



Les neurosciences à travers l'électrophysiologie végétale

Fabien Campillo

Juin 2025



Qui n'a jamais été fasciné par la *Dionaea muscipula* dite Dionée attrape-mouche ? Cette plante carnivore a toujours fait l'objet de fantasmes¹. Depuis des siècles, cette plante extraordinaire intrigue les esprits. Tout comme de nombreux chercheurs et amateurs de sciences à travers le monde, Darwin lui-même s'en émerveillait : "Cette plante, communément appelée Dionée attrape-mouche, en raison de la rapidité et de la force de ses mouvements, est l'une des plus merveilleuses au monde."

L'idée est d'exploiter cette fascination comme un vecteur de stimulation scientifique. La dionée peut devenir une véritable passeuse de connaissance et un outil pour éveiller la curiosité scientifique. Elle peut nous guider vers une réflexion profonde, mêlant biologie, philosophie, et découverte scientifique. Elle nous invite à explorer les frontières entre vivant et inerte, entre la vie végétale et la vie animale, et tous les systèmes biologiques complexes.

1 Présentation de la démarche pédagogique

Cette initiative vise à proposer une immersion dans le monde des neurosciences, et plus particulièrement dans celui du cerveau, en s'adressant à un public large, notamment aux collégiens et lycéens. L'objectif final est de présenter l'épilepsie, dont la modélisation est un des thèmes centraux de l'équipe [MathNeuro](#). Nous cherchons donc à éveiller leur intérêt pour les neurosciences et les sciences en général, tout en les sensibilisant aux dysfonctionnements cérébraux, avec un focus particulier sur l'épilepsie. Notre démarche vise à informer sur cette pathologie et son impact sur la vie des personnes atteintes, dans le but de déconstruire les idées reçues et de favoriser l'inclusion. Bien que la partie dédiée à l'information et la sensibilisation à l'épilepsie soit plus sérieuse, nous nous efforcerons d'adopter une approche ludique.

Nous mettrons l'accent sur un élément fondamental du système nerveux : le potentiel d'action (PA). À travers le PA, nous donnerons un aperçu du fonctionnement du cerveau, tout en esquissant les autres voies de signalisation présentes dans le corps humain et chez tous les organismes vivants.

Le PA est principalement associé aux neurones, mais il se retrouve également dans d'autres cellules du corps humain et dans de nombreux autres organismes, y compris certaines plantes.

Nous faisons ici un pari audacieux, et certainement discutable, en nous tournant vers le monde végétal, en particulier vers la dionée attrape-mouche, qui présente des PA mesurables que l'on peut, *d'une certaine manière*, mettre en parallèle avec ceux du cerveau. Ce choix soulève un débat captivant autour de la notion relativement récente de "neurophysiologie des plantes", un terme paradoxal étant

donné que les plantes ne possèdent pas de neurones mais il existe des similitudes surprenantes entre certaines cellules végétales et les neurones [5]. Certains proposent d'élargir la définition d'un système nerveux pour inclure les plantes



© dionaea-lab

afin d'obtenir une compréhension plus profonde de la façon dont l'évolution a conduit les caractéristiques de génération, de transmission et de traitement des signaux chez les êtres multicellulaires [49]. N'étant pas spécialiste du domaine, nous nous contenterons de parler ici d'"électrophysiologie" des plantes !

Ce débat entre les partisans et les détracteurs d'une "neurobiologie végétale", qui a parfois été vif [2, 12, 50], nous permettra d'explorer la frontière entre le monde animal, où seuls

les neurones sont présents, et le monde végétal, en tenant compte des exceptions, comme certains animaux qui sont dépourvus de neurones et de systèmes nerveux. On pourra éventuellement faire un rapide survol du monde du vivant, voire évoquer les classifications qui distinguent les Eucaryotes (plantes, animaux, champignons, protistes) et les Procaryotes (bactéries, archées).

Ce détour vers les plantes nous amènera à examiner les PA dans ces organismes avant de revenir au sujet de l'épilepsie chez l'humain. Bien qu'il puisse y avoir une certaine provocation scientifique, cette approche ludique favorise l'engagement. De plus, les parallèles peuvent être étendus pour aborder diverses questions. Nous pourrions également discuter des dysfonctionnements qui se manifestent dans les plantes, sans toutefois conduire à une forme d'épilepsie, et nous vérifierons si cela entraîne des phénomènes d'hyperexcitabilité chez les

*Dionaea Intermediate On Neuroscience And Electrophysiology Ambition

1. [From Poetry to Pulp Fiction: Carnivorous Plants in Popular Culture](#), John Schaefer, 2021. Voir aussi The [Carnivorous Plant Newsletter](#) of the International Carnivorous Plant Society.

plantes.

Nous justifions ce détour par la dionée attrape-mouche de deux manières. D’une part, cette plante exerce un fort pouvoir d’attraction sur un large public. D’autre part, comme nous le verrons, nous avons la possibilité de présenter une

2 Contenu scientifique

Nous esquissons les sujets scientifiques, nous reviendrons sur cette partie dans un document plus complet.

2.1 Le vivant

Organismes vivants

Un organisme vivant est une entité biologique capable d’accomplir des fonctions vitales telles que la croissance, la reproduction, la réponse aux stimuli et le métabolisme. Il possède une organisation complexe multicellulaire (comme chez les plantes et les animaux), ou unicellulaire (comme chez les bactéries).



Les organismes vivants, tous composés de *cellules*, partagent plusieurs fonctions vitales. Parmi celles-ci, on trouve *le métabolisme*, qui leur permet de convertir des nutriments en énergie à travers des processus chimiques ; *la croissance et le développement*, leur conférant la capacité de grandir et de se développer au fil du temps ; *la reproduction*, qui assure la perpétuation de leur espèce, de manière sexuée ou asexuée ; *la réponse aux stimuli*, par laquelle ils réagissent aux changements de lumière, de température, ou à d’autres stimuli environnementaux ; *l’adaptation*, qui leur permet d’évoluer et de s’adapter à leur environnement, un aspect fondamental de l’évolution ; et enfin *l’homéostasie*, qui garantit un équilibre interne malgré les fluctuations de l’environnement extérieur. Ces caractéristiques distinguent les organismes vivants des objets inertes, incapables d’auto-maintien et d’interaction active avec leur environnement.

Signalisation

Les fonctions vitales, telles que le métabolisme, la croissance, la reproduction, la réponse aux stimuli, l’adaptation et l’homéostasie, ne peuvent être accomplies qu’à travers des mécanismes complexes de signalisation. La signalisation cellulaire est essentielle pour que les organismes puissent percevoir et répondre à leur environnement. Elle régule les processus internes via des messagers chimiques, des protéines ou des ions. Par exemple, le métabolisme nécessite des signaux chimiques pour activer des enzymes, tandis que la croissance repose sur des molécules signal, comme les facteurs de croissance, qui coordonnent la prolifération cellulaire.

En réponse aux stimuli, les cellules transmettent rapidement des informations, en particulier dans le système nerveux où la signalisation électrique joue un rôle central. Le potentiel d’action est le mécanisme clé de cette transmission rapide. Déclenché par des variations dans la distribution des ions sodium et potassium, il se propage le long des neurones et permet la libération de neurotransmetteurs, assurant ainsi la

expérimentation permettant de mesurer un potentiel d’action dans la dionée. Ces deux aspects contribuent à capter l’attention de l’auditoire. De plus, l’expérimentation est non invasive, évitant ainsi le recours à des méthodes expérimentales animales souvent intrusives.

communication entre cellules nerveuses. Ce processus est fondamental pour le traitement de l’information, la coordination des mouvements, et les réponses sensorielles et comportementales.

Ainsi, que ce soit à travers des signaux chimiques ou électriques, la signalisation est cruciale pour assurer les interactions internes et externes des organismes vivants.

