

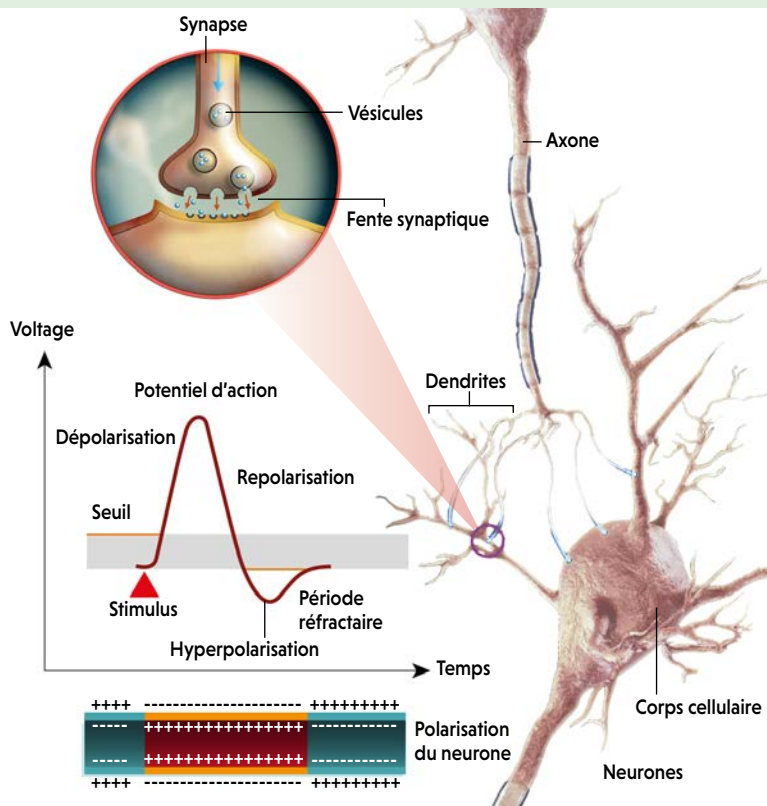
AU CŒUR DES NEURONES

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,