

# La genèse des formes

Primaire et collège

## Résumé

Pourquoi le zèbre a-t-il des bandes noires sur le dos, le guépard des taches et la girafe des motifs en forme d'hexagone ? Pourquoi la fleur de tournesol fait-elle apparaître des spirales en son cœur ? Et pourquoi la boue séchée est-elle parcourue par des fractures qui se croisent à angle droit ? À toutes ces questions, on pourrait répondre que telle est la nature des choses, mais le scientifique voudra aller plus loin...

# la genèse des formes

Marc Rabaud

Pourquoi le zèbre a-t-il des bandes noires sur le dos, le guépard des taches et la girafe des motifs en forme d'hexagone ? Pourquoi la fleur de tournesol fait-elle apparaître des spirales en son cœur ? Et pourquoi la boue séchée est-elle parcourue par des fractures qui se croisent à angle droit ? À toutes ces questions, on pourrait répondre que telle est la nature des choses, mais le scientifique voudra aller plus loin : classer les formes, les expliquer, trouver des règles générales permettant d'en décrire la genèse.

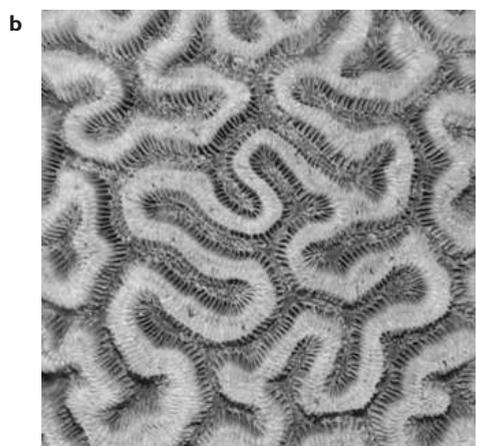
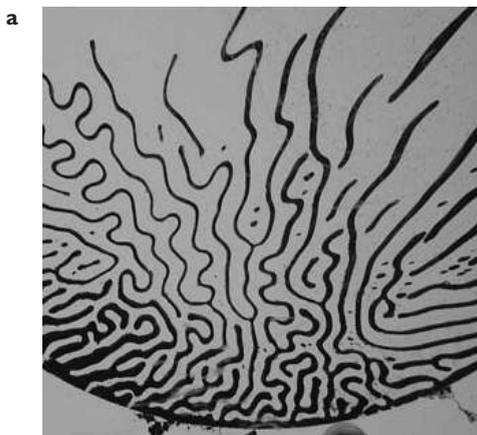
Pour nous, le terme « forme » s'appliquera à l'enveloppe extérieure d'un objet, la forme d'une bulle de savon par exemple, ou au motif d'une surface, comme la robe du zèbre. Nous décrirons quelques exemples en utilisant des mathématiques simples et en profiterons pour évoquer quelques mécanismes physiques, en particulier les règles de croissance, qui permettent de comprendre certaines de ces formes, que ce soit celles d'équilibre ou celles hors d'équilibre. Dans un second temps, nous tenterons de classer les formes, ce qui nous conduira à établir quelques analogies entre le domaine de la physique et celui du monde du vivant. L'intérêt d'une telle classification est que, parfois, une similitude des formes peut s'expliquer par une similitude de leur processus d'apparition,

processus que l'on peut alors essayer de comprendre. Le scientifique qui s'intéresse à la MORPHOGENÈSE, c'est-à-dire, justement, à l'apparition des formes, est ainsi d'abord motivé par un certain émerveillement mais il espère bien, par son travail, approfondir ses connaissances et mieux comprendre, *in fine*, les mécanismes de la nature.

## La forme des objets à l'équilibre

Un fil électrique entre deux poteaux, une goutte d'eau sur une table... voilà des cas que les physiciens comprennent bien car ils suivent une loi physique simple : les formes à l'équilibre correspondent à une énergie minimale. Prenons un premier exemple : une chaînette formée de maillons articulés. Si l'on tient cette chaînette par une extrémité, la force de gravité tire chacun des maillons vers le bas. Ces derniers viennent se placer le plus loin possible de l'extrémité fixe et le plus bas possible : la chaînette prend une forme très simple, un segment de droite vertical. Le système se trouve dans l'état d'énergie le plus faible possible – tout déplacement d'un maillon, forcément vers le haut, coûterait de l'énergie. Aucun mouvement ne peut se faire spontanément et le système est dit « à l'équilibre ». La droite est ainsi la forme qui

minimise l'énergie de gravité compte tenu d'une contrainte : avoir une extrémité fixe. Si, maintenant, nous tenons un bout de la chaînette dans chaque main, elle prendra une forme courbe qui correspondra là encore à une énergie minimale sous l'action de la gravité. Cette forme se calcule et correspond mathématiquement à une fonction appelée « cosinus hyperbolique ». Tout le monde a déjà rencontré un cosinus hyperbolique sur le bord d'une route puisque c'est la forme que prennent les fils électriques entre deux poteaux.



Formes en labyrinthe. (a) Labyrinthe formé entre deux plaques transparentes par un liquide magnétique (en noir) placé dans un champ magnétique perpendiculaire aux plaques. (b) Détail d'une tête de corail cerveau (*Diploria labyrinthiformis*).  
© Patrick Jean, Muséum d'histoire naturelle de Nantes

Intéressons-nous maintenant non plus à des lignes mais à des surfaces à l'équilibre : observons par exemple une petite goutte de rosée. Elle est sphérique. Pourquoi ? Cette goutte est constituée de MOLÉCULES d'eau qui s'attirent entre elles et se rapprochent donc le plus près possible les unes des autres. La goutte prend alors une forme sphérique, qui est celle présentant le minimum de surface pour un volume donné. Si on la déforme, l'élargissement de la surface augmente le nombre de molécules à la surface. Celles-ci comptant moins de voisines que les molécules de l'intérieur, l'énergie d'interaction s'élève. La forme sphérique correspond donc bien à un minimum d'énergie. On peut invoquer un phénomène similaire de minimisation de l'énergie pour expliquer l'allure compacte des colonies de manchots empereurs sur la banquise. Ces animaux minimisent ainsi une énergie particulière : la chaleur. Toute déformation de la colonie se traduira par des pertes thermiques supplémentaires car les manchots stationnant au bord du groupe, qui perdent plus d'énergie que les autres, seront plus nombreux. Mais revenons à nos gouttes d'eau. Si nous en observons maintenant d'un peu plus grosses, posées par exemple sur une toile cirée, la gravité va les aplatir et abaisser leur centre de gravité. Les plus grosses seront les plus aplaties et leur hauteur ne dépassera pas 2 à 3 mm. Cette forme aplatie peut encore se calculer car elle correspond à une énergie minimale, compromis entre l'énergie de surface (qui tend à donner des sphères) et l'énergie de gravité (qui tend à former des flaques).