2.2 Les plantes

La plante la plus étudiée est l’Arabette des dames^{iv} (*Arabidopsis thaliana*). Elle est considérée comme un modèle de recherche en biologie végétale en raison de son génome simple, de sa petite taille (135 Mb²), de son cycle de vie court et de sa facilité de manipulation en laboratoire. Ici nous allons nous intéresser également à d’autres plantes et naturellement à la dionée.



	Humain	Mouche	Dionée
Taille du génome	~3200 Mb	~180 Mb	~700 Mb
Nombre de gènes	~25000	~14000	~30000
Variabilité génétique	relativement haute	relativement faible	relativement modérée

Frontière animal/plante

La frontière entre les animaux et les plantes repose sur plusieurs différences clés. Les plantes sont *autotrophes*, produisant leur propre nourriture via la photosynthèse, tandis que les animaux sont *hétérotrophes* et doivent consommer d’autres organismes. De plus, les cellules végétales possèdent une paroi rigide de cellulose ainsi que des chloroplastes, ce qui les distingue des cellules animales. Les animaux, par ailleurs, se déplacent activement, alors que les plantes sont généralement immobiles. Enfin, les plantes utilisent principalement des signaux chimiques et électriques plus lents, tandis que les animaux disposent de systèmes nerveux pour des réponses rapides.



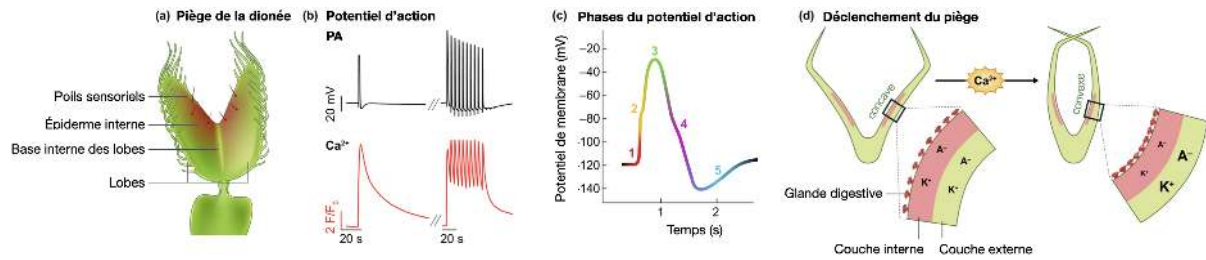
Cependant, certains organismes, tels que l’*Euglena gracilis*, illustrent parfaitement la frontière entre les plantes et les animaux. Il s’agit d’une algue qui, selon son environnement, est capable soit d’effectuer la photosynthèse comme une plante, soit de se

nourrir en absorbant des nutriments comme un animal. De plus, elle se déplace de manière autonome grâce à un flagelle, une caractéristique généralement associée aux animaux.

Enfin, certains organismes animaux, comme les éponges, démontrent qu’il est possible de réagir à des stimuli sans posséder de neurones, illustrant ainsi des mécanismes de réponse primitive au sein du règne animal.

xxxx voir aussi [37] xxx

2. La mégabase (Mb) est une unité de mesure en biologie moléculaire représentant une longueur d’un million de paires de bases d’ADN ou d’ARN.



Dans le piège de la dionée, les canaux ioniques se concentrent dans les cellules de l'épiderme interne, autour des poils sensoriels et des cellules motrices. Les poils sensoriels réagissent au toucher en laissant entrer du calcium (Ca^{2+}) pour déclencher un potentiel d'action. Les cellules motrices situées à la base interne des lobes utilisent ensuite des canaux pour le potassium (K^+) et le chlorure (Cl^-). Cela entraîne une perte de turgescence, provoquant la fermeture rapide du piège en réponse au signal perçu.

(a) Piège ouvert : les poils sensitifs sur la surface interne du piège agissent comme capteurs et déclenchent le potentiel d'action (PA) lorsqu'ils sont stimulés.

(b) Lorsqu'un contact est perçu, des ondes de calcium et des PA se propagent le long des deux lobes du piège.

(c) Le PA de la dionée comprend cinq étapes distinctes : après une entrée initiale de Ca^{2+} , le signal est amplifié, produisant une augmentation de calcium (étape 1). Si le niveau de Ca^{2+} dépasse un seuil, une libération d'ions Cl^- provoque une dépolarisation rapide (étape 2). Au-delà de -60 mV, des canaux de potassium ralentissent la dépolarisation. Aux environs de -20 mV, la dépolarisation maximale est atteinte lorsque les flux d'ions se

compensent. La repolarisation (étape 3) commence lorsque le calcium diminue, entraînant la libération d'ions potassium et hydrogène. En dessous de -60 mV, certains canaux ralentissent la repolarisation, tandis qu'une hyperpolarisation temporaire se produit (étape 4). Pendant cette hyperpolarisation, les niveaux d'ions se rétablissent pour revenir à l'état initial avant le PA (étape 5).

(d) Deux PA successifs augmentent le niveau de calcium au-delà d'un seuil, rendant la fermeture rapide du piège inévitable. La libération d'ions entraîne une perte de turgescence dans les cellules internes, ce qui provoque la fermeture du piège.

Cette description du PA du piège de la dionée est quelque peu simplifiée. Pour un exposé plus complet voir [39] dont est issu cette figure ainsi que [14]. Voir aussi le très bel article de Scherzer et al. 2022, "A unique inventory of ion transporters poises the Venus flytrap to fast-propagating action potentials and calcium waves", *Current Biology*, 32 (19) : 4255-4263.e5 [59] et notamment cette vidéo. Ces recherches [39, 59] ont été réalisées par l'équipe du Pr. Rainer Hedrich, du Département de Physiologie Moléculaire des Plantes et Biophysique à l'Université de Würzburg, en Allemagne.

Signalisation électrique et PA

La signalisation électrique et les potentiels d'action ne sont pas exclusifs aux neurones, mais existent également dans d'autres types de cellules, notamment dans certaines plantes [72], comme l'*Arabidopsis thaliana* [28]. Ces signaux électriques permettent la communication rapide entre différentes parties de la plante [30, 46, 69, 73]. Ils permettent également à la plante de communiquer avec son environnement, notamment pour s'adapter au stress hydrique [25]. Certaines plantes réagissent aux vibrations des feuilles engendrées par la mastication des insectes herbivores [3]!

Les ions sont des atomes ou des molécules portant une charge électrique, soit positive (cations) soit négative (anions), en raison d'un déséquilibre entre le nombre de protons (charges positives) et d'électrons (charges négatives). Ce déséquilibre entraîne une tendance des ions à se déplacer pour rétablir une distribution équilibrée des charges, ce qui est fondamental dans de nombreux processus biologiques. Par exemple, le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) sont des cations, tandis que le chlorure (Cl^-) est un anion.

Dans les cellules, ces ions se répartissent inégalement de part et d'autre de la membrane cellulaire, créant ainsi une différence de potentiel, c'est-à-dire une différence de voltage entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule. Ce potentiel de membrane au repos est maintenu tant que les ions restent en équilibre, régulés par des canaux et des pompes spécifiques. Cette différence de voltage est essentielle pour l'activité électrique des cellules.

Le *potentiel de membrane* est donc la différence de charge électrique entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule, due à la répartition inégale des ions (Na^+ , K^+ , Cl^- , etc.) de part et d'autre de la membrane. Dans les cellules animales, comme les neurones, cette tension de repos est maintenue par des canaux ioniques et des pompes telles que la pompe Na^+/K^+ . Dans les plantes, comme la dionée, des canaux ioniques analogues régulent aussi le potentiel de membrane au repos, bien qu'ils impliquent des ions différents, notamment le Ca^{2+} . Ce potentiel au repos peut être perturbé en réponse à des stimuli internes ou externes, générant un changement temporaire appelé *potentiel d'action*.

