

- > 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 que nous observons 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

éléments voisins dessine d'autres spirales, bien visibles cette fois, les unes tournant dans un sens, les autres dans l'autre. Et si l'on compte le nombre de ces spirales, nommées parastiches, dans chaque sens, on trouve dans la grande majorité des plantes deux nombres qui ne doivent rien au hasard, comme le fit remarquer en 1831 le botaniste allemand Alexander Braun (*voir l'encadré page 30*). Ce sont deux nombres consécutifs de la suite de Fibonacci. Chaque nombre de cette suite est la somme des deux précédents, en partant de 1 et 1 :

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, ...

Ainsi, une pomme de pin fait en général apparaître 8 spirales dans un sens et 13 dans l'autre, une marguerite 21 spirales dans un sens et 34 dans l'autre, etc.

L'ANGLE D'OR DANS LES SPIRALES DES PLANTES

Identifiée et étudiée pour la première fois par Léonard de Pise (Leonardo Fibonacci) au XIII^e siècle, cette suite a de très nombreuses et remarquables propriétés mathématiques. En particulier, si l'on considère la suite constituée des rapports successifs entre deux termes consécutifs (suite des ratios de Fibonacci) :

$1/1, 2/1, 3/2, 5/3, 8/5, \dots$,

celle-ci converge et tend vers $(1+\sqrt{5})/2$, c'est-à-dire le nombre d'or Φ (égal à environ 1,618). Pendant des siècles, ce nombre a été considéré comme une proportion harmonieuse, voire divine, dans les traités d'architecture, de dessin et même de musique. Dans le contexte des plantes, ce nombre est en particulier dissimulé dans l'angle relativement constant que forment deux organes successifs dans une phyllotaxie spiralée : cet angle vaut en moyenne 137,5 degrés. Si l'on multiplie 137,5 par le nombre d'or 1,618, on trouve un angle de 222,5 degrés, soit exactement son angle complémentaire (leur somme fait 360 degrés, soit un tour exactement !). Nos Anciens auraient pu dire que l'angle 137,5 degrés, baptisé « angle d'or », partage le cercle d'une façon harmonieuse (*voir le glossaire ci-contre*).

Réciproquement, on montre mathématiquement que si un motif est généré en créant périodiquement des organes séparés successivement par un angle voisin de l'angle d'or dans un mouvement concentrique, alors des spirales secondaires apparaissent (les parastiches), et les nombres de spirales dans chaque sens sont deux nombres consécutifs de la suite de Fibonacci.

La présence de l'angle d'or rend la question de la formation de la phyllotaxie plus intrigante encore... Comment des cellules dans un tissu (le méristème) déterminent-elles avec une telle précision le lieu où un nouvel organe se forme ? Et pourquoi l'angle d'or apparaît-il si fréquemment dans la croissance des plantes ?

Au cours des XIX^e et XX^e siècles, devant l'impossibilité d'observer expérimentalement >

Comment des cellules déterminent-elles avec précision le lieu où se forme un organe ?

GLOSSAIRE

PHYLLOTAXIE

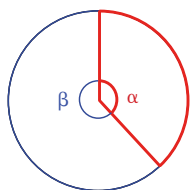
Géométrie qui caractérise la disposition autour d'un axe de croissance de tout élément botanique : feuille, branche, bourgeon, écailles, fruits, fleurs, pétales, étamines...

MÉRISTÈME

Tissu végétal indifférencié qui permet à la plante de créer de nouveaux tissus ou organes et de croître tout au long de sa vie.

ANGLE D'OR

En géométrie, il est défini comme le plus petit des deux angles complémentaires α et β tels que $\beta/\alpha = 2\pi/\Phi$. Cette définition implique que $\beta/\alpha = \Phi$ (le nombre d'or) et que l'angle d'or $\alpha = 2\pi/\Phi^2$, soit environ 137,5°.



l'apparition des organes dans le méristème. Comment alors le groupe de quelques cellules qui donnera naissance au futur organe est-il déterminé au sein d'un tissu de quelques centaines de cellules ? Pour le comprendre, observons tout d'abord attentivement 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 (la jugacie, du latin *jugare*, lier) et l'angle de divergence qui sépare deux éléments (ou groupes d'éléments) successifs. Quatre grands types sont ainsi définis : les phyllotaxies alternes, spiralées, verticillées et multi-juguées (*voir l'encadré page ci-contre*).

Des études botaniques, bien que non exhaustives, semblent indiquer que les phyllotaxies spiralées sont les plus répandues. Et c'est leur étude qui a propagé un parfum d'ésotérisme sur la phyllotaxie. En effet, on distingue plusieurs spirales dans ces arrangements. La première relie les organes dans l'ordre où ils ont été produits dans le temps, du plus jeune au plus vieux, par exemple. Souvent peu visible, cette spirale génératrice s'enroule longitudinalement autour de la tige, feuille après feuille, comme les marches d'un escalier en colimaçon.

Lorsque les structures restent compactes (imaginez un escalier en colimaçon très comprimé dans le sens de la hauteur !), comme dans une pomme de pin, la proximité visuelle des

ce qui se passe précisément à l'intérieur des méristèmes, trop petits et très bien protégés par la plante, les scientifiques ont imaginé des mécanismes qui pourraient rendre compte de l'autoorganisation des motifs phyllotaxiques et de leur diversité. À l'instar de la façon dont les astrologues prénewtoniens avaient construit différents modèles du mouvement des astres dans le ciel, les chercheurs ont donc spéculé sur les mécanismes biologiques sous-jacents en se servant d'observations et d'expérimentations macroscopiques.