Les membranes de savon sont elles aussi des systèmes d'énergie minimale qui permettent d'observer de belles formes simples. Si l'on plonge une boucle de fil de fer quelconque dans une solution d'eau

savonneuse et qu'on la ressort, la membrane de savon qui s'y sera accrochée aura la surface la plus petite possible. Il faudrait apporter de l'énergie pour la déformer. Ces surfaces dites « minimales » ont toujours fasciné les mathématiciens, car elles sont souvent bien difficiles à obtenir par le calcul alors qu'un enfant les construit en un tour de main !

Les formes d'équilibre issues de ce principe physique d'énergie minimale peuvent aussi devenir plus complexes. C'est par exemple ce que l'on observe sur la figure (a, page précédente), où un aimant est approché d'un liquide ayant des propriétés magnétiques. C'est la somme d'une énergie de surface et d'une énergie magnétique qui est minimisée, conduisant à des formes en labyrinthe avec des bandes parallèles de fluide magnétique d'épaisseur à peu près constante, de l'ordre de l'épaisseur entre les plaques. Des figures « labyrinthiques » de ce type sont observées dans la nature, chez certaines espèces de corail par exemple (b, page précédente).

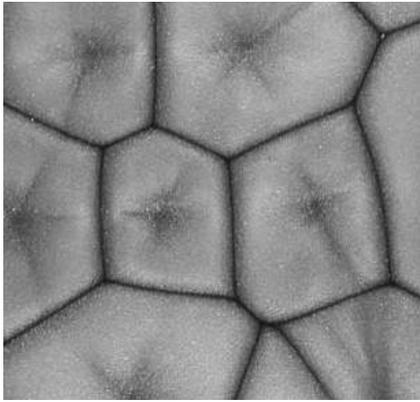
Un grand nombre d'autres formes naturelles ou artificielles répondent à une telle règle de minimisation de l'énergie. Elles correspondent à ce que l'on appelle des « états d'équilibre » car elles sont dans un état stable, elles n'évoluent plus. Le plus souvent, il s'agit de formes statiques, inertes et non vivantes, en opposition avec le monde vivant où règnent le mouvement, la croissance et donc un état de déséquilibre permanent.

## Formes hors d'équilibre et instabilités

Les formes que l'on rencontre dans la nature ne s'expliquent pas toujours par un principe d'énergie minimale. Il existe des formes en

mouvement, en croissance, qui ont accès à une source d'énergie et la consomment pour se développer ou, simplement, survivre. On parle alors en physique de « systèmes dissipatifs » ou de « systèmes hors d'équilibre ». C'est le cas bien sûr des organismes vivants, mais aussi de nombreux systèmes physiques qui génèrent des formes par un mécanisme de déstabilisation que les physiciens préfèrent appeler « mécanisme d'instabilité ». Par exemple, en faisant varier la température ou la valeur d'un champ magnétique, une forme initialement stable peut disparaître au profit d'une nouvelle, en général plus complexe. Lorsqu'on durcit les contraintes, les systèmes ont tendance, même en physique, à évoluer vers des formes plus complexes qui ont perdu certaines de leurs symétries premières. Illustrons ce propos par un premier exemple pris dans le domaine des écoulements des FLUIDES, l'instabilité de convection thermique.

Lorsqu'on chauffe le fond d'un récipient contenant un liquide, la chaleur est transportée du bas vers le haut par conduction thermique, au début sans mouvement du liquide. Mais dès que la différence de température devient supérieure à une certaine valeur – que l'on nomme « seuil de l'instabilité » –, un mouvement apparaît. En pratique, il suffit d'augmenter la différence de température pour observer des mouvements du fluide et des structurations. En effet, le fluide du bas, étant chauffé, se dilate, devient moins dense et monte. En arrivant en surface, il s'étale et repousse le liquide en place, plus froid et plus dense, qui descend alors vers le fond. Il se forme ainsi des circulations locales, que l'on appelle « cellules de convection », à peu près de la taille de l'épaisseur de la couche de fluide. Il est aisé de réaliser cette expérience en



a



b

Motifs cellulaires. (a) Vue de dessus de cellules de convection dans de l'huile chauffée par le bas etensemencée par de la poudre d'aluminium. Les lignes sombres correspondent à des plans verticaux assez minces le long desquels le fluide redescend vers le fond et révèlent la forme polygonale des cellules. (b) Motif similaire en cellules polygonales sur la robe d'une girafe. © D. Pol

versant quelques millimètres d'huile dans un récipient à fond plat lui-même posé dans quelques centimètres d'une eau plus chaude de quelques degrés. Afin de bien observer les mouvements de l'huile, on peut y disposer de petites particules, par exemple du poivre en poudre : de très jolies structures se forment alors en quelques minutes (a, ci-dessus). Les cellules de convection observées sont en moyenne hexagonales car elles ont six voisines, mais de nombreux défauts et irrégularités apparaissent en général : les symétries et l'ordre ne sont pas parfaits. Un mécanisme de convection thermique similaire a lieu dans l'atmosphère où il est mis en évidence par des nuages particuliers, les cumulus. Notons que si l'on refait l'expérience de convection, mais cette fois avec une paroi supérieure, par exemple une plaque de verre, ce ne sont plus des cellules hexagonales qui apparaissent mais des rouleaux parallèles, que l'on appelle « rouleaux de convection », qui donnent des motifs en bandes.

### Classer les formes ?

À ce jour, on est bien loin de connaître tous les mécanismes qui expliquent et sélectionnent les formes observables dans la nature. Dès

lors, comment progresser ? L'idée la plus simple est de classer les formes selon divers critères afin d'essayer de dégager certaines analogies. Dans le tableau page suivante, on a par exemple défini quatre catégories, selon que les motifs observés sont en bandes, en cellules, en spirale ou en forme d'arbre, dans lesquelles on peut facilement regrouper les formes venues du monde de la physique – le monde inanimé –, du monde végétal et du monde animal (tableau page suivante).

Le fait d'être dans la même colonne implique-t-il obligatoirement que les mécanismes d'apparition ou de croissance de ces diverses formes soient les mêmes ? Non, pas forcément, mais ce classement peut suggérer des descriptions communes qui à leur tour pourront donner des idées sur les mécanismes physiques minimaux, c'est-à-dire les plus simples possibles, à la fois nécessaires et suffisants, pour reproduire l'apparition de telle ou telle forme.

Illustrons ces propos par quelques exemples concrets issus de ces quatre catégories de formes.

