



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 CO₂ 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

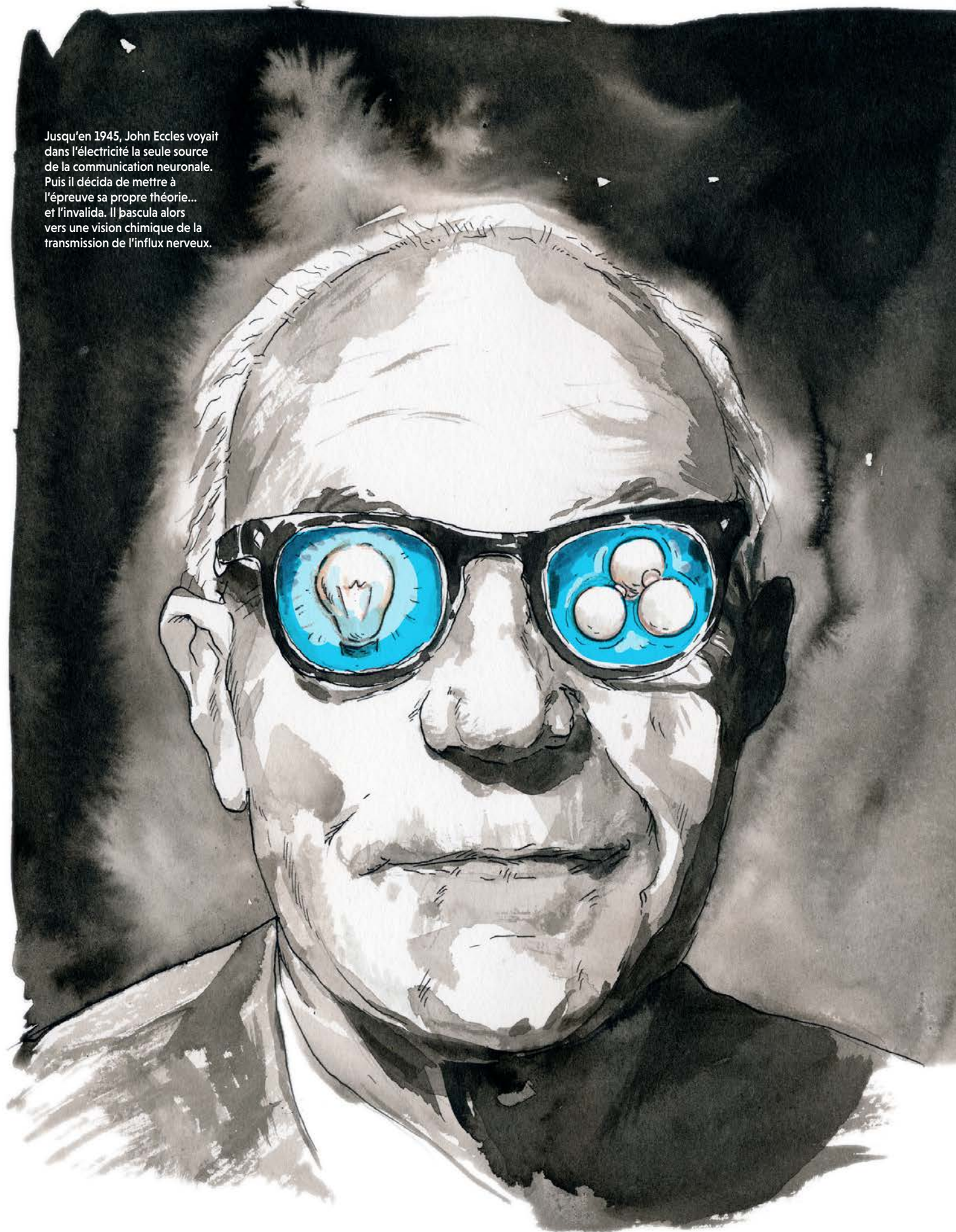
L'engouement planétaire pour le quinoa et ses répercussions sur les communautés rurales pauvres du sud de la Bolivie sont un cas exemplaire des transformations de pratiques ancestrales locales qui accompagnent la globalisation. Saines, bio, équitables, en 40 ans, les « graines des Incas » ont vu leur 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.



