

souches de champignons différentes. De plus, les hyphes entremêlés dans le sol se connectent par des ponts joignant les cellules. Les filaments des champignons du sol forment ainsi un réseau interconnecté, comparable à celui d'un réseau de neurones ou à un réseau internet. Certains n'hésitent pas à pousser l'analogie plus loin en parlant d'un *Wood Wide Web*, un réseau internet forestier (voir la figure page ci-contre).

Cependant, si l'échange de substances d'un arbre à l'autre par le sol est bien démontré en conditions contrôlées et entre deux jeunes plants partageant le même pot, plusieurs points importants restent débattus. Le premier est la voie réelle de ces échanges : il est difficile de prouver sans équivoque que les substances carbonées échangées voyagent effectivement par voie fongique. Les racines sécrètent en effet de grandes quantités de substances carbonées dans le sol et celles-ci pourraient être absorbées directement par le champignon mycorhizien voisin, sans emprunter le *Wood Wide Web*.

Par ailleurs, la quantité de carbone et de nutriments transférée semble en réalité très faible : selon les études, de 1 à 10% seulement de la totalité des produits assimilés par l'arbre donneur seraient retrouvés dans l'arbre receveur, et certains considèrent même cette quantité négligeable et qu'il est peu probable qu'elle représente une source trophique importante pour l'arbre receveur...

Néanmoins, certaines de ces substances carbonées, même en quantité infime, suffiraient à véhiculer des informations d'une plante à l'autre, ce qui appuierait la notion de communication par le sol entre les plantes. Ces signaux informatifs joueraient un rôle dans la germination et le développement des plantules, dans les défenses et la « vaccination » des plantes contre les attaques.

LES PLANTES NE SONT PAS DES LÉGUMES

Émettre et percevoir des signaux, répondre de façon adaptée, communication, sensibilité... La découverte des étonnantes capacités des plantes a bousculé la vision de la société, et de la communauté scientifique, sur le monde végétal. Du statut d'êtres insensibles où elles végétaient depuis plus de 2000 ans et les travaux d'Aristote, dont la vision hiérarchique et anthropocentrée du monde a curieusement traversé les siècles jusqu'à nous, intacte dans ses grandes lignes, elles sont passées brusquement à celui d'êtres intelligents. Mais les contours de l'intelligence sont multiples et discutés par les spécialistes ! C'est un exercice difficile, et de fait, l'intelligence n'a toujours pas de définition consensuelle.

Si l'intelligence se résume à percevoir le monde, et répondre de façon adaptée aux signaux perçus, alors oui, les plantes sont intelligentes, mais au même titre que tous les êtres vivants, bactéries, vers de terre ou humains.

Si l'intelligence inclut aussi la résolution de problèmes, la mémorisation, le traitement de l'information, la communication... alors là encore, les plantes sont intelligentes.

Mais si l'intelligence ne peut se départir de la notion de conscience, de volonté et de prise de décision, d'émotions, d'empathie... cette fois rien ne prouve que les plantes sont intelligentes. En tout cas, rien ne prouve que leur intelligence soit comparable à la nôtre.

Des spécialistes de « l'intelligence en essaim » la comparent à celle des colonies d'insectes sociaux où chaque membre spécialisé dans une tâche participe à l'intelligence collective du groupe. L'intelligence des plantes pourrait plutôt être à cette image, distribuée dans toutes les cellules vivantes du corps végétal où chacune est dotée de milliers de senseurs moléculaires et de capacités de réponse adaptée. Les réponses sont intégrées à l'échelle des tissus, *via* de nombreux échanges de signaux internes, chimiques ou électriques, puis à l'échelle des organes et de la plante entière. Une intelligence diffuse dont le résultat collectif est quoi qu'il en soit hautement performant et réactif.

Depuis 2005, une nouvelle discipline, la « neurobiologie végétale », a émergé. Les pionniers, Stefano Mancuso et František Baluška, de l'université de Bonn, en Allemagne, ont été vivement critiqués par la communauté scientifique. Usant de métaphores et de parallèles avec les capacités cognitives humaines, ce courant de pensée flirte avec l'anthropomorphisme, allant jusqu'à identifier dans les tissus des racines des ressemblances anatomiques avec les neurones d'un cerveau humain.

C'est sans doute trop. L'anthropomorphisme est un outil utile quand il est bien dosé. Mais il devient contreproductif lorsqu'il est omniprésent, dans les livres ou les médias, qui usent et abusent de mots et d'analogies scientifiquement discutables. Le choix des mots n'est jamais anodin et substituer « l'amitié » à la « coopération », les « cris » à la « communication chimique volatile », la « prise de décision » à la « réponse adaptée » témoigne de cette volonté affichée d'humaniser les plantes.

