

« **A** force de se tenir moitié dans l'ombre et moitié pas, et sous l'ombrage dansant, glissant et cabriolant des arbres, voilà que la Girafe devint tachetée, et le Zèbre rayé. » En 1902, l'écrivain britannique Rudyard Kipling contait en ces mots la formation des motifs pigmentaires qui habillent les animaux de la savane. Si cette magie de l'imaginaire ne reflète pas la réalité biologique, elle illustre une fascination universelle pour ces motifs naturels.

Répartition de la couleur, des poils ou des plumes, contours des antennes, cornes et becs, formes des empreintes digitales, dents et coquilles... Façonnés au fil de l'évolution, ces motifs sont en général vitaux pour les animaux. Depuis longtemps, les humains les observent, les représentent – de tels motifs ornent la grotte de Lascaux ! – et cherchent à comprendre comment ils se forment.

Jusqu'à récemment, notre conception des mécanismes en jeu était restreinte à deux théories mathématiques opposées proposées au ^{xx}e siècle. Mais ces dernières années, les progrès dans la compréhension de l'embryogenèse, en particulier chez les oiseaux, et le développement de la génétique ont permis de montrer que non seulement les deux mécanismes existent, mais aussi que c'est leur combinaison dans l'espace et le temps qui assure aux motifs leur précision, tout en contribuant à leur évolution.

UNE DIVERSITÉ EXTRÊME DE MOTIFS NATURELS...

Un motif est perçu comme un ordre visible dans la répartition spatiale d'éléments au sein d'un système; en biologie animale, il peut s'agir de caractères corporels, d'individus au sein d'une population ou d'espèces dans leur habitat. Une déambulation en campagne, sur la plage à marée basse ou dans les allées du Muséum national d'histoire naturelle sont autant d'occasions d'explorer la biodiversité des motifs animaux: plumages bariolés, crinières touffues, fourmis en files indiennes ou agrégats de bigorneaux, les formes et couleurs des animaux adoptent des géométries diverses, qu'il est possible de classer en grandes catégories.

Prenons les vertébrés, dont nous faisons partie: on constate tout d'abord des symétries par rapport à un axe ou à un point. Celle du corps est dite bilatérale, tous les organes externes étant répartis également de part et d'autre de la ligne formée par la moelle épinière. Ces symétries concernent aussi les comportements, comme ces parades nuptiales fréquentes chez les oiseaux dans lesquelles les partenaires en devenir effectuent une chorégraphie en miroir. Autre type de motif, les mousses et bulles, surfaces sphériques, sont souvent

présentes à petite échelle: les cellules et les compartiments intracellulaires, par exemple, entrent dans cette catégorie. Les fissures, discontinuités de surface, caractérisent les craquelures de la peau des crocodiles ou les lignes de la main.

Mais les motifs qui caractérisent le monde animal sont bien plus divers. Les motifs périodiques, produits par la répétition d'un même élément, sont très fréquents: pensez aussi bien aux doigts, vertèbres et dents qu'aux files de gnous en migration ou à la queue des acheteurs au supermarché! Parmi ces motifs, les fractales, géométries décrivant la reproduction à l'identique d'un motif à différentes échelles, se retrouvent dans les arborescences formées par les neurones ou les alvéoles des poumons. Les méandres et les vagues, sinuosités ou



Les motifs des animaux varient de façon extrême tout en obéissant à des lois



déformations de surface répétées, caractérisent le déplacement du serpent ou les circonvolutions de l'émail des molaires. Les tessellations ou « motifs de Voronoï », dans lesquels les surfaces sont découpées en géométries régulières, s'observent sur le manteau des girafes ou la carapace des tortues. Les spirales se retrouvent dans la cavité de l'oreille interne ou les cornes de certains herbivores, et enfin les rayures et taches, disques ou droites périodiques plus ou moins déformées, ornent les félins ou caractérisent la répartition des troupeaux d'herbivores... Plusieurs de ces géométries sont parfois combinées en motifs complexes. À l'inverse, certains caractères semblent disposés de façon aléatoire, n'obéissant à aucun critère géométrique évident.