LE TOURNANT DE L'ÉPILOBE

Plusieurs observations, par exemple, indiquent que l'angle de divergence n'est pas déterminé de manière intrinsèque à la plante, génétiquement notamment. En effet, on constate régulièrement des phyllotaxies différentes au sein de la même espèce, qui ne semblent donc pas héréditaires génétiquement. Par exemple, on a observé chez quelques spécimens de tournesol des phyllotaxies spiralées avec un angle de divergence proche de 99,5 degrés au lieu du classique 137,5 degrés, et des nombres de parastiches se conformant à la suite de Lucas (une variante de la suite de Fibonacci).

Ces variants sont assez spontanés dans la nature. Il existe même des plantes ayant des phyllotaxies différentes entre branches (pour autant génétiquement identiques) ! Chez certains végétaux, un même méristème change parfois de phyllotaxie au cours de sa vie. Ces observations ont reçu une confirmation de poids avec les expériences originales menées par les Britanniques Mary et Robert Snow dans les années 1930.

Grâce à des manipulations microchirurgicales, ils perturbèrent le fonctionnement de méristèmes chez différentes plantes. Dans une de leurs expériences clés, ils incisèrent en deux le méristème au sommet des tiges d'un épilobe à grandes fleurs (*Epilobium hirsutum*), une plante dont les feuilles sont opposées. Les deux moitiés des méristèmes ont alors continué à fonctionner indépendamment, mais cette fois avec une phyllotaxie spiralée ! Ce résultat indique bien que l'angle de divergence n'est pas déterminé chez une plante. Il suggère aussi qu'un même mécanisme produit les différentes phyllotaxies.

Ces expériences ont peu à peu conduit à l'hypothèse que ce sont les interactions entre organes et les conditions initiales (nombre et position des organes présents avant la formation d'un nouveau) qui sont responsables de la formation du motif. Un principe que l'on peut résumer avec cette règle simple : un organe se forme à la périphérie de la zone centrale du méristème au moment et à l'endroit où la croissance finit par laisser une place suffisante.

Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, divers chercheurs ont exploré le potentiel de

LE NOMBRE D'OR : RÉALITÉ SCIENTIFIQUE OU CONSTRUCTION SUBJECTIVE ?

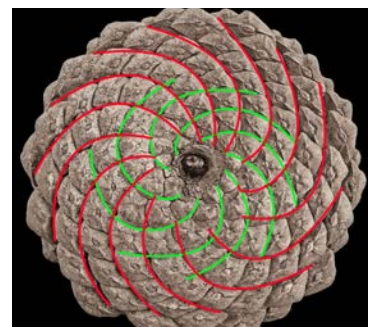
Les phyllotaxies spiralées sont reliées à la suite de Fibonacci de deux façons au moins : par la paire de nombres comptant les spirales horaires et anti-horaires (voir les photos ci-dessous) et par l'angle d'or (voir la photo page ci-contre). La présence du nombre d'or a souvent été invoquée dans différents contextes : architecture antique, peinture des maîtres du Cinquecento, astrologie... On trouve aussi de multiples mentions de l'existence du ratio d'or, aussi bien dans la forme des coquillages de nautilus que dans les rapports de proportionnalité entre différents segments du corps humain. Ces données sont à prendre avec prudence. Parfois, l'analyse précise et rigoureuse des échantillons suggère plutôt que la présence du nombre d'or résulte d'arrondis grossiers, de délimitations arbitraires ou de biais des échantillons mesurés... Après tout, quoi de plus facile que de trouver un rapport qui avoisine vaguement 1,6 ? La différence avec le nombre attendu sera expliquée par une inhérente variabilité biologique ou par l'incertitude de la mesure. Il en est de même de l'angle de divergence de la phyllotaxie : lorsqu'il est mesuré chez l'arabette, il est rarement égal à 137,5 degrés. Mais, statistiquement, en moyenne, il est proche de cette valeur.

En revanche, les nombres comptant les spirales étant des entiers et non des arrondis, leur correspondance avec les termes de la suite de Fibonacci ne laisse pas la place au doute. À notre connaissance, c'est d'ailleurs le seul exemple biologique où cette suite et, grâce à elle, le nombre d'or peuvent être associés de manière solide. De plus, cette association est confortée par les connaissances que nous avons sur la façon dont ces motifs se forment. Toutefois, il reste parfois un biais subjectif dans la façon dont la phyllotaxie est présentée : l'attention se focalise sur les phyllotaxies spiralées de Fibonacci et moins sur les autres types de phyllotaxies, variations, erreurs, désordres... Un des enjeux des recherches actuelles est d'expliquer le plus de motifs possible, tant par la modélisation que par la biologie.

T. V., C. G. et F. B.



Cette marguerite a une phyllotaxie spiralée de type (21, 34) : ses fleurons dessinent 21 parastiches dans un sens (en vert) et 34 dans l'autre (en rouge) – deux nombres consécutifs de la suite de Fibonacci.



Cette pomme de pin a une phyllotaxie spiralée de type (8, 13) : ses écailles dessinent 8 parastiches dans un sens (en vert) et 13 dans l'autre (en rouge) – deux autres nombres consécutifs de la suite de Fibonacci.

ce principe autoorganisateur. De nombreux modèles ont ainsi été élaborés à l'échelle du tissu et des organes en formation. Ces travaux ont abouti à l'identification d'un principe élémentaire commun à tous les systèmes phyllotaxiques : les organes récemment créés à l'extrémité des tiges d'une plante inhibent la formation de nouveaux organes dans leur voisinage immédiat en diffusant autour d'eux un signal d'inhibition. La superposition de tous ces signaux crée un champ d'inhibition à la surface des méristèmes, qui détermine le moment et le lieu de croissance des nouveaux organes. C'est ainsi que, au début des années 1990, Yves Couder et Stéphane Douady, à l'École normale