### Motifs en bandes ou labyrinthiques

On peut facilement observer des structures en bandes : sur le pelage d'animaux (tigres, zèbres), sur certains poissons tropicaux

	Motif en bandes	Motifs cellulaires	Motifs spiralés	Motifs hiérarchiques
Monde de la physique	Rides sur une plage à marée basse, convection thermique entre plaques chauffées, fluides magnétiques	Convection thermique avec une surface libre, mousse de savon, fractures d'un émail ou de la boue séchée, pavage de Voronoy	Tourbillons entre disques, galaxies spirales	Réseau hydrographique d'un fleuve, dendrites cristallines (flocons de neige ou givre sur une vitre), figures d'infiltration dans du calcaire, simulation numérique d'agrégation
Monde végétal	Pommes desséchées, coquilles de noix	Nervation des feuilles	Pommes de pin, fleurs de tournesol	Arbres, certaines algues ( <i>Fucus vesiculosus</i> )
Monde animal	Robe du zèbre, corail, cerveau, empreintes digitales, poissons coralliens	Ailes de la libellule, nid d'abeille, robe de la girafe, taches du guépard, carapace de la tortue	Ammonites, coquillages, escargots	Bronches et alvéoles pulmonaires, dendrites neuronales, réseau vasculaire

(poissons-anges), sur les petites rides de sable laissées sur une plage à marée basse, dans certaines structurations de nuages, ou dans des expériences de convection thermique entre deux plaques (photo ci-contre). Ces réseaux peuvent être très réguliers (formés de bandes parallèles de même largeur) ou plus ou moins désordonnés, avec, ou non, des reconnections. Plusieurs mécanismes peuvent être évoqués pour expliquer ce genre de structure. C'est le mathématicien

anglais Alan Turing qui montra le premier que de tels motifs pouvaient apparaître dans des réactions chimiques (voir « Les motifs de Turing »). Certains chercheurs pensent que ce type de réactions chimiques pourrait avoir lieu à un stade de la croissance des zèbres et des poissons coralliens par exemple, ce qui induirait ensuite la présence d'une plus ou moins grande quantité de mélanine en des zones particulières de la peau et donc des couleurs différentes.



### Les motifs de Turing

Alan Turing est resté célèbre pour avoir percé les codes secrets de l'armée allemande pendant la Seconde Guerre mondiale et avoir été le fondateur de l'informatique. Il publia aussi, en 1952, un article sur « les bases chimiques de la morphogenèse » qui se révéla crucial pour la compréhension des motifs en biologie.

L'idée de départ était d'imaginer une première espèce chimique, notée N par exemple, fabriquée par une réaction dite « autocatalytique » : plus il y a de N quelque part, plus il y est facile de former du N. Mais cette espèce N fabrique aussi une seconde espèce B dite « inhibitrice » : la présence de B gêne la fabrication de N. De plus, on suppose que les espèces N et B se dispersent, ou diffusent, dans le matériau mais que B diffuse plus vite que N. Examinons les conséquences de ces hypothèses. Si, localement, la fabrication de N commence, il va se créer un pic de concentration très riche en N. À cause de la diffusion rapide de B, une zone riche en B va apparaître autour de ce premier pic, ce qui aura pour conséquence de bloquer l'étalement de N : un autre pic de N ne pourra se développer qu'à une distance minimum du premier. Tout se passe comme s'il existait un effet de répulsion entre les différents pics de N, lesquels se trouvent séparés par un réseau de lignes riches en B. Il suffit ensuite d'imaginer que N soit noire et B blanche pour créer de très beaux motifs qui formeront, selon les cas, des bandes, des cellules ou des pois.

Comme les êtres vivants, les motifs de Turing meurent par diffusion s'ils ne sont pas alimentés : ce sont des structures dissipatives et non des structures à l'équilibre qui pourraient minimiser leur énergie.



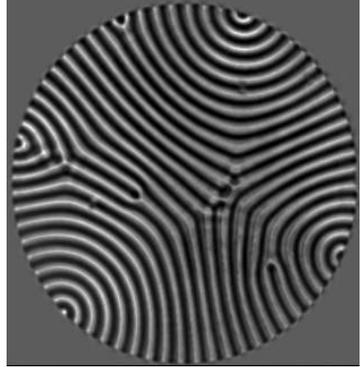
a



b



c



d

Motifs en bandes. (a) Robe d'un zèbre © D. Pol (b) Rides sur la plage laissées à marée basse par le mouvement de va-et-vient des vagues. © Y. Bertho (c) Poisson-ange (*Pomacanthus imperator*) © Club subaquatique du CERN. (d) Rouleaux de convection thermique entre deux plaques. © G.Ahlers

Pour voir à l'œuvre un autre mécanisme de formation de bandes, il suffit de regarder les empreintes digitales au bout de nos doigts. Ces structures se forment semble-t-il pendant les premiers mois d'existence de l'embryon alors que l'épiderme des futurs doigts présente une surface trop importante par rapport au volume. Cela se traduit par un plissement de la peau, comme après un bain prolongé quand, la peau des doigts s'hydratant, elle voit

sa surface augmenter alors que le volume des doigts n'est pas modifié. Ce qui compte, c'est l'augmentation de la surface par rapport au volume, ou bien la diminution du volume par rapport à la surface, comme lorsqu'une pomme se ride avec le temps (son volume diminue par évaporation progressive alors que sa surface reste d'aire constante). Ces différentes formes « ridées » sont générées par une même instabilité de compression

### L'instabilité de flambage

Prenez une règle souple en plastique et posez-la verticalement sur une table tout en exerçant une légère pression sur son extrémité supérieure. La règle prend tout d'abord une forme simple – la droite – qui minimise son énergie élastique. Si, maintenant, vous augmentez progressivement la pression verticale, vient un moment où la règle se courbe d'un côté, par exemple à droite. Vous venez d'observer une instabilité qui brise la symétrie entre la gauche et la droite. La règle s'est déformée d'un côté particulier, soit à cause d'une légère courbure initiale de la règle, soit parce que, sans le vouloir, vous n'avez pas appuyé tout à fait verticalement. La nouvelle forme correspond toutefois toujours à une minimisation de l'énergie entre l'énergie de flexion et l'énergie de compression de la règle, et le nouvel état est toujours un état d'équilibre, sans mouvement. Cette instabilité de flambage est bien connue des architectes, qui souhaitent en général l'éviter lorsqu'ils construisent un pilier de soutien ! Si vous répétez l'expérience avec une lame métallique souple placée entre deux parois proches, il est possible, en augmentant la compression, d'observer plusieurs oscillations conduisant à une série de plissements. C'est par une technique similaire qu'une couturière modifie la forme d'un rideau ou d'une robe en créant des fronces.

dite de « flambage ». L'opération inverse, où le volume augmente plus vite que la surface, conduit à des tensions de surface et donc à des fractures (nous en reparlerons un peu plus loin), comme pour les gerçures des mains en hiver ou les prunes trop mûres en été !