Pourquoi vouloir à tout prix comparer les plantes à l'homme ? La science-fiction fait de même avec les formes de vie extraterrestres, comme si l'autre faisait un peu moins peur quand il nous ressemble... Le danger principal de l'anthropomorphisme est de dériver vers l'anthropocentrisme, qui place l'homme au centre du monde, à part (voire au-dessus), comme un modèle absolu à atteindre, dans un refus prétentieux d'en faire une espèce parmi les autres. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. BÉRUT ET AL., Gravisensors in plant cells behave like an active granular liquid, *PNAS*, 1801895115, 2018.

M. AMEYE ET AL., Green leaf volatile production by plants: a meta-analysis, *New Phytologist*, prépublication en ligne, 2017.

M. VAN DER HEIJDEN ET AL., Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future, *New Phytologist*, vol. 205, pp. 1406-1423, 2015.

M. MESCHER & C. DE MORAES, Role of plant sensory perception in plant-animal interactions, *Journal of Experimental Botany*, vol. 66, pp. 425-433, 2015.

L'ESSENTIEL

- Dès le XVIII^e siècle, on a découvert des phénomènes bioélectriques chez les plantes.
- Ils s'apparentent à l'activité de neurones en ce qu'ils consistent notamment en la transmission de potentiel d'action (des inversions locales de polarité électrique des membranes) sur de longues distances.
- Les acteurs moléculaires de ces réseaux de communication sont pour une grande part homologues à ceux des animaux.
- On trouve également leurs équivalents chez les microorganismes : la signalisation électrique serait une modalité très ancienne, datant des premières formes de vie.

LES AUTEURS



FRANÇOIS BOUTEAU
Laboratoire interdisciplinaire
des énergies de demain,
université Paris-Diderot



PATRICK LAURENTI
Laboratoire interdisciplinaire
des énergies de demain,
université Paris-Diderot

La neurobiologie végétale, une idée folle ?

La transmission de signaux électriques sur de longues distances n'est pas l'apanage des neurones des animaux. Des phénomènes similaires ont cours chez les plantes, et seraient même partagés par l'ensemble du vivant.

