mystères fascinent toujours. On pourrait se retrouver avec de la médecine quantique, des religions quantiques ou je ne

sais quoi. Les spécialistes savent distinguer ce qui est sérieux, mais les profanes tombent spontanément dans le piège où tous les mystères ne font qu'un. Il pourrait aussi y avoir, comme pour les nanotechnologies, de la défiance, car on fait actuellement des promesses très grandes, parfois exagérées. Il faudra un jour en rendre compte à la société, qui souhaite toujours des solutions rapides ou des applications utiles. Il vaut mieux pratiquer dès le début la transparence dans nos concepts et la lucidité quant à notre propre incertitude.

Pourquoi êtes-vous réticent à parler de révolution technologique ?

Deux révolutions quantiques ont déjà eu lieu : la première, au moment de l'invention de cette théorie ; la deuxième, à partir des années 1960. Les concepts au cœur de chacune d'elles servent à concevoir des solutions technologiques. Ces technologies sont géniales, mais elles ne vont pas bouleverser le monde comme l'électricité ou l'automobile. A moyen terme, elles permettront des progrès incrustaux, pas des sauts.

Pour éviter de reproduire les erreurs du passé dans l'interaction entre la science et la société, nous venons, avec quatre autres collègues en Allemagne, aux Pays-Bas et aux Etats-Unis, de publier un manifeste, dans lequel nous faisons quelques recommandations sur la manière de présenter les technologies quantiques aux citoyens. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR D. L.

Les arts culinaires sont à l'honneur à la Cité des sciences et de l'industrie avec une conférence à destination des enfants, une exposition et un événement.

jeudi 2 décembre à 14 h

cycle **Ma première conférence**

Le plaisir de manger (dès 6 ans)

Quel est le rôle de nos 5 sens dans l'éveil du goût ? Une conférence pour mieux comprendre le rôle du système sensoriel dans le plaisir gustatif.

Avec Sophie Nicklaus, directrice de recherche à Inrae.

les 4 et 5 décembre

festival **l'Orchestre culinaire, atelier de cuisine géant** (à partir de 3 ans)

Des ateliers pour cuisiner à l'unisson et retrouver le plaisir d'être ensemble. Venez préparer des recettes délicieuses et écoresponsables sous la houlette de grands chefs. Les enfants pourront également mettre la main à la pâte lors d'animations conçues pour eux.

jusqu'à août 2022

exposition **Banquet** (à partir de 9 ans)

Un voyage de la cuisine à la table, où sciences et gastronomie se lient à merveille. Explorez les différentes composantes du goût grâce à des expériences sensorielles ; laissez-vous inspirer par les innovations et les conseils de grands chefs tel Thierry Marx, et passez à table avec le spectacle *Banquet*, une époustouflante orchestration d'images, de sons et d'odeurs.

Programme complet et réservations sur cite-sciences.fr

LE LIVRE

Le long chemin
vers le succès
éclair de l'ARNm

Le journaliste Fabrice Delaye raconte le parcours exceptionnel qui a permis cette révolution qu'est l'ARN messenger

Dans un monde éditorial idéal, ce livre-là aurait été couronné par le prix Nobel. Plus exactement, son sujet annoncé par son titre, *La Révolution de l'ARN messenger*, aurait été récompensé, début octobre, de la plus prestigieuse des récompenses scientifiques, offrant à l'ouvrage une rampe de lancement idéale. Las ! L'Académie suédoise a boudé l'insolente – trop insolente ? – réussite de ces vaccins innovants. Reste cependant une aventure scientifique exceptionnelle, animée par des personnages hors du commun, à la portée de toute évidence considérable pour l'avenir de la médecine : tous les ingrédients nécessaires à un bon récit scientifique.