Des chercheurs américains ont récemment montré que l'instabilité de flambage est aussi à l'origine de la forme ondulée du bord des feuilles de certaines plantes comme la salade. Lorsque les cellules végétales du bord de la feuille se multiplient plus vite que celles du centre, la bordure se trouve en compression et prend une forme ondulée. En injectant une hormone de croissance sur les bords de certaines feuilles plates, on peut les faire onduler !

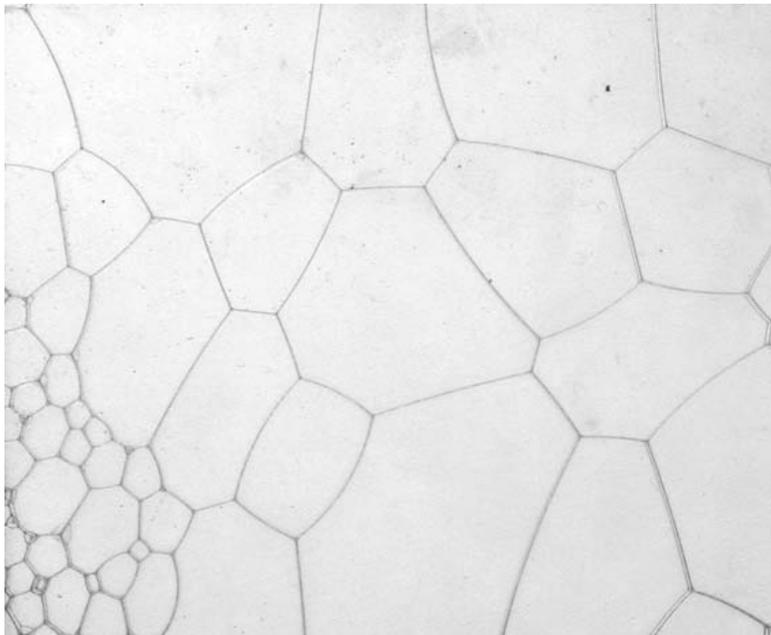
### **Motifs cellulaires ou à pois**

Les structures que nous qualifierons de « cellulaires » correspondent à des domaines adjacents qui recouvrent une surface ou remplissent un volume sans y laisser de trous. Nous avons vu un premier exemple dans la convection thermique avec surface

libre mais l'on peut aussi penser à la carapace de la tortue, à la robe de la girafe ou à une vue au microscope des cellules de l'épiderme. Les décrire suppose de décrire les propriétés des frontières entre les cellules. Dans une mousse par exemple, que cela soit dans un verre de bière ou dans un bain moussant, les parois liquides entre les bulles d'air se rencontrent le long des arêtes. Ces arêtes, à leur tour, se rencontrent trois par trois en faisant des angles égaux ( $120^\circ$ ), et ce, même si les bulles n'ont pas toutes la même taille (photo ci-dessous).

C'est là une conséquence de la règle de minimisation de l'énergie de surface déjà évoquée. Cette même contrainte de surface minimale explique aussi que les abeilles fabriquent des alvéoles hexagonales, mais ce n'est qu'en 1999 que le mathématicien américain Thomas Hales a pu démontrer que « le plus court réseau de frontières délimitant des régions planes d'aires égales est le pavage en hexagones réguliers ». Notons toutefois que lorsque la règle de minimisation du périmètre des frontières est plus souple et

autorise quelques défauts (l'on n'est plus alors tout à fait dans un cas d'énergie minimale), comme dans le cas de la convection thermique avec surface libre, on observe des réseaux cellulaires irréguliers : ce n'est qu'en moyenne qu'une cellule a six voisines. Comment pousser plus loin la description de ces formes ? Le mathématicien russe

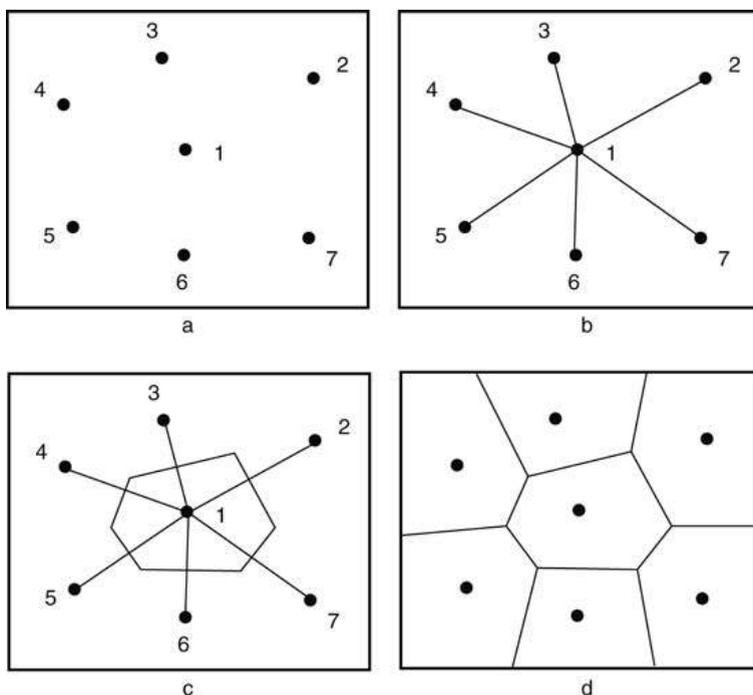


Bulles de savon confinées entre deux plaques transparentes. Des bulles d'air de différentes tailles sont délimitées par des membranes d'eau savonneuse qui se raccordent à  $120^\circ$ .



## Les réseaux de Voronoy

Prenez un crayon, une règle et une feuille de papier et dessinez au hasard une dizaine de « taches » (a). Il s'agit maintenant de réaliser un pavage en délimitant les régions de la feuille qui sont plus près d'une tache donnée que des autres. Pour ce faire, on pourrait faire grossir les taches toutes en même temps, comme des ballons, jusqu'à ce que leurs frontières se rencontrent, mais il y a plus simple. Sélectionnez l'une des taches et tracez les segments qui la relie à ses plus proches voisins (b). Tracez ensuite la médiatrice de chacun de ces segments – la droite perpendiculaire passant par le centre du segment (c). L'ensemble de ces médiatrices délimite un polygone autour de votre tache d'origine : vous avez dessiné votre première cellule de Voronoy. À l'intérieur de ce polygone, tout point est par construction plus près de la tache centrale que de n'importe quelle autre. En recommençant la procédure pour chacune des taches du plan, vous réaliserez un pavage du plan appelé « réseau de Voronoy » et les frontières de ces polygones ressembleront beaucoup à la robe d'une girafe ou à des cellules de convection (d). Des programmes numériques permettent de tracer automatiquement et rapidement de tels réseaux (voir « Sur la Toile ») et de vérifier qu'en moyenne, chaque cellule a six voisins.