L'ESSENTIEL

> John Eccles, le chercheur qui a montré que les neurones communiquent par des substances chimiques, avait commencé par combattre ardemment cette théorie.

> Son revirement doit beaucoup à sa rencontre avec Karl Popper, le philosophe qui avait établi qu'une théorie doit être réfutable pour être scientifique.

> Cet épisode marquant de l'histoire des sciences montre que, pour atteindre la vérité, nous devons critiquer nos propres opinions.

L'AUTEUR



JEAN-GAËL BARBARA
chercheur en histoire des
neurosciences au CNRS,
au laboratoire Neurosciences
Paris-Seine et Sorbonne-Paris-
Cité – laboratoire Sciences,
philosophie, histoire

La volte-face du professeur Eccles

Pendant vingt ans, le neurophysiologiste australien John Eccles a défendu l'idée que les neurones communiquent par des courants électriques. Puis, soudainement, il invalida sa propre théorie et prouva que la communication est chimique. Un modèle de pensée autocritique...

Q uoi de plus difficile que de reconnaître que l'on a tort? Pire: comment parvenir à adopter le point de vue de ses adversaires en attaquant ses propres positions? C'est pourtant de cette façon qu'a eu lieu une des découvertes les plus fondamentales des neurosciences: le fait que les connexions entre neurones (les synapses) fonctionnent avec des molécules chimiques et pas seulement avec des signaux électriques.

La nouvelle fait l'effet d'un coup de tonnerre. Lors de la réunion de la Physiological Society de Londres en 1951, l'éminent neurophysiologiste australien John Eccles renie publiquement sa propre théorie sur le fonctionnement des synapses. Une théorie qui stipule que nos

neurones sont censés communiquer entre eux par des phénomènes électriques directs au niveau des synapses. Sous les yeux de l'assistance médusée, lui, le plus ardent défenseur de cette théorie, l'adversaire déclaré de tous ceux qui soutenaient un mécanisme chimique de neurotransmission, reconnaît que ce sont eux qui avaient raison.

Évidemment, en annonçant publiquement son revirement, Eccles passe pour un fou qui décrédibilise l'ensemble de son œuvre. On pense à Galilée reniant sa thèse selon laquelle la Terre tourne autour du Soleil – mais c'est pire que cela, car c'est sous la contrainte que le savant florentin avait reconnu les égarements de sa doctrine, agenouillé devant les cardinaux inquisiteurs de son tribunal ecclésiastique. En ce sens, l'abjuration de la théorie électrique qu'Eccles semble s'infliger librement est >

> d'autant plus incompréhensible, vu la véhémence et l'efficacité de ses attaques de jadis contre la théorie chimique, défendue alors par son éminent rival, sir Henry Dale.

Henry Dale avait déjà démontré que certains neurones (ceux qui relient la moelle épinière aux muscles, et ceux présents dans les ganglions nerveux) communiquaient par des substances chimiques. Eccles s'était efforcé de prouver que, si ce mécanisme était envisageable au niveau des muscles et des ganglions, ce ne saurait être le cas à l'intérieur du cerveau. Il avait échafaudé pour cela, dès les années 1930, une théorie selon laquelle les neurones dans le cerveau communiquent comme de purs conducteurs électriques, le courant passant de l'un à l'autre sans intervention de neuromédiateurs au niveau des synapses. Son argument ? La transmission neuronale se produit avec une telle rapidité qu'il ne peut s'agir que d'un phénomène électrique. Il a d'ailleurs mesuré cette vitesse grâce aux nouveaux oscillographes cathodiques dont il dispose à partir de 1935.