Journaliste pour le site d'information suisse *Heidi.news*, Fabrice Delaye a suivi de très près la dernière ligne droite de cette saga, qui a conduit à l'élaboration, en moins d'un an, de deux vaccins contre le Covid-19. Mais il a choisi de plonger son livre dans l'histoire longue. Il rappelle les premiers pas, avec la découverte de l'ARN messenger, en 1961, par trois chercheurs français, parmi lesquels – clin d'œil inévitable – François Jacob, le père d'Odile Jacob, l'éditrice du livre. Surtout, il fait raconter, par les différents acteurs, la patiente, parfois laborieuse, construction de cet édifice.

Passent ainsi une série de personnages qui viennent raconter leur part de vérité. Il y a bien sûr les incontournables, le duo Katalin Kariko-Drew Weissman, qui a su modifier l'ARN messenger afin de le rendre résistant au système immunitaire, et par là même actif. Ou encore les formidables entrepreneurs que sont le Français Stéphane Bancel, patron de Moderna, ou les Allemands Ugur Sahin et Ozlem Tureci, unis à la ville comme à la paille, fondateurs de BioNTech. Mais le livre met surtout en lumière des « héros » moins connus, comme l'Américain Robert Malone, peut-être le premier à avoir cru, dès 1987, aux vertus thérapeutiques de l'acide ribonucléique, certainement le plus aigri aujourd'hui de ne pas figurer sur les photos. Ou le Canadien Pieter Cullis, génie de la biochimie et breveté en série, maître incontesté des nanoparticules lipidiques, ces micro-armures sans lesquelles l'ARN n'aurait aucune chance d'atteindre les cellules de l'organisme.

Embûches, échecs et labeur

Et c'est là tout l'intérêt du livre. Il nous permet d'admirer la vision, l'astuce, l'enthousiasme, la volonté qui accompagnent toute découverte majeure. Mais il nous fait toucher du doigt la masse oubliée d'embûches, de mauvais coups, d'échecs, de labeur, d'audace pas toujours récompensée que cache un succès apparemment éclair. On voyage donc dans les laboratoires universitaires, les couloirs de Big Pharma, mais surtout dans l'univers des start-up, ses investissements colossaux, ses batailles homériques pour décrocher les brevets, sa quête effrénée d'innovation. Fabrice Delaye raconte ainsi avec détails le pari perdu de la biotech allemande CureVac. Partie la première, dès le début des années 2000, dans la quête d'un vaccin à ARN messenger, elle défriche le terrain, structure la communauté, lance les premiers essais cliniques. Mais, à l'heure du sprint final, elle s'écroule, victime de sa conviction de pouvoir faire cavalier seul et d'un pari technologique perdu.

Enfin, le livre offre un aperçu des bouleversements à venir. Car, au-delà du vaccin contre le Covid-19, l'ARN messenger tient dans son viseur de nombreuses autres maladies infectieuses, mais aussi le cancer, les pathologies chroniques, les maladies rares. Une transformation qui promet d'affecter patients, médecins et industriels. En un mot, une « révolution » que même les jurés du Nobel finiront, c'est certain, par récompenser. ■

NATHANIEL HERZBERG

La Révolution de l'ARN messenger, de Fabrice Delaye (Odile Jacob, 206 p., 19,90 €).

CES MORPHOS
QUI PLANENT
DANS LA CANOPÉE

Ils impressionnent par leur taille et leur couleur iridescente. Mais pour les chercheurs, le véritable mystère restait leur vol. Pourquoi certains morphos planent-ils à la manière d'un oiseau quand tous les autres papillons, et plus largement les autres insectes, battent presque continuellement des ailes ? Une équipe conduite par Vi-

laine Llaurens (CNRS) et Vincent Debat (Muséum national d'histoire naturelle) a étudié douze espèces qui se partagent le terrain dans l'Amazonie péruvienne, en comparant celles vivant dans le sous-bois et celles installées dans la canopée. Publiés dans la revue *Science*, les résultats établissent la coévolution des comporte-

ments, des caractéristiques physiques et des performances aérodynamiques des lépidoptères. Des ailes courtes, favorisant un vol puissant et rapide, dans le milieu dense du sous-bois ; des ailes plus étendues, ou plus allongées, permettant de longues phases planées entre les cimes des arbres. (VINCENT DEBAT)