Georgy Fedoseevich Voronoy a montré au XIX<sup>e</sup> siècle que l'on pouvait construire des formes cellulaires à partir d'un ensemble de points disposés aléatoirement sur une feuille de papier (voir ci-dessus). Il apparaît dès lors que les motifs « à pois » appartiennent à la même catégorie que les motifs cellulaires car on peut, au moins par la force d'une expérience de pensée, passer de l'un à l'autre, c'est-à-dire transformer le pelage d'un guépard en celui d'une girafe et *vice versa* ! En effet, si, en partant

des taches du guépard, on les fait grossir jusqu'à ce qu'elles se rencontrent, le réseau des frontières entre taches prendra l'apparence d'un motif cellulaire qui ressemblera à la robe de la girafe.

Toutefois, il existe des motifs cellulaires dans lesquels chaque cellule a plutôt quatre voisines en moyenne que six : ce sont alors des quadrilatères irréguliers. On peut en voir par exemple dans les réseaux de fractures de vitres fissurées, dans les flaques de boue



## Des fractures dans la Maïzena

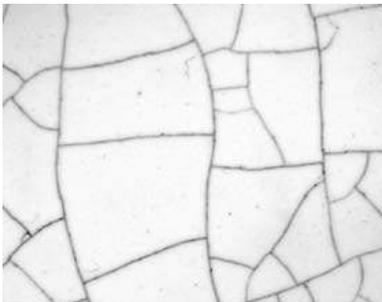
- Mélangez quelques cuillerées de farine de maïs (Maïzena) avec un peu d'eau jusqu'à en faire une pâte assez épaisse. Disposez cette pâte dans un récipient à fond plat en une couche de quelques millimètres d'épaisseur, puis laissez sécher une nuit au sec. Au matin, vous devriez observer un très beau réseau de fractures. La taille caractéristique des cellules finales sera de l'ordre de l'épaisseur de la couche de farine, ce que vous pourrez vérifier en répétant l'expérience avec un récipient légèrement incliné : les cellules les plus grandes se développeront là où la couche sera la plus épaisse.

ou dans de la Maïzena séchée (voir « Des fractures dans la Maïzena » et *b* ci-dessous). On y observe bien des cellules fermées délimitées par des parois à peu près linéaires mais, contrairement à ce que nous avons vu pour les réseaux cellulaires, où les angles entre les arêtes étaient en moyenne de  $120^\circ$ , les angles entre fractures sont plutôt de  $90^\circ$ . Autre différence avec nos premiers motifs cellulaires, il existe une hiérarchie entre les fractures : il est possible d'en donner l'ordre d'apparition rien qu'en regardant l'image finale.

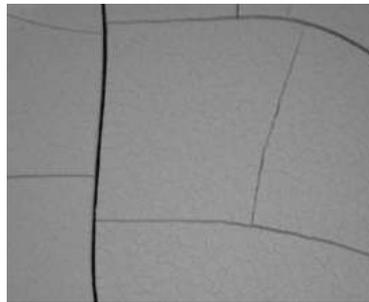
Faisons une expérience en laissant sécher une couche de Maïzena. On observe que les premières fractures naissent aux bords du système puis traversent tout

l'échantillon. Les bords de la fracture, en s'écartant légèrement, relâchent une partie des tensions qui existaient dans le matériau mais elles ne peuvent les relâcher toutes, en particulier celles qui sont parallèles à la fracture. Au fur et à mesure du séchage, les tensions à l'œuvre au sein du système augmentent et des fractures secondaires se développent. À cause de l'orientation des tensions résiduelles, ces fractures vont naturellement pousser perpendiculairement à celles de la première génération, et le mécanisme sera le même pour chacune des générations suivantes.

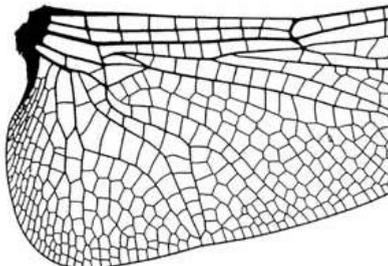
Ainsi, les réseaux à  $120^\circ$  correspondent plutôt à un développement local des cellules, de proche en proche, jusqu'à remplir le plan,



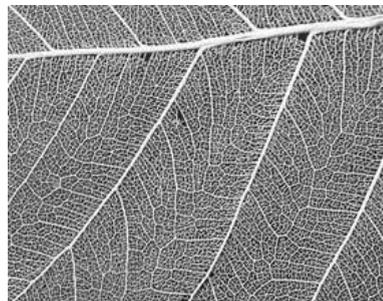
a



b



c



d

Motifs cellulaires. (a) Fractures à  $90^\circ$  dans une coupelle en porcelaine soumise au gel. (b) Fractures apparaissant par séchage d'une couche de Maïzena. (c) Détail d'une aile de libellule montrant à la fois des connexions à  $90^\circ$  pour les nervures principales et quelques connexions à  $120^\circ$ . © F.Meurgey, Museum de Nantes (d) Nervation d'une feuille de peuplier.

alors que les réseaux à  $90^\circ$  correspondent plutôt à une division progressive de la surface en cellules de plus en plus petites. Leur évolution dans le temps est donc différente. Les motifs à  $120^\circ$  sont plutôt caractérisés par des règles de minimisation du périmètre des frontières alors que les motifs à  $90^\circ$  ont des directions de propagation perpendiculaires aux directions d'étirement ou de compression maximale.

Des réseaux similaires aux réseaux de fractures peuvent se rencontrer dans le monde vivant, par exemple dans les nervures d'une feuille ou dans les ailes d'une libellule (*c*). Une feuille de peuplier (*d*) présente une hiérarchie de tubes de différents diamètres, les nervures, qui permettent le transport du liquide nutritif. Ces tubes se coupent approximativement à angle droit. On cherche actuellement à expliquer cette ressemblance avec les réseaux de fractures en essayant de mettre en évidence des contraintes mécaniques qui influeraient sur la formation de ces nervures lors du développement de la feuille. Pour les ailes de la libellule, les motifs observés sont souvent un peu plus complexes. Quoi qu'il en soit, ces deux types de réseaux cellulaires, fortement interconnectés, offrent l'avantage de permettre une alimentation efficace et sûre en fluide biologique, et cela même si une branche est accidentellement bouchée, et ils assurent de plus une rigidité mécanique vitale pour la plante comme pour la libellule. On retrouve d'ailleurs ces mêmes propriétés de forte interconnexion et de résistance à la défaillance d'un tronçon dans de nombreux réseaux construits par l'homme (réseau de distribution d'eau, réseaux électriques ou réseau routier). De telles structures apparaissent logiquement par croissance progressive des besoins, sans