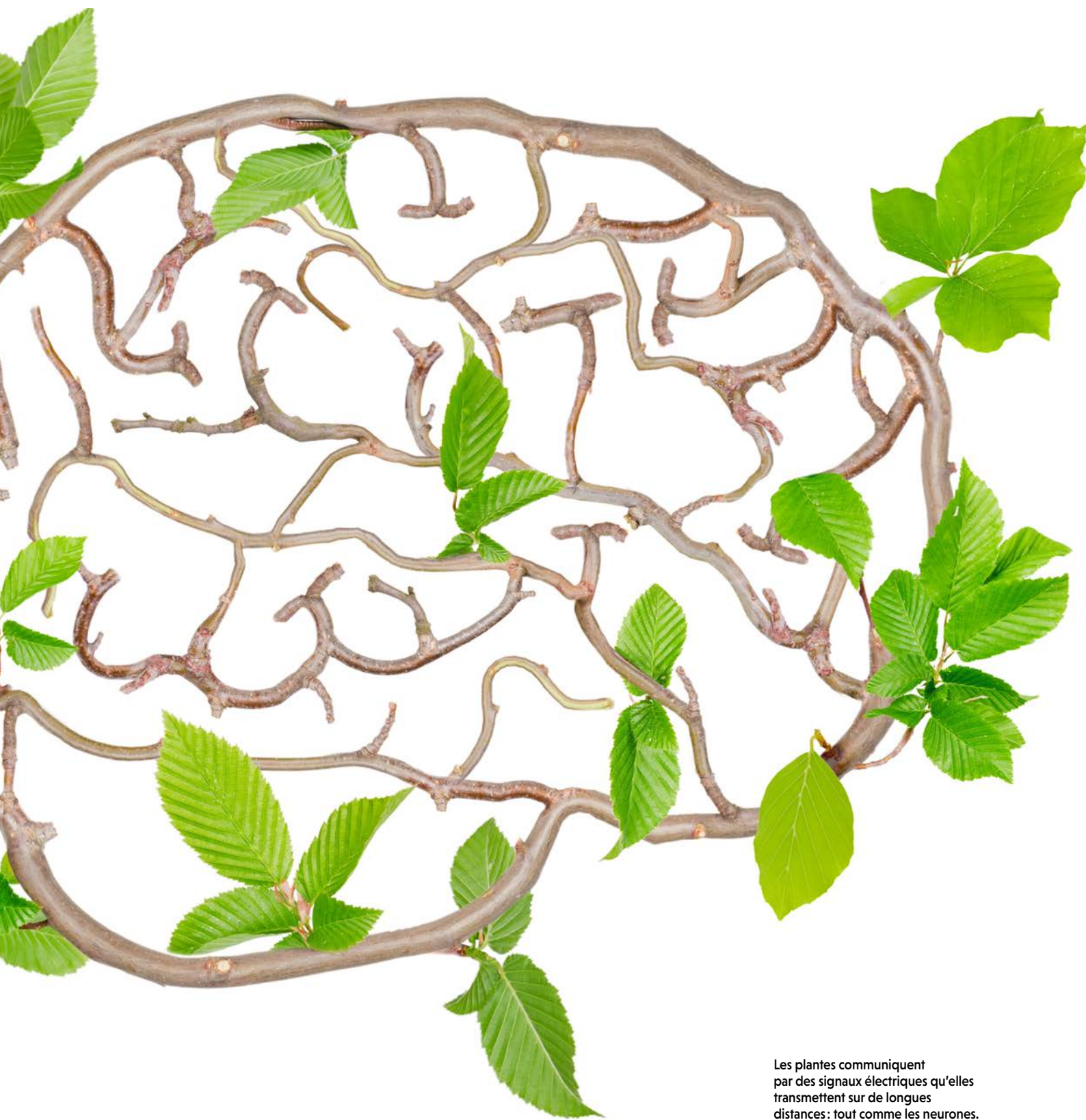
D

epuis une décennie, une controverse enflammée fait rage autour de l'idée d'intelligence. Elle oppose les chercheurs qui voudraient la restreindre aux seules activités conceptuelles humaines à ceux qui non seulement l'utilisent pour divers organismes vivants, mais l'octroient aussi volontiers aux systèmes informatiques. À peu près au centre de la mêlée, une

polémique du même ordre se pose sur les « capacités insoupçonnées » des plantes, à partir desquelles certains auteurs n'hésitent pas à en déduire qu'elles sont dotées d'intelligence. Nous n'entrerons pas dans ce débat qui nécessiterait une solide clarification épistémologique du concept d'intelligence.

Néanmoins, un ensemble de données moléculaires, physiologiques et comportementales indiquent qu'un certain nombre de mécanismes neurobiologiques pourraient être partagés par l'ensemble des eucaryotes (les organismes dont les cellules ont un noyau), voire par l'ensemble des organismes vivants. Dès lors, en se plaçant dans le contexte phylogénétique et en abandonnant une vision idéaliste des différentes lignées du vivant, la >





Les plantes communiquent
par des signaux électriques qu'elles
transmettent sur de longues
distances : tout comme les neurones.

► neurobiologie des plantes n'est peut-être pas une idée aussi folle qu'on le pense.

Et cette idée n'est pas récente ! Suite aux travaux pionniers de l'Italien Luigi Galvani à la fin du XVIII^e siècle, l'explorateur Allemand Alexander von Humboldt réalisa de multiples expériences concluant à une similitude de la nature bioélectrique des animaux et des plantes. Plus encore, à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, des potentiels d'action, c'est-à-dire des messages électriques qui se transmettent (*voir l'encadré page ci-contre*), furent mis en évidence chez divers végétaux, principalement la dionée et le mimosa pudique. Ainsi, l'excitabilité de certaines cellules végétales serait un moyen de communication intercellulaire chez ces organismes.

Malgré ces démonstrations répétées, le concept de système nerveux végétal perdit de sa popularité à l'occasion de la découverte des hormones végétales. La communauté scientifique opta alors en faveur d'un mécanisme de signalisation chimique. La découverte de potentiels d'action non seulement chez quelques plantes spécialisées, mais chez toutes les autres échappa au final à la majorité des spécialistes des plantes.

COMMUNICATION LONGUE DISTANCE

Pourtant, preuve avait été faite que la signalisation électrique sur de longues distances constitue un moyen efficace de communiquer de cellule à cellule chez l'ensemble des eucaryotes. Chez les plantes, des signaux électriques à propagation rapide sont produits en réponse à de nombreux stimuli : des pluies acides, une irradiation, un choc froid, un stress osmotique (quand les concentrations en composés divers varient notablement d'un côté à l'autre d'une membrane biologique) ou une attaque d'agents pathogènes.

Ces signaux résultent de flux d'ions à travers la membrane cellulaire conduisant à une dépolarisation transitoire locale du potentiel électrique de la membrane, cette variation dépendant du type de stimulus et des ions circulant. Chez les plantes, au moins trois types de signaux électriques se propageant à longue distance ont été identifiés : deux sont typiques des végétaux (les ondes de dépolarisation lente et les hyperpolarisations transitoires), et nous n'en parlerons pas ici, alors que ceux de la troisième catégorie, les potentiels d'action, ont les mêmes caractéristiques (*voir la figure ci-contre*) que leurs homologues du monde animal : ils obéissent à la loi du « tout ou rien », se déplacent à vitesse et

amplitude constantes et sont suivis d'une période réfractaire.

