

➤ accolées, comme dans la peau, ou englobées dans un gel commun, par exemple, de collagène dans le tissu conjonctif, voire libres comme nos globules blancs et rouges. L'autotrophie engendre de plus l'immobilité de l'organisme, car la photosynthèse ne produit pas assez d'énergie pour déplacer la masse d'une plante. Michel Houellebecq, dans *La Possibilité d'une île*, décrit des humains devenus photosynthétiques, mais la surface de notre corps n'intercepterait pas assez de lumière pour nous déplacer, ni même nous nourrir... L'immobilité a d'ailleurs gagné les coraux dans leur imitation du modèle végétal !

Une stratégie de défense des végétaux utilise la compartimentation de leurs cellules : ils contiennent souvent des toxines contre leurs prédateurs. Ils se protègent en effet eux-mêmes de ces toxines en les stockant dans leur vacuole ! Tannins, alcaloïdes, composés générant du cyanure, composés bromés indigestes... toutes ces toxines végétales sont vacuolaires. Une agression microbienne ou la dent du bétail qui détruit la fine compartimentation libère les toxines. Ainsi, la famille de la moutarde (les Brassicacées) contient des composés soufrés irritants, les glucosinolates. Si nous en utilisons certains à faible dose en condiment, comme ceux du wasabi, d'autres sont toxiques pour le foie et cancérogènes (c'est le cas des choux sauvages). On ne les sent que lorsque les tissus sont rompus : un précurseur stocké dans la vacuole rencontre alors les enzymes, cantonnées dans le cytoplasme cellulaire, et libère les composés irritants.

Alors que les plantes pratiquent toutes ce stockage vacuolaire, les animaux n'accumulent guère les toxines dans leur organisme, à de rares exceptions près. D'ailleurs, ces exceptions accumulent dans leur sang des toxines souvent issues des plantes qu'elles consomment : les chenilles d'*Heliconius* stockent par exemple les alcaloïdes des passiflores qu'elles parasitent.

On pourrait croire que, séparées par d'épaisses parois, les cellules végétales communiquent moins entre elles que leurs homologues animales. Ces dernières peuvent pourtant s'accoler par leur membrane et communiquer par de fins canaux protéiques. En fait, les cellules de plantes sont encore plus communicantes ! Chez quelques algues vertes ou brunes et chez les plantes, les cellules voisines sont reliées par des canaux, les plasmodesmes (voir les Repères, page 6). Bordés de la même membrane que les cellules voisines, les plasmodesmes mettent en continuité les cellules voisines et leurs membranes !

Les cellules de la plante forment ainsi un grand réseau continu, partageant une membrane commune... Certains virus végétaux utilisent les plasmodesmes pour se propager en les agrandissant, un scénario inexistant chez les animaux. Mais les plasmodesmes

LES PLANTES POUR ELLES-MÊMES

Aujourd'hui, une certaine vulgarisation fait renaître l'intérêt pour la plante en lui attribuant des capacités dans des registres animaux, comme l'intelligence, l'entraide ou la vie sociale... Son succès certain, construit sur notre fascination pour des traits animaux, cache un zoocentrisme, sinon même une fascination pour des traits humains. Les caractères qui accompagnent l'autotrophie, radicalement opposés à l'animalité, méritent plus d'attention pour eux-mêmes. Approcher la plante par l'animalité encourt le risque de méprises, d'incompréhensions, voire d'omettre l'essentiel de la végétalité. Inversement d'ailleurs, qui achèterait un livre sur « la photosynthèse des hommes » ? Même si de nombreuses formes intermédiaires existent avec l'animal, il nous faut aujourd'hui aller au cœur du végétal. Cela exige de se préparer à la différence, comme dans la démarche scientifique dont Bachelard disait que « c'est accepter une mutation brusque qui doit contredire un passé », un passé animal pour nous.

présentent des avantages : par exemple, aucune cellule ne peut garder pour elle des ressources puisqu'elle « est » aussi toutes les autres ! Cela explique sans doute qu'il n'y ait pas de cancer chez les plantes, sauf lorsque certains parasites les provoquent : la coordination entre cellules voisines est totale ! Bien plus, les neurones deviennent inutiles : vus comme des succès de l'évolution, ils sont en fait imposés par la séparation des cellules animales qui ne peuvent s'échanger une excitation électrique.

À l'inverse, chez la plante, le signal électrique d'une cellule passe à l'autre sans encombre (voir *La neurobiologie végétale, une idée folle ?* par F. Bouteau, page 36). Quand un insecte effleure les poils d'un piège de dionée, une plante carnivore qui referme ses feuilles sur des proies, un signal électrique est vite transmis de cellule en cellule par les plasmodesmes vers la charnière du piège, qui se clôt brusquement.