Le *potentiel d'action* (PA) est un signal électrique transitoire qui se propage le long de la membrane des cellules excitables, comme les neurones chez les animaux ou les cellules sensibles chez certaines plantes. Le PA représente un passage d'un état

de repos à un état actif, permettant à la cellule d'envoyer un signal. Chez les animaux, le PA est déclenché par l'ouverture rapide des canaux sodiques (Na^+) en réponse à un stimulus, suivie d'une sortie de K^+ pour restaurer le potentiel de repos. Ce processus permet la transmission des signaux nerveux et la contraction musculaire, essentiels à la coordination motrice et aux réponses réflexes. Chez les plantes, comme la dionée, le PA est également généré en réponse à un stimulus, souvent mécanique, par une entrée de Ca^{2+} dans les cellules. Ce signal électrique déclenche la fermeture rapide des lobes de la dionée, permettant la capture d'insectes sans avoir recours aux muscles, contrairement aux animaux.

Signalisation électrique chez la dionée

La dionée attrape-mouches (*Dionaea muscipula*), originaire de la Caroline, illustre parfaitement l'adaptation des plantes aux sols pauvres en nutriments. Pour compléter ses besoins nutritionnels, elle a développé une stratégie rare : la carnivorie [54]. Chez la dionée, un potentiel d'action est déclenché lorsque les poils sensitifs à l'intérieur de ses pièges sont touchés, ce qui conduit à la fermeture rapide du piège. D'autres plantes comme le mimosa (*Mimosa pudica*) utilisent également des signaux électriques pour réagir aux stimuli mécaniques ou environnementaux, illustrant ainsi l'importance de la signalisation électrique dans le règne végétal.

Le potentiel d'action (PA) dans la dionée (*Dionaea muscipula*) est porté par des signaux électriques qui circulent le long des cellules végétales, en particulier dans les cellules spécialisées des pièges. Ces signaux se propagent grâce à des modifications dans le potentiel de membrane des cellules, similaires à celles observées dans les neurones.

Dans la dionée, le PA est généré lorsque les poils sensitifs de la piège sont stimulés, par exemple, lorsqu'une proie touche ces poils. Cette stimulation déclenche une dépolarisation des membranes cellulaires. Les ions, principalement le calcium Ca^{2+} et le potassium K^+ , jouent un rôle crucial dans ce processus, provoquant une réponse rapide qui peut entraîner la fermeture du piège en quelques millisecondes.

Pour mesurer le potentiel d'action dans la dionée, on utilise des techniques d'électrophysiologie, notamment l'enregistrement de l'activité électrique à l'aide d'électrodes insérées dans ou près des cellules du piège. Ces mesures peuvent révéler la dynamique et l'intensité des signaux électriques générés par les stimuli mécaniques.

De plus, en générant des potentiels d'action, la dionée crée un champ magnétique qui peut être mesuré de la même manière que l'on évalue l'activité électrique du système nerveux humain par électroencéphalographie [27].

Enfin cela est plus étonnant, la dionée sait compter [10]³, mais peut souffrir de dyscalculie [41].

Au delà des animaux et des plantes

D'autres organismes, qui ne sont ni des animaux, ni des plantes, tels que les champignons, présentent aussi des PA [9, 36]. Dans une récente étude, des scientifiques japonais ont trouvé des indices selon lesquels, après la pluie, certains champignons communiquent en utilisant des signaux électriques souterrains [32]. Selon cette étude, les champignons communiquent après la pluie en utilisant des potentiels d'action (PA) qui se propagent à travers le mycélium, le réseau de filaments responsable de l'absorption des nutriments. Cette communication leur permet de réagir aux stimuli environnementaux, de coordonner l'absorption des ressources et d'alerter d'autres parties du mycélium ou des champignons voisins en cas de stress ou de menace. Les signaux échangés transmettent des informations cruciales sur l'état de santé, la disponibilité des nutriments et les alertes concernant d'éventuels dangers, facilitant ainsi leur adaptation collective à l'environnement.



Électrodes installées sur des champignons [32]
Université de Tohoku.

Dysfonctionnements des canaux ioniques

Comme pour les animaux, les PA des plantes sont générés par des canaux ioniques [38]. Les dysfonctionnements des canaux ioniques dans les cellules de plantes peuvent perturber le potentiel de membrane (PM) et, par conséquent, le potentiel d'action (PA). Ces canaux sont essentiels pour la régulation des flux d'ions, en particulier le calcium Ca^{2+} et le potassium K^{+} , qui sont cruciaux pour la dépolarisation et la repolarisation des membranes cellulaires. Si ces canaux présentent des anomalies ou des dysfonctionnements, cela peut entraîner des réponses inappropriées ou absentes aux stimuli, comme la fermeture inefficace des pièges.

Chez la dionée, une mauvaise régulation du calcium peut compromettre sa capacité à se fermer rapidement sur une proie, réduisant ainsi son efficacité de capture. De plus, des problèmes liés à la signalisation électrique peuvent également affecter la croissance et le développement des tissus, compromettant la santé globale de la plante.

Ces dysfonctionnements sont d'une grande importance pour la compréhension des mécanismes d'adaptation et de réponse chez la dionée, et ils soulignent l'importance des canaux ioniques dans la physiologie des plantes carnivores.

2.3 Le cerveau

Un organe

Seuls les animaux possèdent des cerveaux. Les cerveaux sont des structures centralisées de neurones (cellules nerveuses) qui traitent et coordonnent des informations complexes pour réguler les comportements, les mouvements et les réponses aux stimuli. Cette structure n'est présente que chez les animaux, mais tous les animaux ne possèdent pas un cerveau. Par exemple, les méduses et les éponges n'en ont pas, bien qu'ils puissent avoir des réseaux neuronaux diffus. En revanche, comme nous l'avons vu, d'autres organismes, comme

les plantes, possèdent des systèmes de communication complexes basés sur des signaux chimiques, électriques ou mécaniques, mais ils n'ont pas de structure centralisée comparable à un cerveau.

Le cerveau est un organe, c'est-à-dire une structure composée de différents tissus qui travaillent ensemble pour remplir une ou plusieurs fonctions spécifiques dans un organisme vivant. Il s'agit d'une structure composée de différents types de cellules, principalement des neurones et des cellules gliales, organisées pour remplir des fonctions spécifiques, telles que le traitement de l'information, la régulation des mouvements, des émotions, et des fonctions autonomes comme la respiration et la digestion. Les neurones représentent environ 10% des cellules totales dans le cerveau, tandis que les cellules gliales, bien plus nombreuses, jouent un rôle crucial dans le soutien et la protection des neurones. Comme tous les organes, le cerveau est constitué de tissus spécialisés et fonctionne en interaction avec d'autres systèmes du corps.

Les cellules du cerveau comprennent essentiellement les neurones et les cellules gliales. Le cerveau d'une personne adulte compte environ 86 milliards de neurones et 400 milliards de cellules gliales. Les neurones transmettent des signaux électriques et chimiques, permettant la communication dans le cerveau et entre le cerveau et le reste du corps. Les cellules gliales sont des cellules de soutien qui protègent et nourrissent les neurones. Elles jouent également un rôle important dans le maintien de l'homéostasie et dans la transmission des signaux.

Neurone

Le neurone est l'unité fonctionnelle essentielle du système nerveux, spécialisée dans la transmission des signaux électriques et chimiques. Sa structure comprend un **soma**, ou corps cellulaire, qui abrite le noyau et les organites nécessaires à son métabolisme. Les **dendrites**, extensions ramifiées du soma, sont responsables de la réception des signaux en provenance d'autres neurones. À l'opposé, l'**axone** conduit les impulsions électriques vers d'autres cellules. La transmission des signaux s'effectue aux **synapses**, des zones de communication où des neurotransmetteurs sont libérés pour faciliter la transmission des informations entre neurones.

Il existe plusieurs types de neurones, classés selon leurs fonctions, morphologies et caractéristiques de connectivité. Par exemple, en fonction du nombre de dendrites, les neurones se divisent en trois catégories : les neurones unipolaires possèdent une seule dendrite, les neurones bipolaires en ont deux, et les neurones multipolaires affichent plusieurs dendrites. De plus, la diversité des neurones se manifeste également dans le nombre et le type de synapses qu'ils forment ; par exemple, les motoneurones établissent des synapses avec de nombreux autres neurones, tandis que les neurones sensoriels peuvent n'en avoir qu'une seule. Cette variété dans la structure et la fonction des neurones permet au système nerveux de traiter et de transmettre des informations de manière complexe et efficace.