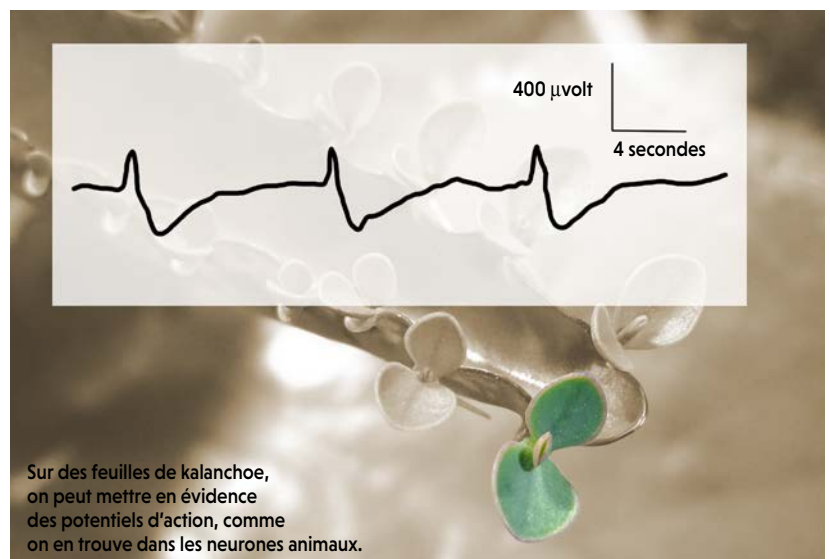
Chez les plantes, les potentiels d'action se propagent sur de longues distances principalement *via* les tubes criblés du phloème dédiés par ailleurs à la sève dite élaborée (*voir les*

Repères, page 6), c'est-à-dire transportant les sucres. Ces canaux tissent un réseau de câbles au travers de tout l'organisme. Ces potentiels d'action sont caractérisés, comme dans les cellules animales, par une phase de dépolarisation rapide du potentiel membranaire suivi d'une phase de repolarisation tout aussi rapide.

Toutefois, les ions impliqués diffèrent. En effet, chez les plantes, la phase de dépolarisation des potentiels d'action ne résulte pas d'un mouvement d'ions sodium (Na^+), ceux-ci étant toxiques pour la plupart des cellules végétales, mais d'ions calcium (Ca^{2+}). Lors de l'initiation de la dépolarisation, des canaux favorisent l'augmentation de la concentration en Ca^{2+} dans le cytoplasme induisant l'ouverture d'autres canaux qui laissent passer des ions chlorures (Cl^-) responsables de la phase de dépolarisation proprement dite. Enfin, un troisième type de canaux s'ouvre aux ions potassium (K^+) et déclenche la phase de repolarisation.

Dès que le stimulus atteint une intensité critique, un seuil (c'est la règle du « tout ou rien »), le potentiel d'action s'autoperpétue et se déplace le long des tubes criblés du phloème : le signal est envoyé. Il peut également être transmis sur de plus courtes distances au travers des pores (des plasmodesmes) entre cellules adjacentes, de façon similaire à la transmission par des synapses électriques.

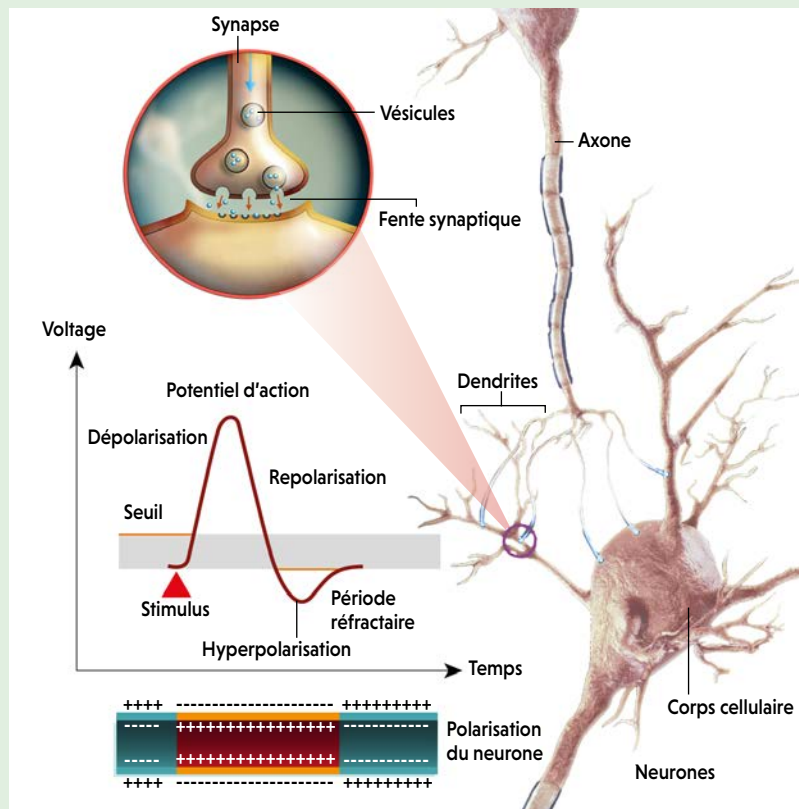
CHEZ LES PLANTES, AU MOINS TROIS TYPES DE SIGNAUX ÉLECTRIQUES SE PROPAGEANT À LONGUE DISTANCE ONT ÉTÉ IDENTIFIÉS



