

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.



Quand les plantes font des maths

Spirales croisées, arrangement régulier des feuilles le long des tiges, organisation des écailles de pommes de pin...

Les végétaux fabriquent des géométries complexes où le nombre d'or apparaît souvent. On commence à comprendre la biologie de ces mathématiques végétales.

À QUOI ÇA SERT ?

Mais à quoi ça sert, demande-t-on souvent en biologie ? Dans le cadre de la théorie de l'évolution, elle se reformule plutôt ainsi : les phyllotaxies procurent-elles aux plantes un avantage sélectif particulier ? Nous l'ignorons, mais il faut toutefois se méfier de la tendance spontanée de l'esprit humain à considérer tout élément biologique comme étant le fruit d'une sélection positive *ad hoc*.

Le lieu commun selon lequel la phyllotaxie serait une adaptation permettant de capter au mieux la lumière, car elle minimiserait le recouvrement entre feuilles, ne résiste pas longtemps à l'analyse. D'abord, elle fait fi de la diversité des phyllotaxies existantes : beaucoup de plantes présentent une phyllotaxie avec des recouvrements importants et pourtant manifestement viable. De plus, la phyllotaxie ne détermine que l'insertion des feuilles sur la tige. Dans bien des cas, les feuilles se réorientent par des mouvements de croissance, de flexion ou de torsion mécanique dans la direction de la lumière.

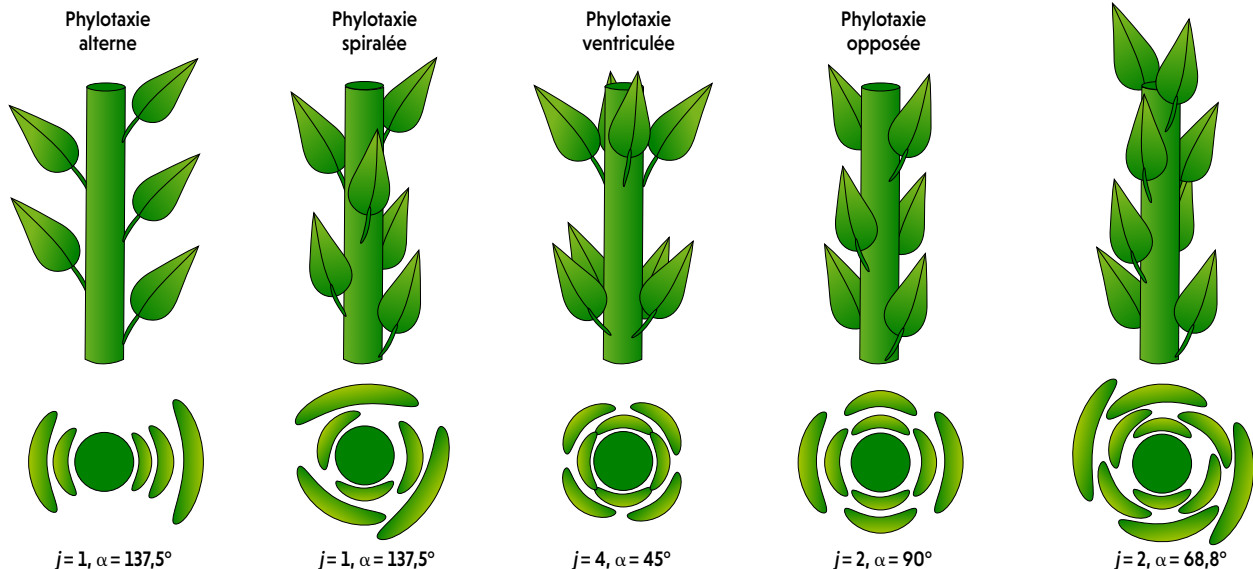
Par ailleurs, toutes les plantes n'ont pas intérêt à maximiser leur exposition au soleil, en particulier dans les environnements arides. À notre connaissance, il n'a en outre pas été établi de corrélation entre le taux de recouvrement des phyllotaxies et le taux d'ensoleillement que les plantes subissent. Enfin, cet argument ignore la nature des structures impliquées. La phyllotaxie ne concerne pas que les feuilles, mais aussi

beaucoup d'éléments botaniques, telles les écailles de pomme de pin, non photosynthétiques, pour qui la maximisation de l'éclairement n'est pas pertinente.

Hormis l'optimisation de la captation de la lumière, d'autres intérêts adaptatifs possibles ont été proposés. Par exemple, dès 1873, le médecin anglais Hubert Airy suggérait que le caractère compact de ces structures protégerait les jeunes organes des stress externes (températures, blessures, prédation...). Aussi intéressantes soient-elles, ces hypothèses posent un problème majeur : elles sont difficiles à tester expérimentalement, car il est difficile de comparer différentes phyllotaxies ou de les modifier expérimentalement sans que d'autres caractères de la plante ne changent. Sans compter que mesurer rigoureusement des avantages sélectifs n'est pas chose aisée.

Une alternative à ces hypothèses adaptationnistes serait que les motifs géométriques des phyllotaxies ne soient qu'une conséquence indirecte – et donc non objet de la sélection en tant que tel – de la façon dont les plantes se développent, véritable objet de la sélection. La façon dont les plantes fabriquent leurs organes explique beaucoup des propriétés géométriques des phyllotaxies. Mais cette explication n'exclut pas que ces propriétés émergentes ne puissent conférer un avantage sélectif particulier, qui *in fine* favoriserait la sélection des mécanismes contrôlant la formation des organes...

Les principaux types de phyllotaxie, caractérisés par le nombre j d'organes insérés au même nœud de la tige, et par l'angle α de divergence entre les organes successifs.



> moment précis et à une place précise tout près du centre du méristème. La croissance continue de la tige et des organes dilate ensuite cet arrangement microscopique et produit les motifs phyllotaxiques visibles à l'œil nu. Cette phase d'allongement secondaire des organes n'apporte pas en général de changement critique dans leur disposition relative. La phyllotaxie est donc déterminée de façon très précoce, au moment même de l'apparition des organes dans le méristème. Comment alors le groupe de quelques cellules à l'origine du futur organe est-il déterminé

au sein d'un tissu de quelques centaines de cellules ? Pour comprendre, observons d'abord l'organisation des motifs phyllotaxiques.

L'analyse quantitative de ces motifs géométriques a révélé des propriétés étonnantes. Il existe différentes phyllotaxies, que l'on classe en utilisant deux critères : le nombre d'éléments insérés sur un nœud, c'est-à-dire au même endroit de la tige et l'angle de divergence qui sépare deux éléments (ou groupes d'éléments) successifs. Quelques grands types sont ainsi définis (voir l'encadré ci-dessus).