Complexité du cerveau

Pour le cerveau humain adulte, en moyenne, un neurone peut posséder entre 7 et 8 dendrites, mais certains neurones, comme les neurones pyramidiques, peuvent en avoir jusqu'à 200. De plus, chaque neurone peut établir entre 1000 et 10000 synapses, avec des cas extrêmes atteignant jusqu'à 30000 synapses, illustrant ainsi la complexité et la richesse des connexions dans le cerveau humain. Cette diversité dans la structure des neurones est essentielle pour la fonction cognitive, car elle permet une communication efficace et l'intégration d'une grande quantité d'informations.

3. Dionée compte jusqu'à 5, voir cet [article](#) et cette [vidéo](#).

Le cerveau humain est d'une complexité remarquable, avec environ 100 billions (10^{24}) de connexions synaptiques entre les neurones. Pour mettre cela en perspective, cela représente une quantité de connexions bien supérieure à celle des composants d'un superordinateur, qui peut contenir des millions de composants électroniques. Alors que les ordinateurs modernes, tels que les supercalculateurs, sont capables d'effectuer des calculs à des vitesses extrêmement élevées, leur architecture est fondamentalement différente de celle du cerveau.

Le cerveau humain utilise un réseau de neurones interconnectés qui permet non seulement le traitement de l'information, mais aussi des fonctions cognitives complexes telles que la mémoire, la créativité et l'émotion. En revanche, un ordinateur, bien qu'il puisse exécuter des opérations arithmétiques et logiques plus rapidement, ne possède pas la même capacité d'adaptation et de plasticité qu'un réseau neuronal biologique.

Cette disparité souligne que la complexité des connexions dans le cerveau humain permet une interactivité et une intégration d'informations d'une profondeur et d'une richesse que les architectures informatiques actuelles ne peuvent égaler. Ainsi, même si les ordinateurs peuvent surpasser le cerveau en termes de vitesse de calcul brute, la capacité du cerveau à établir et à modifier des connexions dynamiques reste sans précédent, illustrant la sophistication de l'intelligence biologique.

Plasticité du cerveau

La complexité du cerveau humain, illustrée par ses milliards de neurones et trillions de connexions synaptiques, n'est pas une caractéristique statique. Ce réseau est dynamique et évolue tout au long de la vie, un phénomène connu sous le nom de plasticité neuronale. Cette plasticité est essentielle pour plusieurs raisons. Elle permet au cerveau d'apprendre de nouvelles informations et de mémoriser des expériences, car lorsque nous acquérons une nouvelle compétence ou connaissance, les connexions synaptiques entre les neurones se renforcent ou s'affaiblissent, facilitant ainsi la transmission des signaux et le stockage des informations. De plus, la plasticité permet au cerveau de s'adapter à des changements dans l'environnement, que ce soit des expériences nouvelles ou des blessures. Par exemple, si une partie du cerveau est endommagée, d'autres zones peuvent compenser cette perte en réorganisant les connexions neuronales. Enfin, suite à un traumatisme cérébral, la plasticité aide à la récupération fonctionnelle en permettant à d'autres neurones de prendre en charge les fonctions perdues.

La plasticité neuronale se manifeste de différentes manières. Le renforcement synaptique, par exemple, implique l'augmentation de la force d'une synapse suite à une stimulation répétée, souvent mesurée par des phénomènes comme la potentialisation à long terme (LTP). À l'inverse, la dépression à long terme (LTD) se produit lorsque les synapses s'affaiblissent après des stimulations moins fréquentes. Dans certaines régions du cerveau, comme l'hippocampe, de nouveaux neurones peuvent se former tout au long de la vie, contribuant ainsi à la plasticité. De plus, les neurones peuvent établir de nouvelles connexions en réponse à des stimuli, modifiant ainsi les circuits neuronaux existants pour s'adapter à de nouvelles exigences fonctionnelles.

En résumé, la plasticité du cerveau est une caractéristique essentielle qui permet une adaptation continue et une optimisation des fonctions cérébrales en réponse aux expériences vécues. Elle soutient les capacités d'apprentissage, de mémorisation et de récupération, et représente une force adaptative

qui distingue le cerveau humain des systèmes de calcul traditionnels, comme les ordinateurs, qui, bien qu'efficaces dans certaines tâches, manquent de cette flexibilité et de cette capacité à évoluer en fonction des expériences.

Pathologies du cerveau

Les principales pathologies du cerveau englobent une diversité de troubles qui peuvent altérer ses fonctions, son développement et sa structure. Parmi ces pathologies, les accidents vasculaires cérébraux (AVC) se distinguent comme des événements critiques survenant lorsque l'apport sanguin au cerveau est interrompu, soit par un caillot (AVC ischémique), soit par une hémorragie (AVC hémorragique). Ces incidents peuvent entraîner des lésions cérébrales et des déficits neurologiques significatifs.

Les maladies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson et la sclérose en plaques, se caractérisent par la dégénérescence progressive des neurones, entraînant des troubles cognitifs, moteurs et fonctionnels. Par ailleurs, les troubles psychiatriques tels que la dépression, l'anxiété, la schizophrénie et les troubles bipolaires sont souvent associés à des déséquilibres chimiques dans le cerveau, impactant le comportement, l'humeur et la cognition.

L'épilepsie constitue un autre trouble neurologique, marqué par des crises récurrentes causées par des décharges électriques anormales dans le cerveau, dont l'intensité et la fréquence peuvent varier. Les traumatismes crâniens, fréquemment dus à des accidents ou des chutes, peuvent engendrer des contusions cérébrales, des hémorragies internes et des lésions fonctionnelles.

Les infections, telles que la méningite et l'encéphalite, peuvent induire une inflammation du cerveau ou de ses membranes, provoquant des complications graves. Les tumeurs cérébrales, qu'elles soient bénignes ou malignes, peuvent exercer une pression sur les structures cérébrales, entraînant des symptômes variés en fonction de leur localisation.

Enfin, les troubles du développement neurologique, tels que l'autisme, le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) et la paralysie cérébrale, affectent le développement neurologique et les fonctions cognitives. Ces pathologies ont des répercussions significatives sur la qualité de vie des personnes touchées et nécessitent souvent une approche multidisciplinaire pour leur diagnostic et leur prise en charge.

2.4 Épilepsie

Épilepsie dans le monde et en France

L'épilepsie est une affection neurologique qui regroupe une famille de maladies dont le point commun est une prédisposition cérébrale à engendrer des crises épileptiques spontanées, non expliquées par un facteur causal immédiat. Pendant une crise épileptique, un grand nombre de neurones déchargent des potentiels d'action de manière synchronisée.

“Dans le monde, environ 50 millions de personnes en sont atteintes, ce qui en fait l'une des affections neurologiques les plus fréquentes. Près de 80% des personnes souffrant d'épilepsie vivent dans les pays à revenu faible ou intermédiaire. Selon les estimations, 70% des personnes épileptiques pourraient ne pas avoir de crises si leur état était correctement diagnostiqué et traité” ⁽⁴⁾. En France environ 700.000 personnes épileptiques ont été identifiées ⁽⁵⁾

4. [Fiche d'information](#) de l'Organisation mondiale de la santé.

5. [Données](#) de 2020 publiées par Santé Publique France [22].

Description

Lors d'une crise d'épilepsie, une décharge électrique anormale et excessive se produit dans le cerveau, entraînant une activité neuronale désorganisée. Normalement, les neurones communiquent par des PA régulés, mais dans le cas de l'épilepsie, cette régulation est altérée. Les neurones peuvent devenir hyperexcités, ce qui signifie qu'ils génèrent des PA à une fréquence anormalement élevée. Cette excitation excessive peut se propager de manière synchronisée entre les neurones, entraînant des décharges collectives qui perturbent le fonctionnement normal du cerveau.