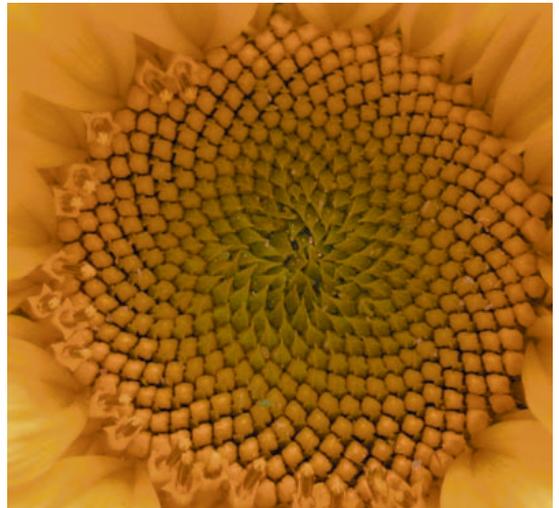
qu'un plan d'ensemble ou qu'une volonté de reproduire la nature existent forcément au départ.

## Motifs spiralés

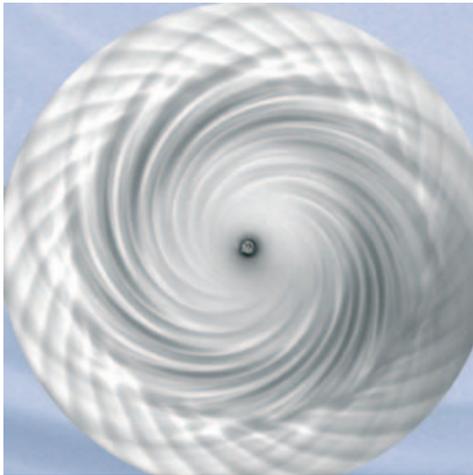
Poursuivons notre tour d'horizon et observons quelques formes issues de la croissance animale. Prenons par exemple un fossile, l'ammonite (*a*, page suivante). Sa coquille, en s'enroulant plusieurs fois sur elle-même, présente une propriété géométrique intrigante : elle dessine une spirale mathématiquement parfaite, appelée « spirale équiangle » (car elle présente en tout point le même angle avec une droite passant par le centre) ou « spirale logarithmique » (car l'angle d'enroulement varie avec la distance au centre selon cette fonction mathématique). Mais comment cet animal disparu parvenait-il à construire une spirale parfaite ? La réponse, qui fut longtemps débattue, est finalement assez simple. Chaque année, l'animal, en grossissant, a besoin d'augmenter son espace vital et élabore, adjacente à sa cellule, une nouvelle cellule dont le volume est de quelques pourcents supérieur au volume de la précédente (+ 12 % sur la photo). Une solution pour n'avoir à construire que trois des quatre murs de sa nouvelle cellule consiste pour lui à s'appuyer sur les cellules précédentes en s'enroulant progressivement sur lui-même. Selon ces règles, si les cellules restent dans un plan, le mollusque fabrique obligatoirement une belle spirale équiangle. On peut de la même façon construire une telle spirale en enroulant sur lui-même et dans un plan un rouleau de pâte à modeler légèrement conique. Si l'enroulement sort du plan, c'est cette fois une jolie coquille d'escargot que l'on aura. Expliquer pourquoi, selon les



a



b



c

Motifs spirales. (a) Spirale équiangle d'un fossile d'ammonite s'enroulant plus de six fois sur elle-même. (b) Double réseau de spirales dans l'ordonnement des fleurons d'une fleur de tournesol. (c) Tourbillons en spirale dans un écoulement entre deux disques en contre-rotation.

espèces, l'enroulement tridimensionnel de la coquille se fait à droite ou à gauche est un autre problème qui reste largement non résolu à l'heure actuelle.

On rencontre aussi très souvent des spirales en botanique, que ce soit sur une fleur de tournesol (b), une pomme de pin ou un ananas. Pourquoi ? Pour ces plantes, la croissance s'organise à partir d'une zone centrale appelée MÉRISTÈME où a lieu la division cellulaire. Une fois créées, les cellules sont à la fois progressivement repoussées vers la périphérie et se repoussent entre elles. Ce domaine de la botanique qui s'attache à la disposition des feuilles – il porte le nom

de PHYLLOTAXIE – existe depuis longtemps mais la compréhension de ce phénomène a fait de grands progrès ces dernières années, en particulier pour expliquer le nombre de bras spiraux observés. Il a été démontré que c'est la combinaison entre le rythme de croissance et la répulsion entre cellules qui contrôle la disposition en spirale des éléments.

Des spirales peuvent aussi être observées en physique lorsqu'une rotation et un mouvement centrifuge (vers l'extérieur) se combinent, comme, par exemple, dans l'écoulement d'un fluide placé entre deux disques tournant en sens opposés (c).

## Motifs en forme d'arbre ou hiérarchiques

Nous arrivons maintenant à la quatrième et dernière catégorie de notre classification, celle des formes ramifiées ou hiérarchiques, comme les branches d'un arbre, les bronches et les bronchioles de nos poumons ou les DENDRITES de nos neurones. Ces motifs se caractérisent par le fait qu'il n'existe qu'un seul chemin pour aller d'un point à un autre, par exemple pour aller d'une feuille à une autre dans un arbre – il n'y a pas de chemin en boucle possible – et s'opposent en cela clairement aux motifs cellulaires d'un réseau de fractures par exemple. On peut aussi les qualifier de « structures ramifiées » (en forme de branche) ou de « structures dendritiques » (en forme d'arbre).

La plupart de ces structures hiérarchiques sont créées par une dynamique particulière de croissance qui, contrairement à ce que l'on a vu dans les cas précédents, fait apparaître une forme de répulsion entre les branches qui empêche toute reconnexion. Pour illustrer ce

phénomène, commençons par un exemple issu de la physique : c'est l'instabilité dite de « digitation visqueuse », qui a été largement étudiée car elle limite l'efficacité des méthodes de récupération du pétrole dans les roches poreuses. En effet, l'exploitation des réservoirs naturels de pétrole s'arrête classiquement lorsque la surpression n'est plus suffisante pour faire remonter le pétrole brut, alors qu'il reste pourtant dans le gisement près de la moitié des réserves. L'idée est de mieux vider le réservoir en y injectant un fluide de remplacement, de l'eau, qui, comme un piston, devrait en principe repousser le pétrole. Il s'avère que ce n'est pas le cas : l'eau, moins visqueuse, va en réalité pénétrer et traverser le pétrole brut. On peut facilement observer une telle instabilité en injectant de l'air dans une couche d'huile placée entre deux plaques de verre. L'interface entre l'air et l'huile est toujours instable et prend des formes de plus en plus complexes. La figure *a* page 204 montre une superposition de photos successives de cette interface lorsque