DIX MILLE PAS ET PLUS

L'ACTIVITÉ PHYSIQUE, UN EFFET ANXIOLYTIQUE

Par PASCALE SANTI

L'activité physique régulière a des effets positifs sur la dépression, la littérature scientifique l'a montré depuis de nombreuses années. Elle atténue aussi les symptômes d'anxiété. Une équipe suédoise de l'université de Göteborg a étudié chez 286 patients – 70 % de femmes –, dont la moitié souffrait de troubles anxieux depuis au moins dix ans, de 39 ans d'âge moyen, les effets de séances d'exercice accompagné, en groupe, soit d'intensité modérée à faible, soit d'intensité élevée, pendant douze semaines, en les comparant à un ensemble de patients témoins. L'étude, publiée en ligne dans *Journal of Affective Disorders* en novembre, montre que les symptômes d'anxiété ont été « significativement atténués avec ces exercices (une séance d'une heure trois fois par semaine), quelle que soit leur intensité, avec un peu plus d'effet lorsque l'exercice était plus soutenu », indiquent les auteurs.

Rappelons que l'anxiété se caractérise « par un sentiment persistant d'insécurité, une inquiétude permanente et excessive qui interfère avec les activités quotidiennes », selon l'Inserm. Cela peut prendre la forme de trouble panique, anxiété généralisée, phobies... Cela amène à des ruminations accompagnées de

symptômes physiques et psychiques. Deux fois plus présents chez les femmes que chez les hommes, les troubles anxieux touchent environ de 15 % à 20 % de la population à un moment ou à un autre.

Une méta-analyse, coordonnée par Elizabeth Aylett (université de Manchester), qui a répertorié 15 études, réalisées sur 675 patients, avait déjà mis en évidence que l'exercice aérobique s'est avéré efficace dans le traitement de l'anxiété. Une étude, conduite en prison auprès de 37 détenus (qui n'avaient jamais été incarcérés) par Fabien Legrand, maître de conférences en psychologie à l'université de Reims Champagne-Ardenne, illustre les bénéfices de l'exercice.

Donner envie, malgré l'ennui

Comment expliquer cet effet thérapeutique ? L'aspect socialisant du sport pourrait être porteur. Mais les effets positifs ont également été montrés en pratiquant une activité physique en solo. On sait par ailleurs que cela améliore l'estime de soi. De plus, « il a été démontré que l'aérobique, grâce à la régulation de la respiration qu'elle engendre, améliore le trouble de panique », souligne Antoine Pelissolo, chef de service de psychiatrie des hôpitaux Henri-Mondor et Albert-Chenevier (AP-HP, Créteil), qui mentionne aussi « les effets sur la gestion du stress, l'amélioration du som-

meil, et donc indirectement sur la fatigue ». Le sport a aussi un impact au niveau biologique. « Cela favorise la neurogenèse, la production de nouvelles cellules », ajoute Florian Ferreri, psychiatre à l'hôpital Saint-Antoine (AP-HP). Cela modifie la sécrétion de certains neuromédiateurs (dopamine, sérotonine) et cela procure du plaisir par la sécrétion de certaines endorphines qui ont des propriétés apaisantes. « L'activité physique va stimuler la production de dynorphines, qui sont des peptides opioïdes ayant un rôle bien établi dans l'atténuation de la douleur et l'apaisement de l'humeur », explique Fabien Legrand.

Ce n'est pas tout. On sait a contrario que rester assis a des effets délétères sur la santé, notamment sur la santé psychique. C'est ce qui a récemment été mis en évidence par des chercheurs de l'université de l'Iowa, dans un travail publié dans la revue *Frontiers in Psychiatry* début octobre. « Toute activité physique est bénéfique pour la santé mentale du patient, le niveau de preuve étant le plus important dans la dépression », résume Florian Ferreri. Pas de doute, mais comment agir pour motiver les personnes souffrant de troubles anxieux, souvent associés à de la fatigue, à faire de l'activité physique ? Il faut donner envie. Dans tous les cas, tout mouvement est bon à prendre. ■

AFFAIRE DE LOGIQUE – N° 1178

Point inaccessible

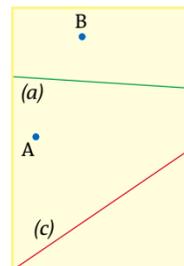
Ce jour-là, Alice a pour seuls instruments une règle, un compas et un crayon. Elle trace sur une feuille de papier A4 une droite (a), ainsi qu'un point A extérieur à (a).