Cette désorganisation de l'activité neuronale peut provoquer divers symptômes, allant de convulsions généralisées à des manifestations plus localisées. Au niveau des PA, cette crise se manifeste par des vagues de dépolarisation suivies de périodes de repolarisation, mais avec un déséquilibre dans la durée et la fréquence des décharges. Des neurotransmetteurs, comme le glutamate, jouent un rôle clé dans cette hyperexcitabilité, tandis que les mécanismes inhibiteurs, principalement médiés par le neurotransmetteur GABA, peuvent être insuffisants pour contrôler cette activité excessive. Ce déséquilibre entre excitation et inhibition est au cœur des crises épileptiques, perturbant ainsi la communication neuronale et entraînant les symptômes cliniques observés.

Lors d'une crise d'épilepsie, l'électroencéphalogramme (EEG) révèle des anomalies significatives de l'activité électrique du cerveau, caractérisées par des décharges rapides et synchronisées de signaux. L'EEG est un outil non invasif. Bien que l'AP et l'EEG reflètent des aspects différents de l'activité cérébrale, ils sont interconnectés. L'activité de nombreux neurones, mesurée par l'EEG, est le résultat des potentiels d'action générés par ces neurones lorsqu'ils s'activent. En somme, les PA des neurones individuels contribuent à l'activité collective mesurée par l'EEG.

Pendant une crise, les neurones peuvent se dépolariser simultanément, entraînant des vagues d'activité électrique qui apparaissent sur l'EEG sous forme de pointes ou de complexes de pointes, souvent accompagnés de ralentissements ou de périodes d'inactivité. Ces changements peuvent varier en fonction du type de crise, allant de pointes localisées dans le cas de crises focales à une activité généralisée dans les crises tonico-cloniques. Ainsi, le lien entre l'EEG et les PA est direct, car les enregistrements EEG représentent la somme des décharges électriques synchronisées de milliers de

neurones, illustrant l'état pathologique du réseau neuronal lors d'une crise épileptique. En raison de sa capacité à détecter ces anomalies électriques, l'EEG est considéré comme l'outil principal pour le diagnostic de l'épilepsie, permettant aux cliniciens d'identifier le type de crise et de planifier un traitement approprié.

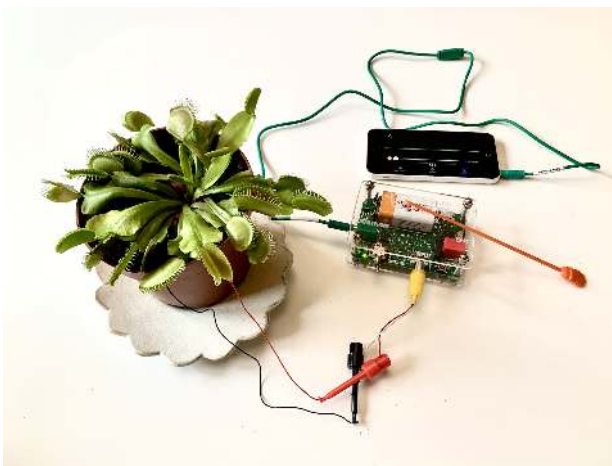
Épilepsie et dysfonctionnements des canaux ioniques

Les dysfonctionnements des canaux ioniques jouent un rôle crucial dans la pathophysiologie de l'épilepsie, car ils sont essentiels à la régulation de l'excitabilité neuronale. Les canaux ioniques, qui permettent le passage sélectif d'ions comme le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le calcium (Ca^{2+}) et le chlore (Cl^-), sont responsables de la génération et de la propagation des potentiels d'action (PA). Des mutations génétiques ou des anomalies dans la fonction de ces canaux peuvent perturber cet équilibre, entraînant une hyperexcitabilité neuronale et une synchronisation excessive des décharges électriques, caractéristiques des crises épileptiques. Par exemple, une activité anormale des canaux sodiques peut provoquer une dépolarisation excessive, tandis qu'un dysfonctionnement des canaux potassiques peut empêcher la repolarisation adéquate des neurones. Cette dysrégulation ionique contribue ainsi à l'apparition et à la fréquence des crises, rendant les canaux ioniques des cibles thérapeutiques potentielles pour le développement de nouveaux médicaments antiépileptiques.

Traitement

Le traitement de l'épilepsie vise à contrôler les crises et à améliorer la qualité de vie des personnes atteintes. Les options thérapeutiques incluent principalement des médicaments antiépileptiques, qui agissent en modulant l'activité électrique des neurones pour réduire la fréquence et la sévérité des crises. Il existe une variété de ces médicaments, chacun ayant des mécanismes d'action spécifiques et des profils d'effets secondaires, ce qui nécessite souvent un ajustement individuel du traitement. Dans les cas où les médicaments ne parviennent pas à contrôler les crises, des interventions chirurgicales peuvent être envisagées pour retirer les zones du cerveau responsables des décharges épileptiques. Une approche multidisciplinaire, impliquant neurologues, médecins généralistes et autres professionnels de la santé, est essentielle pour optimiser le suivi et le traitement de l'épilepsie.

3 Une expérience d'électrophysiologie (sur la table de la cuisine)



Nous nous appuyons notamment sur les développements de [Greg Gage](#), neuroscientifique et cofondateur de [Backyard Brains](#), une entreprise dédiée à la vulgarisation et à l'éducation en neurosciences, il est connu pour ses démonstrations pratiques lors de ses [exposés](#). Backyard Brains commercialise

des kits électrophysiologie éducatifs et abordables pour rendre la neuroscience accessible.

Parmi ces kits, il est préférable d'éviter ceux dédiés à l'expérimentation animale. De même, les kits impliquant des expérimentations sur les élèves eux-mêmes, bien que sans danger, soulèveraient la question du consentement.

Nous nous tournerons donc vers des kits d'électrophysiologie végétale! Ceci est paradoxal dans ce contexte, les plantes n'ayant pas de neurones, cette particularité peut cependant être exploitée à notre avantage pour illustrer des concepts neuroscientifiques de manière créative et éthique. Au-delà des questions de neurosciences, cette approche encouragera également les élèves à explorer la frontière parfois floue entre le règne animal et végétal, tout en cultivant une sensibilité envers le monde végétal. L'électrophysiologie végétale est un domaine en plein renouveau grâce notamment à l'amélioration de la sensibilité des capteurs et à la compréhension accrue de la signalisation végétale.

Backyard Brains propose 3 exemples d'expérimentations faisant appel à la "Plant SpikerBox" : l'[électrophysiologie de la Dionée attrape-mouche](#) (voir l'[exposé TED](#));

l'électrophysiologie du *Mimosa pudique*; le [contrôle du comportement du Mimosa pudique par la Dionée attrape-mouche](#). Le Plant SpikerBox est un kit éducatif destiné à l'exploration de l'électrophysiologie végétale. Il permet de mesurer et d'enregistrer les signaux électriques des plantes de manière simple et accessible. Le Plant SpikerBox est conçu pour détecter les potentiels d'action et autres signaux électriques émis par les plantes en réponse à divers stimuli, tels que le

toucher, la lumière ou les changements environnementaux. Il se compose d'un boîtier principal contenant les composants électroniques nécessaires pour amplifier et enregistrer les signaux électriques des plantes; d'électrodes conçues pour être peu invasives afin de minimiser les dommages aux plantes; et enfin d'un logiciel qui permet de visualiser et d'analyser les signaux électriques enregistrés.

4 Modélisation

Un modèle est une représentation simplifiée ou abstraite d'un système, d'un phénomène ou d'un processus, visant à en faciliter la compréhension, la description ou la prédiction de son comportement. En sciences, un modèle peut être mathématique, physique, informatique ou conceptuel, conçu pour saisir les éléments essentiels de ce qu'il représente tout en omettant des détails non pertinents.