AU CŒUR DES NEURONES

La neurobiologie ou neuroscience désigne une branche de la biologie qui étudie la structure et le fonctionnement du système nerveux. Elle est le plus souvent focalisée sur l'étude du fonctionnement du cerveau des animaux et en particulier de celui de l'espèce humaine. Une des fonctions du système nerveux est la réception d'une information *via* des organes sensoriels reliés à des nerfs qui conduisent l'information vers les centres nerveux. Ces derniers traiteront l'information et, en retour, enverront *via* les nerfs moteurs des instructions vers des muscles, des organes ou des glandes pour déclencher une réponse appropriée. Les fonctions cellulaires du système nerveux sont assurées par les neurones, des cellules excitables spécialisées dans la conduction de l'information nerveuse. Un neurone peut contenir des milliers de synapses par lesquelles il se connecte à d'autres neurones formant ainsi un réseau très complexe. Le message nerveux, ou potentiel d'action, est un message électrique qui se transmet le long des dendrites, du corps cellulaire et de l'axone à une vitesse de 1 à 10 mètres par seconde.

Ces potentiels d'action suivent une loi du « tout ou rien », se propagent avec une vitesse et une amplitude constantes et sont suivis d'une période réfractaire (*voir la figure*) pendant laquelle aucun potentiel d'action ne peut être créé. Ils sont dus à l'ouverture de canaux à ions sodium Na^+ induisant une dépolarisation de la membrane (une inversion locale de la répartition des charges électriques) des axones qui provoque l'ouverture de canaux à potassium K^+ permettant une repolarisation puis une hyperpolarisation de la membrane. La transmission d'une information d'un neurone à un autre se fait au niveau des synapses. À l'arrivée du potentiel d'action, l'information électrique est soit transmise directement (par des synapses électriques, essentiellement chez les métazoaires non vertébrés), soit transformée en information chimique (dans les synapses chimiques des vertébrés). Dans ce dernier cas, les neurotransmetteurs contenus dans des vésicules sont libérés par exocytose au-dehors du neurone, traversent l'espace intersynaptique, puis se fixent sur des récepteurs spécifiques et induisent un nouveau potentiel d'action dans le neurone suivant.



Les potentiels d'action végétaux sont plus lents que ceux des animaux, leur vitesse moyenne de propagation étant de 1 à 2 centimètres par seconde, même s'ils sont parfois plus rapides chez certaines plantes.

Les ressemblances entre végétaux et animaux vont plus loin. En effet, des études ont montré que les gènes de la majorité des familles de canaux ioniques végétaux ont des homologues animaux. Le développement de l'électrophysiologie a révélé l'activité de la plupart de ces canaux constituant ainsi une solide base de compréhension du fonctionnement électrique des végétaux au niveau cellulaire. Certains canaux ioniques sont des canaux archétypes retrouvés aussi bien chez les animaux que chez les plantes, les bactéries ou les archées.

De même, il est notable que toutes les molécules servant de neurotransmetteurs chez les animaux, telles que l'acétylcholine, la dopamine, la noradrénaline, l'adrénaline, la sérotonine, l'histamine ou encore la mélatonine aient des homologues chez les plantes. Précisons néanmoins qu'ils n'ont pas nécessairement les mêmes rôles ; de plus, tous leurs rôles chez les plantes n'ont pas encore été élucidés.

Quelques exemples de points communs entre animaux et végétaux. L'équipe de František Baluška, de l'université de Bonn, en Allemagne, a montré qu'à l'extrémité de la racine, le transport de l'auxine, une hormone végétale dérivée du tryptophane (un acide aminé) à l'instar de la sérotonine, est accompli par exocytose et par recyclage actif de vésicules, comme dans les synapses chimiques animales. De plus, ces cellules racinaires partagent avec les neurones la capacité de générer spontanément des potentiels d'action.

Ces chercheurs ont également montré que le L-glutamate, un neurotransmetteur animal, lié à des homologues végétaux de récepteurs animaux, contrôle le flux de vésicules endocytosiques dans ces cellules de l'extrémité racinaire ainsi que les variations transitoires d'ions calcium pendant l'induction des potentiels d'action. À ces fortes similitudes fonctionnelles avec les synapses, s'ajoutent de nombreuses homologues moléculaires telles que la présence de clathrine sur les vésicules ou de synaptotagmines.

LUTTER CONTRE LE STRESS... OSMOTIQUE

Ces observations nous ont conduits, avec l'équipe de Laure Bonnaud, du Muséum national d'histoire naturelle, à tester l'hypothèse d'une conservation chez les animaux pluricellulaires des processus de réaction au stress osmotique, stress auquel la plupart des organismes vivants doivent faire face. Nous l'avons vérifiée !

Certains petits neuropeptides de la famille des FLP participent à la régulation de l'activité ➤

LA NEUROBIOLOGIE VÉGÉTALE, VRAIMENT ?