1. Peut-elle réussir à tracer la parallèle à (a) passant par A ? Si oui, comment ?

Elle trace alors une droite (c) non parallèle à (a) et un point B qui n'est sur aucune des deux droites (a) et (c). Ces dernières se coupent certainement en un point P, mais cette intersection est en dehors de la feuille de papier.

2. Comment Alice peut-elle réussir à tracer la droite (b) qui joint B au point invisible P ? Bob, qui ne veut jamais être en reste, lui pose alors la question suivante.

3. « Saurais-tu aussi, à la règle et au compas, tracer la bissectrice de l'angle formé par les deux droites (a) et (c) ? » Répondez pour Alice.



« LA SCIENCE TAILLE XX ELLES »

À GRENOBLE JUSQU'AU 5/12

Imaginé en 2018 par le CNRS et l'association Femmes et Sciences, autant pour rendre hommage aux femmes de science d'aujourd'hui que pour inspirer celles de demain, cette exposition met en lumière des chercheuses contemporaines. Après Toulouse, Lyon et Paris, c'est au tour de Grenoble de la présenter au Jardin de ville. Découvrez sur place ou en téléchargeant le catalogue les portraits de 21 femmes qui font la science à Grenoble, comme Léonie Canet, la physicienne qui « fait valser les équations » ou Clémentine Prieur, pour qui « les maths sont un booster d'énergie ». Infos sur www.alpes.cnrs.fr

L'ALGORITHMIQUE SOCIÉTALE

À NANCY LE 9/12 (20 H 30)

Le cycle de conférences « Science et Société » se poursuit à Nancy, où Claire Mathieu (CNRS, Académie des sciences) fera un exposé « Algorithmique et modélisation des réseaux sociaux » à Polytech Nancy (2, rue Jean-Lamour, Vandoeuvre-lès-Nancy). Cette spécialiste en informatique explore les algorithmes sociétaux et la modélisation des critères d'évaluation nécessitée par leurs impacts sur les personnes. C'est le thème que présentera celle qui, dans sa leçon inaugurale au Collège de France, évoquait déjà les phénomènes de « petits mondes » et de « plafond de verre ». Infos sur lecl.univ-lorraine.fr

RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

À LYON LE 16/12 (18 HEURES)

On entend parler depuis quelques années de révolution de l'IA par le *deep learning* ou les réseaux de neurones. Ces modèles ont en effet permis une amélioration substantielle des performances en reconnaissance d'image ou en traduction automatique et se retrouvent déployés dans de nombreux outils utilisés au quotidien. Mais que se cache-t-il derrière ces termes ? Quelle est leur origine ? Comment fonctionnent ces modèles ? Et surtout quelles sont encore leurs limitations actuelles ? Ce sont tous ces thèmes que Mathieu Lefort abordera dans sa conférence à la MMI, 1, place de l'École, Lyon 7^e. Infos et réservations sur mmi-lyon.fr

Solution du problème 1177

1. La première version du réseau ADL compte 4 membres.

On représente le réseau par un graphe. Les personnes sont des points, reliés par une arête si elles sont amies.

Les deux contraintes se traduisent par :

(1) Il ne doit y avoir aucun triangle.

(2) Si deux points ne sont pas reliés, il en existe exactement deux autres qui leur sont reliés.

C'est la situation du « losange » ci-contre.

D'après (1), les sommets A1 (Alice) et A2 (Arielle)

ne peuvent être reliés car ils le sont à B (Bob).