4.1 Biologie des plantes

Il existe, par exemple, des modèles mathématiques de la biologie des plantes [51], ainsi que de l'activité électrique des plantes [67, 68, 75], et notamment sur la dynamique des canaux ioniques [76] et des PA [66].

Nous nous intéressons ici plus particulièrement aux modèles mathématiques appliqués à la dionée. Le mécanisme ingénieux de fermeture et d'ouverture de son piège, remarquable

pour une plante dénuée de muscles, a suscité un grand intérêt et a fait l'objet de plusieurs modèles mathématiques [26, 57, 58, 71]. Par ailleurs, d'autres modèles ont permis d'analyser les coûts et bénéfices de la carnivorie chez cette plante [44].

Enfin, des modèles se concentrent sur le potentiel d'action (PA) dans la dionée [39, 43], contribuant à notre compréhension des mécanismes électrophysiologiques qui sous-tendent son fonctionnement.

5 Séquence pédagogique

5.1 Déroulé

Tous les aspects de notre vie – mouvement, réaction, souvenir, pensée, amour, haine, douleur, plaisir, tristesse, dépression, amitié, croyance – passent par le cerveau. Chaque expérience, chaque émotion, chaque interaction se traduit par une information, qui est ensuite traitée et intégrée par notre système nerveux.

Tout cela s'articule autour du potentiel d'action, ce phénomène électrique qui permet aux neurones de communiquer. Cependant, malgré les avancées de la science, nous ne comprenons pas encore pleinement comment ces signaux se transforment en expériences vécues, en émotions, et en pensées conscientes. La complexité de cette transformation reste un mystère fascinant, soulevant des questions sur la nature même de notre conscience et de notre expérience humaine.

5.2 Un message de prévention auprès des jeunes

Il semble pertinent de profiter de telle intervention pour rappeler quelques notions de prévention et de sensibilisation en direction des jeunes. Comme par exemple :

Parlons de l'épilepsie et de ce que vous pouvez faire pour vous protéger et soutenir ceux qui en souffrent. D'abord, il est important de comprendre ce qu'est l'épilepsie. De plus, apprendre à reconnaître les signes avant-coureurs des crises peut vous aider à réagir rapidement si jamais cela arrive à un.e ami.e.

Soyez également conscients des déclencheurs de crises : le stress, le manque de sommeil, l'alcool et même les lumières clignotantes peuvent en être la cause. Adoptez donc un mode de vie sain, gérez votre stress, et rappelez-vous que prendre des médicaments prescrits et consulter régulièrement un médecin sont des étapes cruciales pour ceux qui sont déjà touchés par cette maladie.

Encouragez vos ami.e.s et vos camarades de classe à être empathiques et à soutenir ceux.celles qui vivent avec l'épilepsie.

Cela peut vraiment aider à réduire la stigmatisation et l'isolement.

Et parlons de sécurité : si vous aimez faire du vélo, du skateboard ou tout autre sport, n'oubliez pas de porter un casque ! Cela peut réduire le risque de traumatismes crâniens, qui sont des facteurs de risque pour l'épilepsie post-traumatique. En protégeant votre tête, vous prenez soin de votre santé.

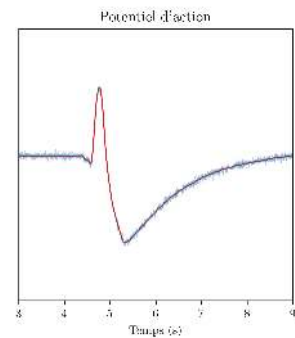
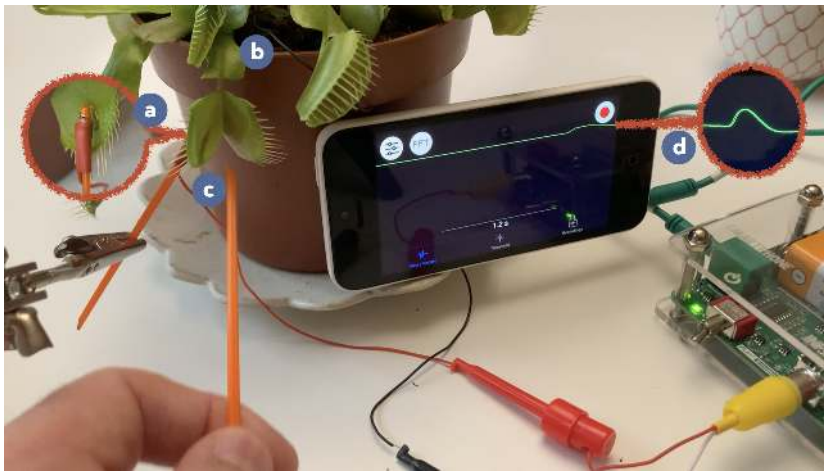
Restez vigilant et évitez les environnements dangereux, comme les bords de piscine ou les hauteurs, surtout sans protection. Pratiquer des activités physiques dans des lieux supervisés est toujours une bonne idée. Ces conseils de prévention devraient être partagés dans vos écoles, lors des cours d'éducation physique et dans les clubs sportifs, pour que chacun puisse adopter des comportements proactifs en matière de sécurité tout en apprenant sur la santé neurologique.

Enfin, si vous êtes témoin d'une crise d'épilepsie, il est important de rester calme et d'agir de manière appropriée. Éloignez les objets dangereux autour de la personne et mettez éventuellement un linge sous sa tête afin de la protéger. Ne tentez pas de la maintenir ou de lui mettre quelque chose dans la bouche. Chronométrez la durée de la crise ; si celle-ci dure plus de cinq minutes ou si une autre crise survient immédiatement après, contactez les services d'urgence. Votre calme et votre aide peuvent faire une grande différence pour la personne en crise et pour rassurer ceux qui l'entourent.

5.3 Les dionées, en prendre soin

Ben il faut bien en acheter et s'en occuper ! Je me fournis auprès d'un jeune producteur de plantes carnivores de la région nantaise, Enzo Defer ([Les Dents de la Terre](#)). Voir deux de ces vidéos : "[Comment nettoyer la plus emblématique des plantes carnivores ?](#)" et "[Comment \(ne pas\) brûler sa Dionée attrape-mouche ?](#)". Voir également les podcasts de "Baleine sous Gravillon" de Marc Mortelmans⁶ : Les plantes carnivores, Enzo Defer (Les Dents de la Terre), [épisode 1/2 épisode 2/2](#)

6. Qui prête aussi sa voix à la passionnante collection de podcasts "[Mécaniques du vivant](#)" de France Culture.



ICI D'ÉCRIRE SEULEMENT LE DISPOSITIF — Ci-contre : **a** Une des électrodes est placée sur le dos d'un des lobes du piège que l'on souhaite mesurer, le contact étant facilité par l'application d'un gel conducteur. **b** L'autre électrode est reliée à la terre, et dans ce cas précis, elle est véritablement enfoncée dans le sol ! **c** Un des poils sensitifs vient d'être touché à l'aide d'un bâtonnet. **d** Le potentiel d'action (PA) apparaît sur l'écran du smartphone. Il nécessitant un ajustement d'échelle, ci-dessus, le signal obtenu est représenté en bleu, tandis que le signal lissé est en rouge.

Le kit **Plant SpikerBox** est un dispositif éducatif conçu pour l'étude des signaux électriques générés par les plantes en réponse à des stimuli. Il comprend généralement les éléments suivants :

- **Électrodes** : Équipées pour être placées sur la surface des plantes, permettant de capter les potentiels d'action (PA) et d'autres signaux électriques.
- **Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)** : Ce composant convertit les signaux analogiques en signaux numériques, rendant les données exploitables par des appareils numériques tels que des smartphones ou des ordinateurs.
- **Câbles et connecteurs** : Fournis pour relier les électrodes au convertisseur et éventuellement à un appareil d'enregistrement.
- **Application mobile** : Une application compatible permet aux utilisateurs de visualiser et d'enregistrer les signaux audio captés, ainsi que de les analyser et de les partager.
- **Gel conducteur** : Utilisé pour améliorer le contact entre les électrodes et la surface de la plante, facilitant ainsi la mesure des signaux électriques.
- **Manuel d'utilisation** : Guide expliquant comment utiliser le kit, réaliser des expériences et interpréter les données recueillies.