Les végétaux sont immobiles ? Non, l'Euglène (à droite) et le Chlamydomonas (à gauche) se déplacent grâce à des flagelles.



BIBLIOGRAPHIE

M.-A. SELOSSE, *Jamais seul : ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*, Actes Sud, 2017.

M.-A. SELOSSE ET AL., *Mixotrophy everywhere on land and in water: the grand écart hypothesis*, *Ecology Letters*, vol. 20, pp. 246-263, 2017.

J. ARCHIBALD, *One Plus One Equals One: Symbiosis and the evolution of complex life*, Oxford University Press, 2016.

M.-A. SELOSSE ET M. ROY, *Les plantes qui mangent des champignons...*, Dossier Pour la Science « Les végétaux insolites », n° 77, pp. 102-107, 2012.

F. HALLÉ, *Éloge de la plante. Pour une nouvelle biologie*, Seuil, 2004.

Ces dernières décennies, une découverte majeure sur le plancton, où s'est particulièrement illustrée la Station biologique de Roscoff, en Bretagne, est que... beaucoup d'algues unicellulaires ne sont pas totalement autotrophes. Certaines sont capables, comme des petites algues vertes ou des Euglènes, de pomper des molécules organiques dans l'eau, qui couvrent jusqu'à 50% de leurs besoins! D'autres se comportent comme des plantes carnivores, attrapant parfois une autre cellule qu'elles capturent par phagocytose et digèrent pour en collecter l'azote, le phosphate et des sucres.

Ce mélange d'hétérotrophie et d'autotrophie est la mixotrophie (voir *Le règne des plantes-garous*, par A. Mitra, page 78). Il est plus rare dans le monde visible, mais mon équipe, au Muséum, a découvert une mixotrophie chez des plantes de nos forêts, dont certaines orchidées. Privées d'une lumière suffisante par les arbres, elles complètent leurs besoins en exploitant des champignons qui colonisent leurs racines! En effet, la plupart des plantes vivent associées à des champignons du sol, en une symbiose nommée mycorhize. Habituellement, la plante cède du sucre au champignon, en échange d'eau, d'azote et de phosphate que celui-ci collecte dans le sol. Le fonctionnement est modifié par les plantes mixotrophes, qui reçoivent aussi de la matière organique des champignons: elles ne sont donc plus totalement autotrophes.

L'ORCHIDÉE ÉTAIT EN BLANC

Ainsi existe-t-il des mixotrophies « primitives », par conservation de la phagocytose chez des algues. Mais d'autres mixotrophies, secondaires dans l'évolution, nous racontent un retour évolutif à l'hétérotrophie partielle. Et parfois même, totale: certaines des orchidées forestières, nourries de leurs champignons, ont perdu la chlorophylle et la photosynthèse, comme la néottie nid-d'oiseau ou l'épipactis (voir figure ci-contre). Un basculement similaire vers l'hétérotrophie existe aussi chez les plantes parasites qui, à partir d'ancêtres mixotrophes, comme le gui, ont parfois perdu la photosynthèse, comme les Orobanches ou le Rafflesia, qui parasitent les racines voisines.

Une trop stricte opposition entre animal et végétal est donc un piège macroscopique: le monde microbien, qui abrite l'essentiel de la biodiversité, révèle des stratégies intermédiaires. Elles sont moins fréquentes dans le monde visible, mais pas absentes: pensons... aux symbioses coralliennes qui sont mixotrophes, après tout! Ces divers intermédiaires révèlent des passerelles évolutives, parcourues en tous sens, entre l'autotrophie et l'hétérotrophie pures. Il n'en reste pas moins que l'autotrophie construit, de façon répétée dans l'évolution, une organisation cellulaire originale et très différente de celle des animaux. ■

L'opposition entre végétal, autotrophe immobile, et animal, hétérotrophe mobile, est observable quotidiennement, mais sous le microscope la chose se complique... De nombreuses algues unicellulaires du plancton sont mobiles. Elles se déplacent grâce aux mouvements d'expansions cellulaires filiformes, les flagelles. L'Euglène a un flagelle qui remorque sa cellule; les Chlamydomonas en ont deux qui s'agitent comme vos bras quand vous nagez la brasse; Bolidomonas a deux flagelles, un qui remorque et l'autre qui sert de gouvernail. Cette cellule de 1,5 micromètre porte bien son nom, elle qui franchit 1000 fois sa taille par seconde!