### Le modèle DLA

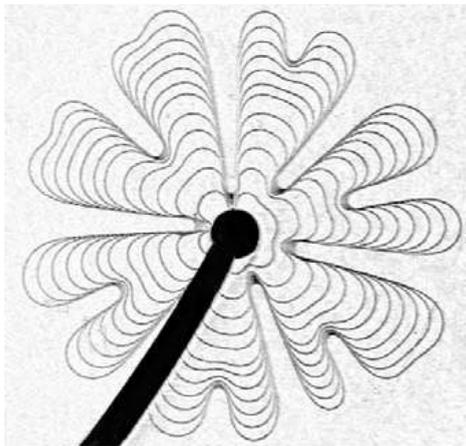
- À l'heure de l'informatique, il est intéressant de simuler des formes par ordinateur car il devient alors possible de tester toutes sortes de lois de croissance et de montrer que même des règles simples peuvent conduire à des formes très complexes. Le modèle informatique présenté ici permet de créer de très belles ramifications et de les étudier. Il a été imaginé en 1981 par deux physiciens de Chicago, Tom Witten et Len Sander, et porte le nom de DLA pour Diffusion-Limited Aggregation (Agrégation limitée par la diffusion).
- Le principe en est simple. On place tout d'abord une première particule en un point origine. Ensuite, une deuxième particule est lâchée dans le voisinage de la première et se déplace d'une distance égale à son diamètre dans une direction choisie au hasard à chaque intervalle de temps. On réalise ainsi ce que les physiciens appellent une « marche au hasard », et ce, jusqu'à ce que la deuxième particule vienne toucher la première et s'y colle. On lâche alors une troisième particule, puis une quatrième, une cinquième, etc. En poursuivant la même procédure, il se forme progressivement un ensemble de particules immobiles, appelé « agrégat », qui, en grossissant va prendre une forme caractéristique très ramifiée (c, page suivante).
- Les simulations sont faciles à réaliser sur ordinateur et des agrégats de plusieurs millions de particules ont ainsi été créés, dont on a pu étudier les propriétés. Une grande similitude avec l'instabilité de digitation visqueuse a notamment été observée. Ces structures ont des aspects AUTOSIMILAIRES (tout agrandissement de l'objet ressemble à l'objet lui-même), elles sont denses (beaucoup de sites sont occupés) mais pas compactes (il existe toujours des sites libres). On dit que ce sont des structures FRACTALES. Des sites Internet existent sur lesquels on voit pousser des agrégats en temps réel (voir « Sur la Toile »).

l'air est injecté à faible vitesse à partir du centre. Au fur et à mesure de la croissance, des zones d'air en forme de doigt – d'où le nom de « digitations » – se développent. Au cours de la croissance, les extrémités de ces doigts se divisent, forment de nouveaux doigts et le processus se répète indéfiniment. Les zones d'huile piégées entre les doigts d'air sont, elles, pratiquement immobiles. Si l'on poursuit assez longtemps la croissance, ou si l'on injecte l'air à haute vitesse, on peut obtenir des structures extrêmement ramifiées qui ressemblent fortement à certaines infiltrations fossiles observées dans des roches sédimentaires (*b* ci-dessous) ou au dessin d'un réseau veineux ou artériel humain.

De tels motifs peuvent être reproduits par des règles simples que l'on simule par

ordinateur (voir « Le modèle DLA »). Que nous apportent de telles simulations ? Elles nous permettent de tester aisément l'effet des lois de croissance et d'en étudier l'impact sur les formes obtenues. Le modèle DLA a ainsi permis de démontrer que des lois de croissance extrêmement simplifiées et locales peuvent déjà donner des formes complexes. En compliquant un peu les lois de croissance, on peut aussi faire pousser différentes espèces de « fleurs » ou d'« arbres » sur nos écrans. Or, savoir reproduire des formes naturelles par des règles simples facilite le travail du chercheur : celui-ci peut alors essayer de mettre en évidence les mécanismes physiques essentiels qui imposent ces diverses lois de croissance.

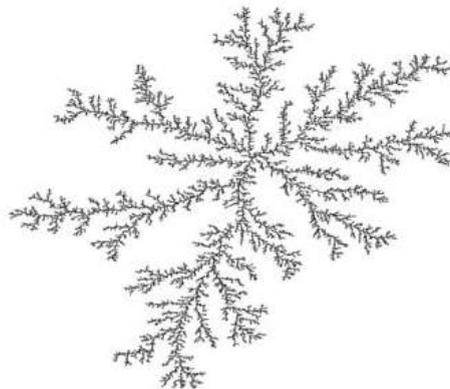
Dans le cas de la digitation visqueuse, les lois qui commandent l'écoulement des fluides nous disent que la croissance est gouvernée par le champ de pression qui règne dans l'huile juste devant sa frontière avec l'air que l'on appelle l'interface. Si l'on connaît le débit d'injection et la forme de l'interface à un instant donné, on sait parfaitement calculer la forme que prendra cette dernière à l'instant suivant. Les variations de pression sont plus fortes à l'avant des doigts d'air – c'est ce que l'on appelle un « effet de pointe », comme en électrostatique



a



b



c

Structures hiérarchiques. (a) Digitations se développant entre deux plaques de verre par injection d'air dans de l'huile à partir du centre.

© Y. Couder (b) Dépôt minéral sur une surface de calcaire. (c) Agrégat d'un million de particules obtenu par simulation DLA.

– et la vitesse de déplacement est alors bien plus grande aux pointes qu’ailleurs, ce qui amplifie petit à petit les déformations de l’interface et explique la ramification et la complexification progressives de la forme.

Existe-t-il un même mécanisme physique pour expliquer les diverses formes de croissance hiérarchique ? Qu’il s’agisse de la digitation visqueuse ou d’un arbre, l’objet grandit par transport de matière par l’intérieur, à travers le tronc pour l’arbre. Dans le cas du modèle DLA, les particules arrivent de l’extérieur. Cette différence apparente ne semble pas avoir d’influence sur la forme des structures : le facteur dominant s’agissant de la croissance de l’objet est l’environnement extérieur. Pour la digitation visqueuse, l’environnement extérieur est contrôlé par la pression, pour l’arbre par l’ensoleillement et la température, pour la simulation DLA par la probabilité de présence des particules. Dans les trois cas, ces quantités sont gouvernées par le même type d’équations. Des motifs similaires ont pu être réalisés en faisant se développer des colonies de bactéries sur une surface plus ou moins dure.

Il existe actuellement en biologie de nombreuses études destinées à comprendre les mécanismes qui contrôlent le développement des réseaux vasculaires embryonnaires et, en particulier, à déterminer quel champ externe commande leur croissance. Ces mécanismes une fois identifiés, il sera peut-être possible de contrôler ces phénomènes et donc de revasculariser certaines parties du corps ou, au contraire, de bloquer l’alimentation d’une autre, par exemple d’une tumeur.