Ce kit est particulièrement utile pour l'éducation scientifique, permettant une exploration interactive et engageante de la physiologie des plantes.

Ci-contre : **a** Une des électrodes est placée sur le dos d'un des lobes du piège que l'on souhaite mesurer, le contact étant facilité par l'application d'un gel conducteur. **b** L'autre électrode est reliée à la terre, et dans ce cas précis, elle est véritablement enfoncée dans le sol ! **c** Un des poils sensitifs vient d'être touché à l'aide d'un bâtonnet. **d** Le potentiel d'action (PA) apparaît sur l'écran du smartphone. Il nécessitant un ajustement d'échelle, ci-dessus, le signal obtenu est représenté en bleu, tandis que le signal lissé est en rouge. Le Plant SpikerBox tire parti de l'entrée microphone d'un smartphone, de préférence d'un modèle encore équipé de cette fonctionnalité, pour visualiser et enregistrer des signaux audio. Pour mesurer les variations du potentiel de membrane dans le temps, deux électrodes sont placées sur la plante, détectant les changements de voltage qui correspondent aux signaux électriques générés par les cellules en réponse à un stimulus, tel que le contact avec un poil sensible. Ces signaux électriques analogiques sont ensuite convertis en signaux numériques grâce au convertisseur analogique-numérique^W (CAN) intégré au Plant SpikerBox. Ce processus permet de rendre le signal accessible et interprétable par des appareils numériques comme les smartphones, facilitant ainsi l'analyse des réponses des plantes. Les smartphones.

6 Références

- [1] A. Adamatzky. "On spiking behaviour of oyster fungi *Pleurotus djamor*". *Scientific Reports*, 8 (1) : 7873. 2018.
- [2] A. Alpi et al. "Plant neurobiology: no brain, no gain?" *Trends in plant science*, 12 (4) : 135-136. 2007.
- [3] H. M. Appel et R. B. Cocroft. "Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing". *Oecologia*, 175 (4) : 1257-1266. 2014.
- [4] T. S. Bailey. *Miraculum Naturae : Venus's Flytrap : The Natural History and Culture of the Most Wonderful Plant in the World*. Trafford Publishing. 2008.
- [5] F. Baluška. "Recent surprising similarities between plant cells and neurons". *Plant Signaling & Behavior*, 5 (2). PMID : 20150757 : 87-89. 2010.
- [6] J. C. Barbosa-Caro et M. M. Wudick. "Revisiting plant electric signaling: Challenging an old phenomenon with novel discoveries". *Current Opinion in Plant Biology*, 79 : 102528. 2024. [link].
- [7] M. F. Bear, B. W. Connors et M. A. Paradiso. *NEUROSCIENCES : à la découverte du cerveau*. Editions Pradel.
- [8] J. Bernstein. "Ueber den zeitlichen Verlauf der negativen Schwankung des Nervenstroms". *Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*. 1868.
- [9] M. R. Blatt et al. "Does electrical activity in fungi function as a language?" *Fungal Ecology*, 68 : 101326. 2024.
- [10] J. Böhm et al. "The Venus flytrap *Dionaea muscipula* counts prey-induced action potentials to induce sodium uptake". *Current Biology*, 26 (3) : 286-295. 2016. Video [here](#).
- [11] F. Bouteau et P. Laurenti. "La neurobiologie végétale, une idée folle ?" *Pour la science, hors-série*, 101 : 36-41. 2018.
- [12] E. D. Brenner, R. Stahlberg, S. Mancuso, F. Baluska et E. Van Volkenburgh. "Response to Alpi et al.: plant neurobiology: the gain is more than the name." *Trends in plant science*, 12 (7) : 285-286. 2007.
- [13] R. Brette. *Theory of action potentials*. [link].
- [14] C. Brownlee. "Plant physiology: Anatomy of a plant action potential". *Current Biology*, 32 (19) : R1000-R1002. 2022.
- [15] T. Brunet et D. Arendt. "From damage response to action potentials: early evolution of neural and contractile modules in stem eukaryotes". *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 371 (1685) : 20150043. 2016.
- [16] J. S. Burdon-Sanderson. "I. Note on the electrical phenomena which accompany irritation of the leaf of *Dionaea muscipula*". *Proceedings of the Royal Society of London*, 21 (139-147) : 495-496. 1873.
- [17] J. S. Burdon-Sanderson. "I. Note on the electrical phenomena which accompany irritation of the leaf of *Dionaea muscipula*". *Proceedings of the Royal Society of London*, 21 (139-147) : 495-496. 1873.
- [18] P. Calvo. *Planta sapiens. The new science of plant intelligence*. The Bridge Street Press. 2022.
- [19] A. Catellani, C. Cholet et C. P. Espuny. "The Intelligence of Plants: A New Narrative? Notes on a Contemporary Cultural Phenomenon". *Environmental Communication*, 17 (6) : 618-633. 2023. [link].
- [20] D. Chamovitz. *La plante et ses sens*. Buchet-Chastel. 2018.
- [21] K. S. Cole et H. J. Curtis. "Electric impedance of the squid giant axon during activity". *eng. The Journal of general physiology*, 22 (5) : 649-670. 1939.
- [22] J. Coste, L. Mandereau-Bruno, L. Carcaillon-Bentata, Y. Mikaeloff et V. Bouilleret. *Épilepsie traitée en France en 2020 : prévalence, disparités régionales et sociales à partir du système national des données de santé*. Santé Publique France – Collection : Études et enquêtes. 2024.
- [23] A. Danchin. *The industrial revolution 1850-1874*. [link] (visité le 2024).
- [24] M. Dell'Angelo-Sauvage. "De l'école au collège, le rapport au vivant d'élèves de 10 à 12 ans : en quoi les enseignements de SVT en 6ème font-ils évoluer le rapport au vivant des élèves ?" Thèse de doct. Michèle Dell'Angelo-Sauvage. 2007.
- [25] M. Dolfi et al. "Electrical signaling related to water stress acclimation". *Sensing and Bio-Sensing Research*, 32 : 100420. 2021.