Tout comme les animaux, les plantes traitent l'information qu'elles obtiennent d'un environnement changeant afin de se développer et se reproduire de façon optimale. Elles s'adaptent ainsi aux variations périodiques et météorologiques de lumière, de température, de disponibilité d'eau et de vent. Elles s'adaptent également aux fluctuations de la disponibilité en nutriments ou encore aux attaques d'agents pathogènes voire de prédateurs. Plus surprenant encore, les plantes ont des capacités d'apprentissage, comme ce fut démontré en 2017 par Monica Gagliano, de l'université d'Australie occidentale, grâce à des expériences d'habituation chez le mimosa pudique : en soumettant cette plante à des chocs répétés, on peut lui apprendre à ne plus se refermer lors des suivants. De tels comportements, coordonnés à l'échelle de l'organisme, nécessitent des mécanismes qui permettent une signalisation systémique intégrée. Remarquons que les anesthésiants, qui peuvent éteindre rapidement et de manière réversible la conscience chez l'homme, compromettent de façon équivalente les réponses motrices chez les animaux, les plantes... Il y a une dizaine d'années, Stefano Mancuso, de l'université de Florence, en Italie, et František Baluška,

de l'université de Bonn, en Allemagne, suite à la mise au jour chez les plantes d'un grand nombre de caractéristiques que l'on trouve dans le système neuronal de l'animal, ont proposé le concept de « neurobiologie végétale ». Ils ont également développé une vision intégrée des processus de signalisation longue distance permettant aux plantes de réagir aux stimuli environnementaux. Avec un brin de provocation, ils firent remarquer que le terme « neurone » est un emprunt au grec ancien où le mot désigne une fibre végétale et par analogie tout ce qui est de nature fibreuse. Pour développer ce champ de recherche, ils ont avec quelques collègues créé la société internationale de neurobiologie végétale Plant Neurobiology et mis en place des séries de colloques portant le même nom ainsi que la revue *Plant Signalling and Behavior* (« Signalisation et comportement des plantes »). Ces initiatives ont très rapidement suscité au niveau international une réaction assez épidermique. En 2007, un article, signé par des scientifiques de pas moins de trente-trois institutions travaillant dans le domaine végétal, a clamé que la neurobiologie végétale était fondée sur des analogies superficielles et des extrapolations douteuses

n'ajoutant rien à la compréhension de la biologie végétale. La controverse engendrée par le livre *La Vie secrète des plantes* de Peter Tompkins et Christopher Bird publié en 1975 expliquant que les plantes sont en harmonie avec les états émotionnels humains (en y ajoutant de plus des revendications paranormales) a certainement conduit de nombreux biologistes végétaux à pratiquer une forme d'autocensure dans leur réflexion sur les homologues possibles entre la neurobiologie et la biologie végétale. Cependant, il est aussi notable que le titre de la réponse à l'article de 2007 par les défenseurs de la neurobiologie végétale « Plant neurobiology: no brain, no gain ? » (« La neurobiologie végétale : pas de cerveau, pas de gain ? »), renvoyait à une vision idéaliste de la classification du vivant percevant les plantes comme des organismes passifs et oubliait au passage que les neurones existent chez des animaux dépourvus de cerveau tels que les étoiles de mer, les oursins, les bivalves ou encore les méduses. Chez ces animaux, le système nerveux est en effet décentralisé sous forme de petits ensembles de neurones connectés entre eux tout autour de leur corps. Les tenants de la neurobiologie végétale