Si la photosynthèse ne produit pas assez d'énergie pour qu'une pâquerette bouge, une cellule unique capte assez de lumière pour se mouvoir, car sa surface est grande comparée à son poids. Les végétaux microscopiques ne sont donc pas tous immobiles; ils se déplacent pour se rapprocher de la lumière ou fuir des prédateurs. Étonnamment, les Chlamydomonas ont, dans la membrane de la cellule, des protéines sensibles à la lumière de la même famille que les opsines, les protéines qui, dans les yeux des animaux, perçoivent la lumière!



De majestueux baobabs,
à Madagascar.



© Damian Ryszawy / Shutterstock.com

DES ÊTRES D'EXCEPTION

Savez-vous disposer des objets en respectant le nombre d'or? Les plantes, très douées en mathématiques, le font tout naturellement. Ce n'est pas le seul de leurs talents. Plusieurs espèces sont passées maîtresses dans l'art de manipuler les animaux. Elles les exploitent pour se protéger, se nourrir, se reproduire... et même pour devenir mobiles. Les végétaux, particulièrement les plantes à fleurs, sont également étonnants par l'inventivité qu'ils déploient en termes de sexualité. Oubliez le modèle classique mâle et femelle, et explorez les multiples possibilités offertes par l'hermaphrodisme et l'autofécondation. Ça n'a rien à voir, mais en plus, certains spécimens d'arbres sont très beaux!

L'ESSENTIEL

- Au fil de leur croissance, les plantes produisent d'étonnants motifs géométriques.
- En particulier, chez nombre de végétaux, l'angle entre deux organes successifs n'est autre que l'angle d'or, relié au nombre d'or.
- Depuis quelques années, les biologistes ont identifié divers mécanismes intervenant dans la mise en place de ces motifs géométriques.
- Tout se passe dans les méristèmes, de minuscules niches de cellules souches où naissent les organes selon un plan qui n'est peut-être pas aussi déterministe qu'on le pensait.

LES AUTEURS



TEVA VERNOUX
directeur de recherche
au CNRS au sein du
laboratoire Reproduction
et développement des
plantes, à l'ENS de Lyon



CHRISTOPHE GODIN
directeur de recherche
à l'Inria au sein
du même laboratoire



FABRICE BESNARD
chargé de recherche
à l'Inra au sein
du même laboratoire

P

omme de pin, tournesol, ananas, marguerite, cactus, palmier... Quel est le point commun de ces végétaux ? Ils arborent des motifs spirales que l'on peut rapprocher d'un objet mathématique bien connu, la suite de Fibonacci dont chaque terme est la somme des deux précédents, en partant de 1 et 1 : 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89... Ces arrangements et ces symétries quasi cristallines sont une source d'inspiration inépuisable pour l'art humain, comme le suggèrent les motifs déployés par exemple dans l'art musulman ou l'art nouveau.

Ces régularités mathématiques sont celles de la phyllotaxie (du grec *phyllo*, feuille, et *taxie*, ordre) c'est-à-dire de l'arrangement des feuilles (et par extension de tout élément botanique) le long des tiges d'une plante. Les mécanismes qui assurent l'autoorganisation de

géométries aussi complexes ont longtemps laissé les scientifiques perplexes. Comment émergent ces motifs réguliers, des molécules jusqu'à la plante entière ? Bref : comment les plantes font-elles des mathématiques ?

Au-delà des implications en termes d'évolution (voir l'encadré page 52), depuis plus de deux siècles, des chercheurs allient mathématiques, physique, informatique et biologie pour répondre à ces questions, mais ces vingt dernières années, des avancées majeures ont été obtenues. Depuis une dizaine d'années, notamment, plusieurs équipes interdisciplinaires, dont la nôtre, ont mis au point des approches qui combinent les dernières avancées de la biologie moléculaire et des outils de modélisation pour mieux disséquer le fonctionnement de ce système complexe. Et l'on comprend de mieux en mieux les dessous biologiques des mathématiques végétales.

LE POUVOIR DU MÉRISTÈME

Tout commence au bout des tiges, dans les petites zones des plantes où s'élabore la phyllotaxie : les méristèmes, des tissus spécialisés qui contiennent des cellules souches et produisent en permanence de nouveaux organes (voir la photo page 55). Dans cet espace réduit (plus petit qu'une tête d'épingle chez de nombreuses plantes), chaque nouvel organe se forme à un



© Bringolo/Shutterstock.com

Les nombreuses feuilles d'*Aloe polyphylla*, une espèce originaire d'Afrique du Sud, forment de magnifiques spirales qui tournent dans les deux sens.