- [26] G. M. Durak et al. "Smooth or with a Snap! Biomechanics of Trap Reopening in the Venus Flytrap (*Dionaea muscipula*)". *Advanced Science*, 9 (22) : 2201362. 2022.
- [27] A. Fabricant et al. "Action potentials induce biomagnetic fields in carnivorous Venus flytrap plants". *Scientific Reports*, 11 (1) : 1438. 2021.
- [28] P. Favre et R. D. Agosti. "Voltage-dependent action potentials in *Arabidopsis thaliana*". *Physiologia Plantarum*, 131 (2) : 263-272. 2007.
- [29] D. Fortin. *Le cerveau, une galaxie dans votre tête Tout ce que nous savons sur le cerveau simplifié et vulgarisé*. Presses de l'Université de Québec. 2022.
- [30] J. Fromm et S. Lautner. "Electrical signals and their physiological significance in plants". *Plant, Cell & Environment*, 30 (3) : 249-257. 2007.
- [31] J. Fromm, S. Lautner, D. Matzke et M. Matzke. "Electrical signaling and systemic proteinase inhibitor induction in the wounded plant". *Plant Signaling & Behavior*, 2 (2) : 89-91. 2007.
- [32] Y. Fukasawa, D. Akai, M. Ushio et T. Takehi. "Electrical potentials in the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor* after a rainfall event". *Fungal Ecology*, 63 : 101229. 2023.
- [33] G. Gage et T. Marzullo. *How Your Brain Works – Neuroscience Experiments for Everyone*. MIT. 2022. [link].
- [34] T. C. Gibson et D. M. Waller. "Evolving Darwin's 'most wonderful' plant: ecological steps to a snap-trap". *New Phytologist*, 183 (3) : 575-587. 2009.
- [35] B. E. Goodman, M. K. Barker et J. E. Cooke. "Best practices in active and student-centered learning in physiology classes". *Advances in Physiology Education*, 42 (3). PMID : 29972063 : 417-423. 2018. [link].
- [36] N. A. R. Gow et B. M. Morris. "The electric fungus". *Botanical Journal of Scotland*, 47 (2) : 263-277. 1995.
- [37] R. Hedrich. "Technical Approaches to Studying Specific Properties of Ion Channels in Plants". In : *Single-Channel Recording*. Sous la dir. de B. Sakmann et E. Neher. Springer. 1995.
- [38] R. Hedrich. "Ion Channels in Plants". *Physiological Reviews*, 92 (4). PMID : 23073631 : 1777-1811. 2012.
- [39] R. Hedrich et I. Kreuzer. "Demystifying the Venus flytrap action potential". *New Phytologist*, 239 (6) : 2108-2112. 2023.
- [40] Q. Hiernaux. *Du comportement végétal à l'intelligence des plantes* ? Éditions Quæ. 2020.
- [41] A.-L. Iosip et al. "DYSCALCULIA, a Venus flytrap mutant without the ability to count action potentials". *Current Biology*, 33 (3) : 589-596.e5. 2023.
- [42] G. Leboucher. "Des animaux trop complexes pour nos concepts?" In : *L'animal désanthropisé*. Sous la dir. d'E. Baratay. Éditions de la Sorbonne, 67-77. 2021.
- [43] J. Lee et P. Calvo. "The potential of plant action potentials". *Synthese*, 202 (6) : 176. 2023.
- [44] S. Lehtinen. "Understanding the Venus flytrap through mathematical modelling". *Journal of Theoretical Biology*, 444 : 1-10. 2018.
- [45] C. Lenne, O. Bodeau et B. Moulia. "Percevoir et bouger : les plantes aussi!" *Pour la science*, 438 : 40-47. 2014.
- [46] J.-H. Li et al. "Plant electrical signals: A multidisciplinary challenge". *Journal of Plant Physiology*, 261 : 153418. 2021.
- [47] D. Madariaga et al. "A library of electrophysiological responses in plants – A model of transversal education and open science". *Plant Signaling & Behavior*, 19 (1) : 2310977. 2024.
- [48] S. Mancuso et A. Viola. *L'Intelligence des plantes*. Lgf. 2020.
- [49] S. Miguel-Tomé et R. R. Llinás. "Broadening the definition of a nervous system to better understand the evolution of plants and animals." *Plant Signal Behav*, 16 (10) : 1927562. 2021.
- [50] P. V. Minorsky. "The 'plant neurobiology' revolution". *Plant Signaling & Behavior*, 19 (1) : 2345413. 2024.
- [51] R. J. Morris, éd. *Mathematical Modelling in Plant Biology*. Springer. 2018.
- [52] M. A. Mudrilov, M. M. Ladeynova, D. V. Kuznetsova et V. A. Vodeneev. "Ion Channels in Electrical Signaling in Higher Plants". *Biochemistry*, 88 (10) : 1467-1487. 2023.
- [53] N. Myslinski. "Why Wait? Neuroscience Is for Everyone!" eng. *eNeuro*, 9 (3). 2022.
- [54] K. O'Melia. "Dionaea muscipula, Venus flytrap : A Case Study in Adapting to Environmental Imperfection". *The Synapse : Intercollegiate science magazine*, 36 (1, Article 9). 2023. [link].
- [55] S. Prior. *Carnivorous plants and "the man eating tree"*. Botany Leaflet 23. Field Museum of Natural History, Chicago. 1939. [link].
- [56] B. Ramadan et U. M. Ricoy. "The NEURON Program: Utilizing Low-Cost Neuroscience for Remote Education Outreach." eng. *Journal of undergraduate neuroscience education : JUNE*, 21 (2) : A126-A132. 2023.
- [57] M. Z. Ruoting Yang Scott C. Lenaghan et L. Xia. "A mathematical model on the closing and opening mechanism for venus flytrap". *Plant Signaling & Behavior*, 5 (8). PMID : 21460610 : 968-978. 2010.
- [58] E. Saikia et al. "Kinematics Governing Mechanotransduction in the Sensory Hair of the Venus flytrap." *International journal of molecular sciences*, 22 (1). 2020.
- [59] S. Scherzer et al. "A unique inventory of ion transporters poises the Venus flytrap to fast-propagating action potentials and calcium waves". *Current Biology*, 32 (19) : 4255-4263.e5. 2022. See very nice videos [here](#).
- [60] S. M. Schuetze. "The discovery of the action potential". *Trends in Neurosciences*, 6 : 164-168. 1983.
- [61] C. J. Schwenning. "A brief historical perspective: Hodgkin and Huxley". *The Journal of Physiology*, 590 (Pt 11) : 2571-2575. 2012.
- [62] A. Sebastian. *A dictionary of the history of medicine*. CRC Press. 2011.
- [63] M. Segundo-Ortin et P. Calvo. "Consciousness and cognition in plants". *WIREs Cognitive Science*, 13 (2) : e1578. 2022.
- [64] G. M. Shepherd. *Creating Modern Neuroscience: The Revolutionary 1950s*. Oxford University Press. 2009.
- [65] R. Stahlberg. "Historical overview on plant neurobiology". eng. *Plant Signal Behav*, 1 (1) : 6-8. 2006.
- [66] V. Sukhov, V. Nerush, L. Orlova et V. Vodeneev. "Simulation of action potential propagation in plants". *Journal of Theoretical Biology*, 291 : 47-55. 2011. [link].
- [67] V. Sukhov et V. Vodeneev. "A mathematical model of action potential in cells of vascular plants." *The Journal of membrane biology*, 232 (1-3) : 59-67. 2009.
- [68] E. Sukhova, E. Akinchits et V. Sukhov. "Mathematical Models of Electrical Activity in Plants". *The Journal of Membrane Biology*, 250 (5) : 407-423. 2017.
- [69] J. Thain et D. Wildon. "Electrical signalling in plants". *Science Progress*, 76 (3/4 (301/302)) : 553-564. 1992. [link].
- [70] A. Verkhatsky, O. A. Krishtal et O. H. Petersen. "From Galvani to patch clamp: the development of electrophysiology". *Pflügers Archiv*, 453 (3) : 233-247. 2006.
- [71] A. Volkov, V. Forde-Tuckett, M. Volkova et V. Markin. "Morphing structures of the *Dionaea muscipula* Ellis during the trap opening and closing". *Plant signaling & behavior*, 9. 2014.
- [72] A. G. Volkov, éd. *Plant Electrophysiology – Signaling and Responses*. Springer. 2012.
- [73] A. G. Volkov et V. S. Markin. "Active and Passive Electrical Signaling in Plants". In : *Progress in Botany : Vol. 76*. Sous la dir. d'U. Lüttge et W. Beyschlag. Springer International Publishing, 143-176. 2015.
- [74] B. Wang, Y. Hou, S. Zhong, J. Zhu et C. Guan. "Biomimetic Venus Flytrap Structures Using Smart Composites: A Review". *Materials*, 16 (20). 2023.
- [75] Z. Wang et al. "A Theory Model for Description of the Electrical Signals in Plant Part I". In : *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume I*. Sous la dir. de D. Li. Springer, 637-643. 2008.
- [76] K. C. A. Wedgwood, J. Tabak et K. Tsaneva-Atanasova. "Modelling Ion Channels". In : [51]. Springer International Publishing, 37-52. 2018.
- [77] S. E. Williams. "A Salute to Sir John Burdon-Sanderson and Mr. Charles Darwin on the Centennial of the Discovery of Nerve-like Activity in the Venus' Flytrap". *Carnivorous Plant Newsletter*, 2 (3) : 41-43. 1973.