D'après (2), ils le seront aussi à un quatrième sommet,

B12. Il ne pourra exister aucun autre point sans contredire

les conditions. Le graphe contiendra donc quatre points.

2a. Si Bob a 5 amies, il y aura 16 membres dans le réseau.

B est relié cette fois à A1, A2, A3, A4 et A5. Pour chaque couple

(Ai, Aj), d'après (2), il existe, outre B, un unique point Bij relié

à la fois à Ai et Aj. Mais aucun Bij ne peut être relié à un autre

point Ak sans contredire cette condition. De même, chaque

Ai ne peut être relié qu'à B et aux quatre Bij. Dans le graphe

représentant la situation, il n'y a donc pas d'autres sommets

que B, les cinq Ai et les dix Bij. Total : seize sommets.

Vous pourrez consulter le graphe sur Affairedelogique.com

2b. Un réseau où Bob aurait trois amies est impossible.

Plus généralement, si Bob a q amies, on constate que chaque

personne a q amis. Il y a sur le graphe le sommet B, q som-

metts Ai et les q(q-1)/2 Bij. Si q = 3, cela fait p = 7 sommets.

Or, un réseau de p points d'où q arêtes partent de chaque

point a pq/2 arêtes. Impossible si pq est impair.

CARTE
BLANCHEDe la matière
grise pour voir
la vie en rose

Par SYLVIE CHOKRON

Nous n'arrivons pas toujours à envisager l'avenir sous son meilleur jour, surtout depuis la pandémie de Covid-19. Pourtant, de nombreuses études montrent que nous aurions tout intérêt à être plus optimistes. En effet, les optimistes feraient l'expérience d'affects plus positifs, d'un bien-être plus important, et seraient plus résilients face à des événements négatifs. Ce n'est pas tout : ils jouiraient également d'une meilleure santé, d'une plus grande longévité, et se remettraient même plus facilement d'une intervention chirurgicale !

Voilà de quoi rendre les optimistes encore plus optimistes. Mais naît-on optimiste ou, à défaut, peut-on le devenir ? C'est la question que se sont posée plusieurs chercheurs ces vingt dernières années. Ainsi, Gian Vittorio Caprara, de l'université du Mississippi du Sud, et ses collègues de l'université de la Sapienza, à Rome, ont utilisé la méthode des jumeaux pour distinguer les effets génétiques des effets environnementaux sur l'estime de soi, la satisfaction dans la vie et l'optimisme. Pour cela, ils ont inclus dans leur étude 428 paires de jumeaux hommes et femmes. Leurs résultats montrent que, si l'estime de soi et le sentiment d'une vie épanouie semblent dépendre des mêmes gènes, l'optimisme semble, lui, moins déterminé génétiquement et plus dépendant des conditions environnementales et de nos expériences.

Moins de maladies

Si tout n'est pas déterminé génétiquement, pourrions-nous donc apprendre à devenir plus optimistes ? C'est le défi que s'est lancé Laura King, de l'Université méthodiste du Sud, à Dallas, en demandant à des participants d'écrire pendant vingt minutes, quatre jours d'affilée, sur l'événement le plus traumatisant de leur vie, sur ce qui pourrait leur arriver de mieux, sur ces deux thèmes ou sur un événement – dit « contrôle » – n'impliquant aucune émotion. L'humeur des participants était mesurée avant et après cet exercice, et les données médicales des sujets étaient collectées avec leur accord.

Trois semaines plus tard, des données sur le bien-être ressortaient qu'écrire sur un avenir positif était moins stressant qu'écrire sur un traumatisme, et était associé de manière significative à une sensation subjective de bien-être, comme on pouvait s'y attendre. Mais le fait le plus intéressant réside peut-être dans ce qui s'est passé pendant les cinq mois suivants... A savoir une réduction franche des maladies chez les sujets qui avaient écrit sur leur vécu, que ce soit sur un trauma ou sur leur meilleur avenir possible, et non chez ceux de la condition « contrôle ».