UN BRETTEUR VIRULENT ET OBSTINÉ, MAIS PAS OBTUS

Dans ses manœuvres pour décrédibiliser ses adversaires, Eccles ne ménage ni ses efforts ni sa hargne. C'est un bretteur, un intellectuel passionné de philosophie des sciences, de joutes verbales aussi bien que sportives – il invite souvent ses hôtes à disputer une partie de tennis sur le court privé de sa propriété. Dans son milieu, on connaît son caractère difficile, voire entêté, prompt à croiser le fer dans les débats scientifiques, se faisant volontiers l'avocat du diable.

Alors qu'est-ce qui a bien pu l'amener à changer d'avis ? Deux choses. D'abord, Eccles était certes virulent et obstiné, mais pas obtus. Il était aussi connu pour sa hargne que pour une étonnante capacité à adopter brusquement, après avoir cherché à déstabiliser un adversaire, le point de vue de ce même adversaire. Ensuite, il y a son histoire. Une histoire qui porte la marque d'un long cheminement et qui l'amènera à conceptualiser la notion d'autocritique appliquée à ses théories.

Eccles a tout d'abord cru à la théorie de la neurotransmission électrique pour des raisons philosophiques et expérimentales. Il a été un des derniers élèves d'un des grands noms de la recherche en neurosciences, sir Charles Sherrington au Magdalen College d'Oxford. Un scientifique renommé, chef de file de l'école de neurophysiologie britannique d'Oxford et Prix Nobel de médecine en 1932, auquel Eccles a voué une admiration sans bornes, allant jusqu'à déclarer qu'il était la seule personne au monde dont il pouvait accepter d'être l'élève, tant sa dimension intellectuelle et sa vision personnelle des rapports entre le corps et l'esprit lui correspondaient.

John Eccles (1903-1997)
photographié en 1963
dans son laboratoire.
C'est cette année-là qu'il reçut
le prix Nobel de physiologie
ou médecine, partagé avec Alan
Hodgkin et Andrew Huxley.



Eccles cherchait à ridiculiser ses adversaires. Et puis un jour, il adopta leur point de vue

Or Sherrington a toujours favorisé une théorie électrique de la neurotransmission, lui-même en partie pour des raisons philosophiques : il avait une vision dualiste de l'esprit et du corps, considérant que la composante immatérielle de l'esprit est d'une nature essentiellement distincte du corps. L'esprit interagit si rapidement avec le cerveau qu'il doit le faire par des processus électriques.

Comment s'étonner qu'Eccles adopta cette même vision ? Sous sa direction, il commença par étudier, dans les années 1930, la transmission synaptique dans les ganglions nerveux, puis dans la moelle épinière. Les deux hommes étaient alors en concurrence directe avec l'école de neurophysiologie américaine, qui avait commencé à prendre le pas sur l'école

d'Oxford au cours des années 1920 grâce à une avancée technique considérable. Et les résultats obtenus par Eccles, tout comme ceux de ses adversaires neurophysiologistes américains, étaient en faveur de la neurotransmission électrique. Comment, alors, imaginer un autre scénario?

RENCONTRE CAPITALE AVEC KARL POPPER

L'histoire est faite d'imprévus et se nourrit autant de sciences et d'idées que d'argent, de politique et de mariages. En 1937, Eccles prend la décision de retourner en Australie, pour deux raisons. D'abord, il peine à obtenir des crédits de recherche; ensuite, il estime que les Alliés tardent à faire front contre la montée du nazisme. De là il s'installe en Nouvelle-Zélande, en 1943, suivant le conseil de son épouse néo-zélandaise. Il poursuit alors ses recherches sur les potentiels synaptiques dans la moelle épinière à l'université de Dunedin, en Nouvelle-Zélande. Et, là encore, il acquiert une belle notoriété en défendant la théorie électrique. Pour l'instant, tout porte encore à croire que cette théorie ne fera que s'affermir. Mais c'est compter sans une rencontre décisive.