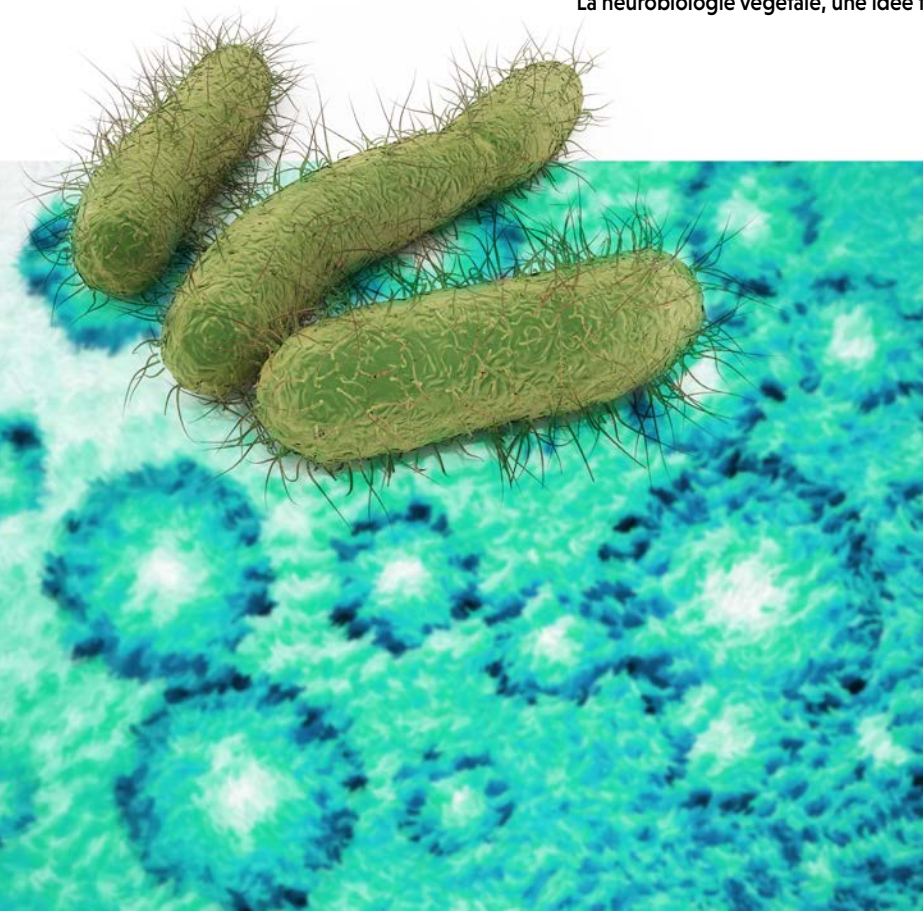
répliquèrent que nul ne défendait la présence d'un cerveau dans la racine ou de neurones myélinisés chez les plantes. Et si les termes neurobiologie végétale qu'ils proposaient étaient nouveaux, leurs idées s'appuyaient sur des travaux aussi anciens qu'éminents tels que ceux de Wilhelm Pfeffer, Charles Darwin, Jagadish Chandra Bose ou encore Julius von Sachs, tant il est vrai que le XIX^e siècle était beaucoup plus ouvert quant à la comparaison des processus biologiques animaux et végétaux. Un des objectifs de la Société de neurobiologie végétale était de changer de paradigme quant à notre vision des plantes et donc notre façon d'appréhender la recherche autour des questions liées à la capacité et aux façons qu'elles possèdent de réagir aux stimuli environnementaux. En 2009, cette société a changé son nom en Plant Signalling & Behavior Society (« Société de signalisation et comportement des plantes ») pour limiter les réactions d'ostracisme d'un certain nombre de collègues. Si ce débat semble s'apaiser, examiner les similitudes que présente la biologie des plantes avec le fonctionnement du système nerveux se heurte toujours à une vision extrêmement anthropocentrée de la neurobiologie.

➤ de canaux ioniques qui aident à lutter contre ce stress osmotique chez les mollusques, les annélides, les nématodes, les vertébrés... Et nous avons justement montré que des FLP de seiche sont capables de réguler des réponses au stress osmotique chez les plantes en agissant notamment sur des canaux ioniques. En outre, nous avons identifié les homologues végétaux de certains des gènes de ces neuropeptides.

L'existence chez les bactéries et les archées d'homologues putatifs de canaux ioniques impliqués dans la neurotransmission soulève

une hypothèse évolutive inattendue : les systèmes de neurotransmission ne dériveraient-ils pas de mécanismes moléculaires et cellulaires très anciens, réutilisés et intégrés dans des organes spécialisés chez les différentes lignées d'organismes vivants, animaux et végétaux ?

C'est probable. Après des dizaines d'années de controverse, on admet désormais que les cellules eucaryotes sont apparues sur la scène de l'évolution après plusieurs événements d'endosymbiose, quand d'autres cellules ont été intégrées. Dans ce contexte,



La bactérie *Escherichia coli* (en haut) perçoit son environnement via des dépolarisations membranaires. Dans les biofilms en croissance (ci-dessus), les bactéries communiquent par des signaux électriques. Peut-on en déduire que les bactéries ont inventé les mécanismes de communication à l'œuvre dans les neurones ?

BIBLIOGRAPHIE

G. BRUNI ET AL., Voltage-gated calcium flux mediates *Escherichia coli* mechanosensation, *PNAS*, prépublication en ligne, 2017.

J. HUMPHRIES ET AL., Species-independent attraction to biofilms through electrical signaling, *Cell*, vol. 168, pp. 200-209, 2017.

M. GAGLIANO ET AL., Experience teaches plants to learn faster and forget slower in environments where it matters, *Oecologia*, vol. 175, pp. 63-72, 2014.

F. BOUTEAU ET AL., Could FaRP-Like Peptides Participate in Regulation of Hyperosmotic Stress Responses in Plants?, *Front. Endocrinol.*, vol. 5, p. 132, 2014.

E. D. BRENNER ET AL., Response to Alpi et al.: plant neurobiology: the gain is more than the name, *Trends Plant Sci.*, vol. 12(7), pp. 285-286, 2007.

la sélection naturelle appliquée aux micro-organismes procaryotes (sans noyau) soumis à des environnements extérieurs changeants a pu façonner divers mécanismes leur permettant de percevoir et de répondre aux conditions locales de milieux. Récemment, Giancarlo Bruni, de l'université du Colorado, à Boulder, aux États-Unis, a montré que la bactérie *Escherichia coli* peut percevoir des changements de son environnement par des modifications de la tension membranaire induisant une dépolarisation et un influx de calcium, un phénomène ressemblant aux potentiels d'action enregistrés chez les métazoaires.