## Conclusion

Les formes actuelles du vivant sont la conséquence d’un long processus d’évolution qui, au hasard des mutations puis par sélection naturelle, a peu à peu retenu certains caractères. Ce processus évolutif correspond à des échelles de temps très longues, supérieures au million d’années. On peut parfois justifier ces formes *a posteriori* par des critères d’utilité ou d’efficacité. Ce n’était toutefois pas l’objet de ce texte où nous avons plutôt choisi de décrire l’évolution de la forme d’« individus » particuliers. Dans le monde biologique, la forme est certes l’expression d’un certain codage présent dans les gènes – un zèbre enfante bien un zèbre –, et elle est donc liée à l’évolution, mais la forme de chaque individu est aussi le fruit des divers mécanismes physiques intervenus dans son développement. Ce constat va un peu à l’encontre des idées reçues : on a tendance aujourd’hui à tout vouloir expliquer par des causes biologiques en oubliant que ces dernières sont aussi conditionnées par les lois de la chimie ou de la physique. Un des aspects fascinants de l’étude de l’origine des formes est donc la confrontation permanente entre les visions biologiques et physiques du monde.

Ce petit voyage au pays des formes nous a aussi montré qu’il était possible de développer une classification des formes, que ces dernières proviennent du monde animé ou du monde inanimé, ce qui permet de s’interroger sur les similitudes et les différences perceptibles dans leurs mécanismes d’apparition. L’étude de la morphogenèse est un vaste domaine de recherche encore balbutiant, puisque de très nombreux mécanismes, biologiques et physiques, restent encore à découvrir.

## Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

### La morphogenèse peut-elle être uniquement abordée du point de vue de la physique ?

Non bien sûr, ce sujet exige une approche pluridisciplinaire. La réponse que l'on entend parfois – « c'est génétique » – à la question difficile de l'origine des formes du vivant, ne suffit bien évidemment pas pour pouvoir comparer ou comprendre les mécanismes impliqués dans les formes que nous observons autour de nous. Les mathématiques, la physique, la biologie, la botanique ou la géologie sont des sciences qui clairement, peuvent toutes apporter des exemples et des éclairages différents au problème de l'origine des formes pourvu qu'on y ajoute une bonne dose de curiosité. Dans cet article j'ai volontairement insisté sur l'approche « Physique » car d'une part je suis physicien et c'est donc celle que je connais le mieux, et d'autre part parce que ces formes se développant dans notre monde réel elles doivent aussi se plier aux lois de la physique lors de leur apparition. Une description qui ne s'appuierait que sur une seule discipline ne serait jamais complète.

### Bibliographie

« L'origine des formes », *La Recherche*, n° 305, janvier 1998. Une série d'articles aux thématiques très diverses (de l'architecture navale à la musique) sur les formes et leurs origines.

« Les formes de la vie », *Pour la science*, n° 44, juillet 2004. Un excellent ensemble d'articles qui complète avantageusement le présent texte.

Stéphane DOUADY et Yves COUDER, « La physique des spirales végétales », *La Recherche*, n° 250, janvier 1993, p. 26-35. Un article décrivant les bases physiques de la phyllotaxie.

*Les Sciences de la forme aujourd'hui*, éd. du Seuil, coll. « Point Sciences », 1994. Un livre d'entretiens avec des spécialistes venus d'horizons variés.

D'Arcy THOMPSON, *On Growth and Form*, Cambridge University Press, 1917 ; version abrégée par John TYLER BONNER, *Forme et Croissance*, éd. du Seuil, coll. « Sources du

savoir », 1994. La « bible » du domaine de la morphogenèse, par le premier chercheur à s'être intéressé aux formes du vivant.

*Graines de sciences 3*, sous la direction de David JASMIN, Jean-Marie BOUCHARD et Pierre LÉNA, « Bulles, gouttes et perles liquides » (chapitre de David QUÉRÉ), Le Pommier, 2001.

### Sur la Toile

Simulation DLA

<http://apricot.polyu.edu.hk/~lam/dla/dla.html> ou <http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/STChaos/SH.html>

Phyllotaxie :

<http://tpe.tournesol.free.fr/tournesol.htm>

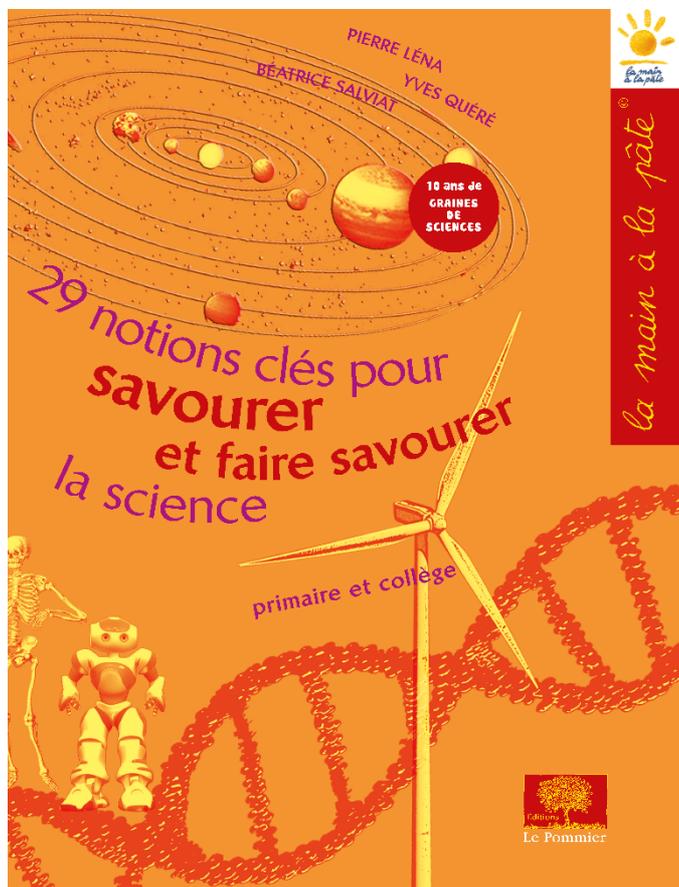
Un excellent site créé par des lycéens. Un modèle du genre, à voir absolument !

Pavage de Voronoy :

<http://www.cs.cornell.edu/Info/People/chew/Delaunay.html>

Pour tracer par ordinateur différents pavages (en anglais).

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



## Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



### Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes  
75006 Paris  
01 85 08 71 79  
contact@fondation-lamap.org

Site : [www.fondation-lamap.org](http://www.fondation-lamap.org)

 FONDATION  
**La main à la pâte**  
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE