

Auteurs : Travail collectif(plus d'infos)

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 coeur ? 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... Document de Marc Rabaud issu de l'ouvrage "29 notions clefs pour savourer et faire savourer la science - primaire et collège", paru aux éditions Le Pommier en août 2009.

Copyright : Creative Commons France. Certains droits réservés.



La génèse des formes

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 coeur ? 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

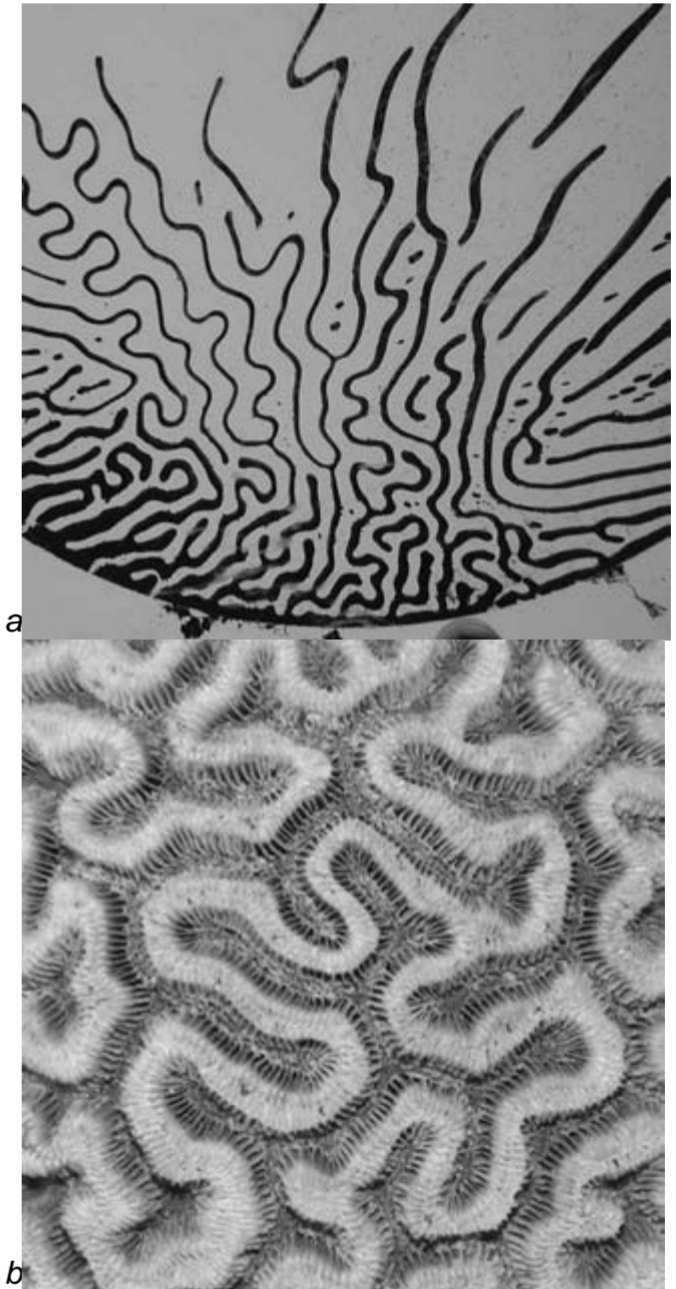
Un fil électrique entre deux poteaux, une goutte d'eau sur une table... voilà des cas que les physiciens comprennent bien car ils suivent une loi physique simple : les formes à l'équilibre correspondent à une énergie minimale. Prenons un premier exemple : une chaînette formée de maillons articulés. Si 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.

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), 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).

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 en labyrinthe.

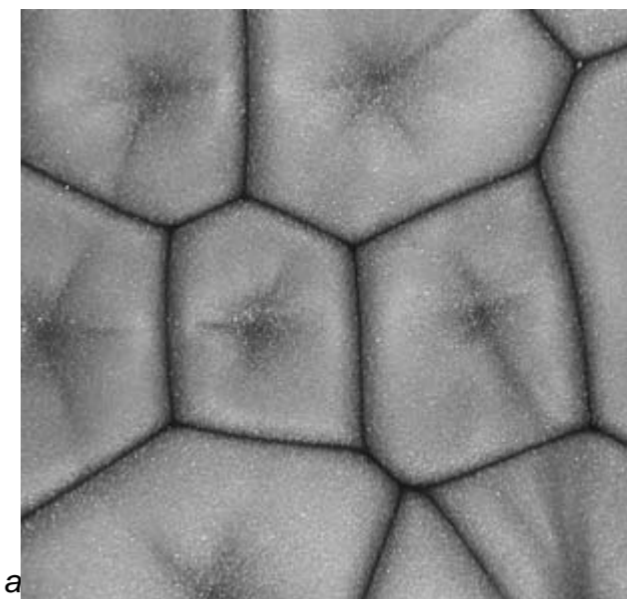
(a) Labyrinthe formé entre deux plaques transparentes par un liquide magnétique (en noir) placé dans un champ magnétique perpendiculaire aux plaques.

(b) Détail d'une tête de corail cerveau (*Diploria labyrinthiformis*).

© Patrick Jean, Muséum d'histoire naturelle de Nantes

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 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.



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*