Ces données plaident pour la persistance chez un organisme procaryote actuel de modalités de signalisations impliquant des variations électriques et calciques ayant existé chez les organismes les plus anciens. Quelles pouvaient être les fonctions archaïques de ces signalisations ?

Dans la nature, les biofilms sont la forme la plus courante de croissance bactérienne : dans ces communautés, des micro-organismes (bactéries, champignons, algues ou protozoaires) restent solidaires au sein d'une matrice protectrice qui adhère à une surface. Or Jacqueline Humphries et ses collègues de l'université de Californie, à San Diego, ont

détecté des potentiels d'action pendant la phase de croissance d'un biofilm bactérien. À l'inverse, ils sont absents lorsque le biofilm se stabilise ou chez les espèces ne formant pas de biofilm. Les bactéries des biofilms semblent ainsi coordonner leur croissance grâce à une signalisation électrique ! Ce moyen de communication peut s'étendre au-delà du biofilm, entraînant des interactions interspécies à longue distance, par exemple pour attirer des bactéries éloignées.

SIGNALISATION ÉLECTRIQUE CHEZ LES BACTÉRIES

Les mécanismes de ces échanges se dévoilent peu à peu. Ainsi, des homologues putatifs de plusieurs protéines médiatrices de la neurotransmission synaptique cérébrale ont été identifiés chez des bactéries. Ces données suggèrent très fortement que la signalisation électrique longue distance, loin d'être l'apanage des neurones, serait un mécanisme de communication intercellulaire apparu très précocement au cours de l'évolution du vivant. Il aurait été recruté bien plus tardivement par les neurones des animaux, et aussi par les plantes.

L'engouement actuel autour de l'idée de neurobiologie végétale conduit à la réémergence d'une idée ancienne. Au début du ^{xx}e siècle, le physicien et botaniste indien Jagadis Chandra Bose mit en évidence l'omniprésence de la signalisation électrique entre cellules végétales pour coordonner leurs réponses à l'environnement. Il en conclut que les plantes ont un système électromécanique, un système nerveux, une forme d'intelligence et sont capables de se souvenir et d'apprendre. De telles idées n'ont pas été bien reçues en leur temps.

Un siècle plus tard, la biologie contemporaine adopte encore trop souvent un paradigme aristotélien du monde selon lequel les plantes diffèrent profondément des animaux en raison de leur caractère insensible et de leur manque d'aptitude à interagir avec leur environnement. Pourtant, le concept de neurobiologie végétale, au-delà de la discussion sur la terminologie utilisée, nous oblige à reconsidérer l'origine évolutive des neuromolécules et des neurosystèmes.

S'autoriser à envisager l'existence d'homologies profondes entre les deux règnes nous conduit à voir dans les spécialisations récentes du système nerveux animal l'avatar de processus anciens et fondamentaux de la communication et de la survie cellulaire. L'adoption d'une telle hypothèse s'apparente à une révolution copernicienne, comme lorsque l'on passa de la vision d'un monde géocentré à l'héliocentrisme... La communauté scientifique est-elle prête ? ■

DES ANIMAUX COMME LES AUTRES ?

Des plantes aux animaux, et vice versa





La distinction entre un animal et un végétal n'est pas aussi nette qu'on le croit. Sur beaucoup d'aspects, ils sont les extrêmes d'une continuité que révèlent l'évolution et... le microscope.

L

ors de son voyage sur le *Beagle* entre 1861 et 1836, Charles Darwin observa les récifs coralliens. Il y constatait un paradoxe qui porte son nom: les ressources manquent dans les eaux très claires où vivent les coraux, et pourtant, ils forment profusion de biomasse et sont parfois aussi productifs qu'une forêt tropicale! Comment les coraux prospèrent-ils là? En se comportant presque comme des végétaux! Ils posent ainsi la grande question de la limite entre végétaux et animaux.

Existe-t-il une frontière entre ces deux règnes que l'on oppose si souvent? Non, ou alors elle est floue. De fait, l'étude de ce qui les distingue et de leur apparition dans l'évolution révèle qu'animaux et végétaux ne sont que... les extrêmes d'un continuum! Mais avant de le montrer, commençons par résoudre le paradoxe de Darwin.

Les coraux, comme les anémones de mer, sont des cnidaires: ils forment par bourgeonnements successifs de grosses colonies associant des petits modules dotés d'une bouche et d'une couronne de tentacules. La colonie s'entoure d'une gaine calcaire protectrice qui forme les récifs coralliens. Leur corps est fait de deux couches de cellules dont la plus interne, qui borde la cavité digestive, est piquetée de myriades de petits points dorés. Ce sont des algues!

Ces algues photosynthétiques unicellulaires, du groupe des Dinophytes, représentent environ un tiers de la masse vivante des coraux. Du reste, nul besoin d'aller dans les eaux limpides des tropiques pour les observer: beaucoup d'anémones de nos côtes, proches parentes des coraux, telle

Le corail, animal ou végétal?
Les deux en même temps?

© Loïc Mangin