L'un de ses collègues, Steve Kuffler, émigré hongrois, introduit Eccles dans les cercles de réfugiés d'Europe en Australie, puis en Nouvelle-Zélande. Parmi ceux-ci, un philosophe viennois d'ascendance juive, Karl Popper. Popper est philosophe des sciences. Selon lui, aucune théorie scientifique ne peut être tenue pour vraie une fois pour toutes parce qu'elle aurait été vérifiée par des expériences. Une théorie n'est scientifique que si elle prend la forme d'un énoncé qui peut être non pas vérifié, mais réfuté...

Eccles, en quête de critères pour trancher la polémique sur la nature de la neurotransmission, est sensible à cette vision. Il invite Popper en 1945 à donner une série de conférences dans sa faculté. Puis, suivant sa méthode, il s'attache dès lors à présenter ses idées théoriques de manière à ce qu'elles semblent résister aux procédures expérimentales classiques de réfutation. Il propose notamment une théorie chimique faisant intervenir des ions chlorure – théorie réfutable expérimentalement, car il est possible de remplacer les ions chlorure par d'autres ions et d'observer si la transmission de l'influx est modifiée ou non.

Or au sein même de son laboratoire, Kuffler et son jeune collègue Bernard Katz mènent des >

L'expérience décisive
menée par Eccles
se déroula le 20 août 1951.
L'accouchement ce même jour
de l'épouse de Jack Coombs,
l'un des collègues d'Eccles,
la retarda quelque peu.



> recherches visant à tester directement la théorie chimique de la neurotransmission à la jonction neuromusculaire (où les neurones moteurs de la moelle épinière sont reliés aux fibres musculaires dont ils commandent les contractions). Kuffler et Katz testent le rôle de molécules dans la transmission de cet influx nerveux, et ils utilisent pour cela une technique proche de celle de l'ennemi juré, Dale. Et voilà qu'à la surprise générale, à force de vouloir contredire la théorie de la maison, ils y arrivent ! Stupeur : leurs résultats sont en accord avec la théorie chimique.

QUAND UNE THÉORIE S'EFFONDRE

Eccles ne peut plus faire machine arrière, puisqu'il a lui-même formulé ses propres idées de façon à ce qu'elles soient réfutables. Il accepte donc cette réfutation de la théorie électrique. Du moins pour la neurotransmission musculaire. Mais pour le fonctionnement des neurones du cerveau, il campe sur sa position du « tout-électrique ». Il croit pouvoir respirer, car il est pour l'instant impossible de mettre en œuvre à l'intérieur du cerveau les méthodes de mesure pharmacologiques utilisées par Kuffler et Katz, du fait qu'on ne connaît pas encore les neurotransmetteurs des neurones cérébraux. Mais cela ne suffira pas à le préserver du mouvement qui est en marche, car une innovation technique va mettre à bas son édifice.

Depuis 1950 s'est engagée une course internationale afin de tester la théorie chimique. Une nouvelle méthode a vu le jour : enregistrer les variations de potentiel électrique des neurones de part et d'autre de leur membrane au moyen d'une fine microélectrode de verre. Implantée dans le neurone, cette électrode possède un orifice d'un diamètre d'un demi-micromètre et permet de mesurer la valeur exacte du potentiel électrique interne du neurone en se faisant une idée des échanges d'ions impliqués.

La course qui s'est engagée dans le monde pour savoir qui sera le premier à réaliser de tels enregistrements s'apparente, par l'ampleur des révolutions neuroscientifiques qu'elle suscitera ultérieurement, à la « course à l'espace » qui s'engage entre les États-Unis et l'URSS à partir de 1957. Entre ces deux courses, il y a certes une différence d'échelle. Mais en biologie, comme Eccles le soulignera plus tard, il n'y a pas encore de *big science*, une science organisée à l'échelle internationale par la coopération de grandes institutions, et tout se fait encore à l'échelle de petits laboratoires, avec des recherches dont les conséquences ne sont cependant pas moins importantes pour l'humanité.

Eccles s'engage dans cette course d'une façon qui lui ressemble : il propose à un de ses adversaires de venir travailler dans son laboratoire... Cet Archibald McIntyre construit alors un dispositif pour enregistrer des neurones à

l'aide de microélectrodes en verre. Eccles met un peu de temps à comprendre tout l'intérêt de cette technique, mais il finit par se dire que s'il arrivait à enregistrer la différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur d'un neurone, par exemple un motoneurone de la moelle épinière d'un chat, il serait à même de réfuter l'une des théories de la neurotransmission en enregistrant le signe de la déflexion du potentiel lors d'un phénomène d'inhibition.

Dès qu'il comprend cela, et avec son goût de la compétition, Eccles veut à tout prix participer à cette course. Lui que l'on surnomme à Dunedin « Synaptic Jack », le spécialiste mondial des synapses, ou encore « The Great White God » en raison de sa puissance et de son ardeur au

CES SCIENTIFIQUES QUI SE CRITIQUAIENT EUX-MÊMES

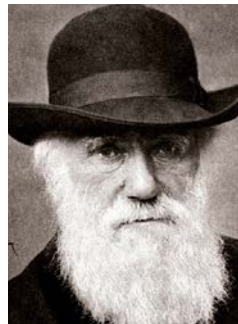
Un des exemples les plus célèbres de pensée qui lutte contre elle-même pour s'approcher de la vérité est celle de Charles Darwin. Dans sa construction de la théorie de l'évolution, le célèbre naturaliste confia l'inconfort que lui causait sa propre découverte, car elle remettait en cause l'idée de la création biblique. Fils de pasteur, marié à une fervente pratiquante, Darwin expliqua avoir tenté de trouver des failles dans sa propre théorie, mais avoir finalement dû y renoncer et accepter le verdict de l'observation et de la raison.

Un autre grand esprit et grand nom de la science, Louis Pasteur, invitait ses collaborateurs à défier ses vues en cherchant des preuves expérimentales contraires aux

siennes. Toujours au cours de ces mêmes années, le physiologiste Claude Bernard, considéré comme le père de la médecine expérimentale, était marqué quant à lui par une forme d'indifférence à la pérennité des théories scientifiques. Il rappelle en cela la philosophie de Karl Popper, pour qui aucune théorie scientifique digne de ce nom n'est définitive. Son caractère scientifique se reconnaît même au fait qu'elle est formulée de façon à pouvoir être invalidée – et donc éventuellement remplacée par une autre.

Ce principe de pensée est à l'opposé de la croyance, qui admet une vérité comme définitive et n'envisage pas de la remettre en question selon les éléments d'observations ou d'argumentation contraires. La démarche mentale d'autoréfutation est donc le fruit d'une véritable discipline et d'un apprentissage, dont dépend – l'histoire des sciences nous le montre – le progrès des idées et des techniques dans une société. Une leçon à méditer, à l'ère d'Internet où l'on peut facilement croire à toutes sortes de théories, notamment conspirationnistes, sans avoir le réflexe de les passer au crible de l'esprit critique.

J.-G. B.



Pasteur et Darwin sont deux exemples de génies scientifiques qui cultivait l'esprit d'autocritique. Le premier en demandant à ses élèves de trouver des preuves contre sa théorie, le second en les cherchant lui-même...



Eccles monta une expérience qui lui donna tort, puis attendit le bon moment pour annoncer ses résultats



travail, ne peut manquer une telle occasion de se mettre en valeur. Il requiert l'aide de deux collègues: Jack Coombs, chargé de construire un nouvel appareil de stimulation ainsi qu'une unité électronique d'enregistrement, et Lawrence Brock, qui fabriquera des électrodes ultrafines en étirant des tubes de verre sous une loupe binoculaire avant de remplir les micro-électrodes d'une solution de chlorure de potassium concentrée, jusqu'à la pointe. Un travail de fourmi, pour un enjeu colossal.

UN ACCOUCHEMENT DIFFICILE

L'expérience décisive a lieu le 20 août 1951. L'équipe est affairée autour d'un chat anesthésié. Eccles est sur le point de faire des essais pour introduire une microélectrode dans un motoneurone du chat. Ce neurone présente des synapses formées avec d'autres neurones – excitateurs ou inhibiteurs – de la moelle épinière de l'animal. L'expérience consiste à mesurer les potentiels électriques qui apparaissent dans le neurone quand les neurones inhibiteurs reliés par des synapses sont activés au moyen d'une autre électrode de stimulation. Et de ce résultat dépend le verdict final de l'expérience.

En effet, rappelons les deux hypothèses qui s'affrontent. D'un côté, la théorie électrique prédit que la synapse est purement électrique et que, par conséquent, l'inhibition se manifeste par l'annulation du potentiel électrique du neurone enregistré au niveau des synapses. À cette vision s'oppose l'hypothèse chimique, selon laquelle le potentiel électrique du second neurone pourrait basculer dans les valeurs négatives car des messagers chimiques provoqueraient l'ouverture de petits pores dans le neurone (des canaux ioniques), ce qui se traduirait par une entrée d'ions chlorure dans le neurone et une accumulation de charges électriques négatives. Le dispositif expérimental est prêt. Qu'est-ce qui peut encore l'arrêter?

Eh bien... La femme de Coombs est sur le point d'accoucher.

La nouvelle provient du domicile du chercheur lui-même. Abandonnant leurs instruments, Coombs et Eccles se précipitent dans leur voiture, pendant que Brock veille sur le chat. Après l'accouchement, la mère et l'enfant sont laissés aux soins d'un médecin, et les essais peuvent enfin commencer.

LA VÉRITÉ PAR LA CONTRADICTION

Rapidement, Eccles et ses collègues obtiennent un enregistrement exploitable. Sous leurs yeux, la trace de potentiel du neurone enregistré subit une inflexion vers le bas. C'est ce qu'on appelle une hyperpolarisation, qui signifie que le potentiel électrique a basculé dans le négatif, récusant la théorie du tout-électrique. La conclusion est sans appel. Eccles comprend qu'il vient de réfuter lui-même la théorie qu'il a défendue pendant vingt ans.

Son premier réflexe est de cacher les résultats. Il imagine même de prendre des photographies de ses enregistrements à l'envers. Pourquoi? Eh bien, McIntyre est à côté de lui, et celui-ci est toujours en lien avec ses concurrents américains. Ce serait une catastrophe s'il allait tout révéler. Eccles est conscient du caractère révolutionnaire de sa découverte et de sa valeur pour un prix Nobel! Toujours capable de changer d'avis rapidement, dès lors qu'il devient convaincu par les arguments adverses, il a pris son parti: il va admettre la vérité et être le premier à la révéler.

Reste à trouver le bon moyen de la mettre en scène. L'occasion se présente quand le président du Magdalen College d'Oxford invite Eccles à venir donner une série de huit conférences. Puis il fait son coup de théâtre au milieu de la réunion de la Physiological Society de Londres. Il explique que, suivant la philosophie de son éminent ami, Karl Popper, il a cherché à réfuter sa propre théorie et que, contre toute attente, il y est parvenu. Quelques mois plus tard, la prestigieuse réunion du Cold Spring Harbor Laboratory, aux États-Unis, a lieu sur le thème du neurone. Eccles y expose ses résultats organisés sous forme d'un modèle qui reprend celui de ses collègues britanniques, Alan Hodgkin et Andrew Huxley.

L'ancien rival d'Eccles, Henry Dale, qui avait depuis le début défendu la théorie chimique de la synapse, comparera alors en 1954 ce revirement à la conversion de saint Paul sur le chemin de Damas. À l'instar de ce dernier, Eccles, après avoir «persécuté» les tenants de la neurotransmission chimique, est devenu leur plus ardent défenseur. Seule différence: la lumière de la conversion n'est pas venue du Christ, mais du souci d'invalider ses propres convictions pour s'acheminer vers la vérité. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-G. Barbara, **La Naissance du neurone**, Vrin, pp. 120-131, 2010.

J.-G. Barbara, **Le Paradigme neuronal**, Hermann, 2010.

J. Scott, **Sir John Carew Eccles [...]**, *Proc. Am. Phil. Soc.*, vol. 150(4), pp. 673-678, 2006.

P. Andersen, **The view from inside**, *Brain Research Bulletin*, vol. 50(5/6), pp. 305-306, 1999.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique et calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

LES INTRIGANTS CHEMINS DE LA FOURMI DE LANGTON

Elle va et vient et occupe petit à petit une zone infinie du plan:
la fourmi automatique de Langton décrit des trajectoires
dont la complexité ne livre que lentement ses secrets.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au
laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye
a notamment publié :
**Les mathématiciens
se plient au jeu**,
une sélection de ses
chroniques parues
dans *Pour la Science*
(Belin, 2017).

Une compétition permanente se déroule entre chercheurs en mathématiques et en informatique: il s'agit de trouver des systèmes de règles aussi simples que possible engendrant de la complexité et de l'imprévisible. D'étonnantes découvertes sont régulièrement proposées et il faut souvent des années pour comprendre ces situations définies par quelques mots!

La «fourmi de Langton» est l'un de ces systèmes mystérieux. On l'étudie depuis plus de trente ans. D'année en année, on comprend mieux la complexité qu'elle engendre à partir de presque rien, mais la conjecture la plus simple la concernant reste non résolue.

Cet objet a été défini en 1986 par Christopher Langton, qui était alors chercheur en informatique à l'université du Michigan à Ann Arbor. Il s'intéressait à ce qui, en informatique, peut simuler la vie et il participa à la création du domaine de recherche dénommé «vie artificielle». Voici la définition de sa fourmi:

«Sur un plan recouvert d'un quadrillage de cases blanches ou noires se déplace une flèche, la fourmi, qui prend l'orientation nord, sud, ouest, ou est. Si elle est sur une case blanche, elle tourne de 90° vers la droite, si elle est sur une case noire elle tourne de 90° vers la gauche. Ensuite, elle change la couleur de la case et avance d'une case dans la direction qu'elle indique, puis recommence. »

L'encadré 1 montre ce que donne cette règle sur un plan composé de cases blanches. Elle emprunte un trajet tortueux en laissant temporairement derrière elle des traces de son passage (puisqu'elle change la couleur des cases par où elle passe). Elle repasse souvent là où

elle est déjà passée, et donc son comportement dépend en partie de son propre passé.

Son trajet est doublement surprenant. Aux étapes 97, 185 et 369, le dessin des cases présente un centre de symétrie. Pourquoi? On ne sait pas l'expliquer clairement. Voyant cela, on aurait pu s'attendre à ce que, régulièrement, une configuration symétrique réapparaisse. Ce n'est pas le cas, et après l'étape 400 une confusion totale semble s'emparer des mouvements de la fourmi: celle-ci dessine sur le plan un motif d'apparence aléatoire de plus en plus grand. Cette phase désordonnée se prolonge environ sur 10 000 étapes. Puis soudain, et c'est la seconde surprise, elle adopte un comportement répétitif décrivant un parcours complexe enroulé sur lui-même et se décalant d'une case en diagonale toutes les 104 étapes. Elle part à l'infini en laissant une trace assez large derrière elle, trace dénommée «l'autoroute». La suite est alors prévisible: du désordre est né, sans raison apparente, une structure ordonnée qui croît indéfiniment et régulièrement.

Vous pouvez mener vos propres expériences avec des logiciels disponibles sur Internet (*voir la bibliographie*). Vous remarquerez alors que, même si le plan comporte au départ des cases noires en nombre fini, et même s'il y en a beaucoup, alors, sans exception, la fourmi se met au bout d'un certain temps à construire une autoroute ayant la même forme que celle obtenue à partir du plan entièrement blanc. Seule la direction diagonale de l'autoroute change; elle peut être NO, NE, SE ou SO. J'ai essayé un très grand nombre de configurations de départ et d'autres en ont essayé encore plus: il ne se produit jamais autre chose que l'apparition de l'autoroute.