Dans une troisième expérience, Madelon Peters et ses collègues du département de psychologie clinique de l'université de Maastricht ont obtenu les mêmes résultats, mais, cette fois-ci, en ne comparant que la situation d'écriture sur un avenir radieux et celle sur un sujet non émotionnel.

On peut donc apprendre à être plus optimiste et en bénéficier même sur le plan physique ! Mais où cela se passe-t-il dans notre cerveau ? Han Lai, de l'université de Chengdu, en Chine, et ses collègues hongkongais se sont intéressés aux corrélats neuro-anatomiques de l'optimisme chez 231 étudiants âgés de 16 à 20 ans. Ils ont ainsi découvert que l'optimisme était lié à la densité de matière grise d'un petit noyau dans chaque hémisphère cérébral : le putamen. Ce noyau est impliqué dans nos mouvements, dans nos comportements et dans l'apprentissage, mais très certainement aussi dans nos émotions puisqu'il est intimement lié à une autre structure : le noyau accumbens qui participe à notre sentiment de bonheur. Voilà de quoi réconcilier la psychologie positive et les neurosciences qui s'accorderont sur une mesure à prendre en urgence : s'entraîner à envisager un avenir radieux pour stimuler notre putamen, développer sa matière grise et apprendre ainsi à voir la vie en rose ! ■

Sylvie Chokron

Directrice de recherche au CNRS,
Laboratoire de psychologie de la perception,
université Paris-Descartes et Fondation
ophtalmologique Rothschild

« Le sol, c'est un patrimoine,
notre devoir est de le transmettre »

ENTRETIEN - Spécialiste des liens entre les champignons et les racines des plantes, Marc-André Selosse livre dans son dernier ouvrage, « L'Origine du monde », un plaidoyer pour mieux respecter les sols

Professeur au Muséum national d'histoire naturelle à Paris, Marc-André Selosse est un spécialiste des liens entre les champignons du sol et les racines des plantes, une symbiose essentielle aux deux partenaires. Dans son dernier livre au titre provocateur, *L'Origine du monde* (Actes Sud, 480 p., 24 €), il nous invite à un périple souterrain à travers les sols et leur vie débordante, tout en pointant les dommages que nous leur faisons subir. Un vibrant plaidoyer pour inventer des gestes respectueux de ces écosystèmes d'une formidable biodiversité, largement ignorée, car invisible.

Le sol serait-il donc à « l'origine du monde » ?

Oui, il est bel et bien à l'origine du monde actuel. Il influence le climat tantôt négativement, quand il est source de gaz à effet de serre, tantôt positivement, quand il stocke de la matière organique. Par ailleurs, les eaux des rivières et des fleuves sortent des sols où elles se sont chargées en nutriments et sels minéraux. Les sols « pleurent » ainsi dans les océans, alimentant leur fertilité. Voilà pourquoi la plupart des poissons sont pêchés le long des continents, là où les algues se développent – et pourquoi les pêcheurs bretons veulent pêcher au large de la Grande-Bretagne... Et puis, le sol joue un rôle central dans le cycle de l'eau. Il la retient comme une éponge et va écrier les crues, soutenir les étiages et créer des réserves d'eau dans lesquelles puisent les humains et, surtout, les plantes.

Avant la mise en place des sols, à quoi ressemblait la surface de la Terre ?

Elle présentait une dynamique d'oued, entre inondations brusques et sécheresses totales. Il n'y avait pas de plantes, mais juste de petites croûtes de microbes, un peu comme celles qui ornent les façades de nos immeubles. Et les océans, près des côtes, étaient moins fertiles.

Quelle est l'alchimie de ces écosystèmes ?

Un sol, c'est de la matière organique morte en devenir, sous l'effet du vivant qui recycle ainsi des sels minéraux. Ce sont également des fragments minéraux colonisés par des microbes qui les dissolvent, notamment par des processus d'acidification locale. La fertilité ainsi libérée sert à nourrir les plantes. Et le sol contient des gaz qui y pénètrent, eux aussi en devenir sous l'effet du vivant. L'oxygène est ainsi consommé pour la respiration. Ici et là, dans des sols sans oxygène (anoxiques), des bactéries fabriquent du méthane. Ailleurs encore, certaines bactéries utilisent l'azote atmosphérique pour produire des protéines : c'est la source du stock d'azote du sol.

Les sols hébergent plus du quart des espèces connues – encore ne connaissons-nous qu'à peine 1 % des microbes. Entre 50 % et 75 % de la masse vivante des écosystèmes se trouvent sous terre. Dans nos régions, un gramme de sol forestier contient des millions de bactéries, appartenant à plusieurs milliers d'espèces, des milliers d'espèces de champignons, un millier d'amibes et des milliards de virus, d'un nombre inconnu d'espèces. La biodiversité, on en parle autant qu'on la foule aux pieds...

Comment se construisent les sols actuels ?

Par un processus en miroir de celui qui opère en surface, à mesure que la végétation se complexifie. Cela commence avec les croûtes microbiennes qui patinent les roches nues ; puis se développent des croûtes de lichen et de mousses puis des herbes, et enfin des fourrés et des forêts. Sous cette succession végétale, le sol mélangeant de la roche altérée et de la matière organique s'épaissit progressivement et finit par former un sol mature – d'une épaisseur de 2 mètres dans les régions tempérées, de 10 mètres à 100 mètres sous les tropiques –, qui va ensuite évoluer très lentement. L'ensemble de ce processus prend un millénaire, au moins. C'est un patrimoine dont nous avons le droit d'encaisser les intérêts, mais notre devoir est de le transmettre.

Quand se sont-ils formés ?

Quand les plantes terrestres sont apparues, c'est-à-dire quand des algues se sont associées à des champignons pour exploiter un « sol » encore très rudimentaire. Cette symbiose a commencé il y a au moins 400 millions d'années, d'après les fossiles disponibles. Les premières plantes terrestres n'étaient pas dotées de véritables racines mais de tiges rampantes.



Marc-André Selosse, à Paris, le 5 novembre 2019.

DIDIER GOUPY/SIGNATURES

Les racines sont apparues plus tard, comme un moyen d'accueillir davantage de champignons. Cette association symbiotique perdure, car les deux partenaires y trouvent un bénéfice. Les racines, en effet, n'exploitent pas directement le sol. Elles accueillent des champignons qui puisent dans le sol les sels minéraux qu'ils redistribuent ensuite à la plante, en échange des sucres – fabriqués par photosynthèse – que celle-ci leur fournit.

Pourquoi cette symbiose a-t-elle été un bouleversement majeur ?

Parce que les plantes, grâce aux champignons, ont acquis une capacité accrue d'exploiter le sol et donc de faire de la photosynthèse. Elles ont pu nourrir encore plus les champignons, qui sont devenus encore plus capables d'exploiter le sol. Un cercle vertueux s'est installé. Cette coopération a fait chuter le CO₂ de l'atmosphère. D'une part, le gaz carbonique a été massivement transformé – par photosynthèse – en plantes vivantes ou mortes (dans les sols). D'autre part, les roches se sont altérées plus vite dans les sols qu'en surface. Résultat, elles ont injecté du calcium et du magnésium, par les cours d'eau, dans les océans. Là, ces éléments ont précipité sous forme de calcaire en pompant le CO₂ atmosphérique. Résultat, le climat s'est massivement refroidi.

Sans plantes et sans sol, pas d'atmosphère riche en oxygène...

En effet. Un des sous-produits de la photosynthèse est l'oxygène, dont le taux atmosphérique s'est mis à augmenter. Première conséquence, les incendies sont apparus et ont commencé à se propager (avant, il n'y avait pas grand-chose à brûler, et les feux ne s'entretenaient pas dans une atmosphère contenant moins de 15 % d'oxygène). Résultat, les premiers charbons se sont formés il y a environ 400 millions d'années. Mais, en plus, comme il y avait plus d'oxygène dans l'air, de plus gros animaux ont pu se développer car ils pouvaient plus facilement respirer. Des poissons – nos ancêtres – se sont hissés sur terre, capables de respirer assez pour porter leur propre poids hors de l'eau.

Mais, aujourd'hui, nous piétons les sols...

La façon dont nous les traitons n'est pas durable. L'excès de labour, par exemple, augmente d'un facteur 10 à 100 leur érosion. Résultat, nos sols labourés sont en train de fondre, trop lentement pour qu'on s'en rende compte, et pourtant la dégradation des sols

affecte déjà la vie de 3 milliards et demi d'individus dans le monde. D'ici trente ans, leur épuisement provoquera la migration de 50 millions à 700 millions de personnes.

Pourra-t-on nourrir l'humanité sans faire appel à des pratiques agricoles intensives ?

De nombreuses civilisations amérindiennes n'ont jamais utilisé de charrues : elles plantaient dans un trou... et c'est tout ; la main-d'œuvre pour désherber, par ailleurs, ne manquait pas. On peut donc nourrir de vastes civilisations sans labour. La charrue augmente certes les rendements à court terme, ce qui a conduit à son adoption en Europe. Mais, aujourd'hui, la permaculture, qui évite le labour, obtient des rendements réduits de seulement 10 % au plus. Ce type d'agriculture maintient un couvert végétal entre deux cultures, c'est-à-dire durant les « intercultures » (entre la récolte d'une culture et le semis de la suivante). Ces méthodes conservent la fertilité naturelle. Mais il faut poursuivre les recherches pour les généraliser – pour la pomme de terre, par exemple, la permaculture reste difficile.

Inonder les sols cultivés d'engrais à deux effets pervers...

Oui, en créant une double dépendance des plantes, vis-à-vis des engrais et vis-à-vis des pesticides. On entre dans un cercle vicieux : en l'absence du champignon, les plantes auront besoin de plus d'engrais pour être nourries. Elles perdront aussi la protection que leur fournissait le champignon vis-à-vis des microbes pathogènes (il émet, en effet, des toxines, et sa présence stimule le système immunitaire de la plante).

Le biomimétisme pourrait nous aider à concevoir une agriculture vertueuse. Mais comment ?

Observons le fonctionnement spontané des sols, qui peut nous inspirer des alternatives à nos pratiques agricoles actuelles. La permaculture, une forme d'agroécologie, commence à être développée pour limiter le labour. Et le sol reprend vite des couleurs ! Les agroécologistes n'ont jamais cru que la nature était bonne en soi : ils proposent de gérer et d'exploiter les synergies existant dans la nature. Il y a des solutions à développer. Qu'on ne me dise pas que c'est infaisable : ce serait faire insulte à l'intelligence humaine et à la force du biomimétisme. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE ROSIER



Ouvrons la science !

Aujourd'hui près de 70% des publications scientifiques dans le monde sont en accès payant ou restreint. Pendant la crise sanitaire, cette proportion a chuté à 30 % pour les publications consacrées au COVID-19. C'est la preuve que la science peut être plus transparente et mieux partagée, pour accélérer la recherche au bénéfice de tous.

Le mouvement mondial en faveur de la science ouverte est lancé. En 2021, l'UNESCO a adopté la première recommandation mondiale pour la science ouverte, pour que la connaissance ne soit plus le privilège d'une minorité, mais un bien commun accessible de façon plus équitable.

L'UNESCO appelle ses États membres à :

- consacrer au moins 1% de leur PIB à la recherche. Aujourd'hui, quatre pays sur cinq consacrent moins de cette proportion à la recherche
- développer des financements favorables à la science ouverte et à s'assurer que toute recherche financée par des fonds publics respecte les valeurs fondamentales de la science ouverte
- investir dans les licences libres, le partage des données et des infrastructures et soutenir les chercheurs à toutes les étapes de leur carrière

Devenez un ambassadeur de la science ouverte
Rejoignez le mouvement



#ScienceOuverte