... MAIS PAS SANS LIMITES

Les possibilités semblent infinies, et pourtant. On note certaines tendances, des récurrences dans l'orientation ou la géométrie des motifs au sein de certains groupes ou même, plus étrangement, entre espèces éloignées. Les rayures dorsales noires et jaunes qui couvrent les poussins de volaille varient en nombre et en largeur, mais sont toujours longitudinales. Celles des zèbres ou des poissons-clowns sont,

elles, toujours transversales. Les membres antérieurs forment un bras, une aile ou une nageoire, mais sont toujours composés de trois grands segments.

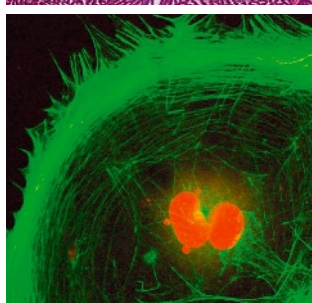
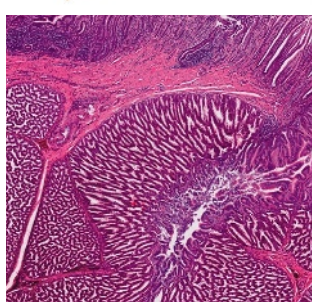
À l'échelle d'une seule espèce *a fortiori*, la reproductibilité des motifs est d'une précision méticuleuse, garantissant la fonction des organes ou la protection contre les attaques de l'environnement. Lorsque les variations existent, elles sont le plus souvent limitées à des modifications minimales de périodicité comme la variation du nombre de rayures sur le pelage des zèbres, sorte de code-barres qui permettrait la reconnaissance entre individus, ou de légères différences de régularité, comme chez l'astrild ondulé : l'uniformité des stries ornant le plumage de ce petit passereau africain est un gage de qualité pour d'éventuels partenaires.

On constate donc un étonnant paradoxe : les motifs qui ornent les animaux, souvent complexes, varient de façon extrême tout en obéissant à des lois sous-jacentes. Quelles sont ces règles qui régissent l'établissement des motifs dans la nature ? Pour le comprendre, les chercheurs tentent d'identifier les mécanismes moteurs de variation et ceux qui créent des thèmes communs. Si certains travaux concernent la fonction écologique des motifs (pourquoi le zèbre possède-t-il des rayures ?), d'autres s'attachent à comprendre leur formation (comment le zèbre acquiert-il ses rayures ?). À cette dernière question, Kipling fournissait une explication magique. Les scientifiques s'y attellent depuis les années 1950 avec des outils non moins surprenants : mathématiques, embryons et oiseaux.

DE L'HOMOGÈNE AU MOTIF

On peut considérer qu'avant son agencement en motif, un système est « naïf », c'est-à-dire que les éléments qui le composent, qu'il s'agisse d'individus ou de cellules, forment un ensemble homogène dépourvu de référentiel spatial. Le processus de formation d'un motif commence par l'acquisition d'un tel référentiel, l'installation d'un champ de coordonnées ou, pour l'imaginer plus simplement, d'une gauche, d'une droite, d'un avant, d'un arrière... Les éléments du système adoptent alors des destins ou comportements différents en fonction de leur position, ce qui crée des régions distinctes. Le système n'est alors plus homogène, mais composé de plusieurs domaines, eux-mêmes à l'état de systèmes *a priori* naïfs... et pouvant donc se subdiviser. Ainsi, un motif résulte d'une série de segmentations de plus en plus fines de l'espace jusqu'à un état stable.

L'embryon précoce des vertébrés, par exemple, est constitué d'une grappe de cellules identiques. Il se régionalise progressivement en hémisphères définissant les axes du corps, puis selon ces axes en trois feuilletés appelés



DES MOTIFS À TOUTES LES ÉCHELLES

De haut en bas, nuée d'individus, plumage (ici de faisan), doigts (ici de faisan), cellules (ici de l'estomac glandulaire d'un poulet), cytosquelette (ici d'une cellule de la peau) : dans un même groupe (ici les oiseaux), on observe des motifs aussi bien à l'échelle du groupe qu'à celle de la cellule.

«ectoderme», «mésoderme» et «endoderme». Ces derniers forment ensuite des organes distincts : l'ectoderme donne naissance aux tissus neuraux comme le cerveau et la moelle épinière, le mésoderme aux muscles, aux os, au cartilage et au derme de la peau, et l'endoderme aux organes internes des systèmes digestifs et respiratoires. Chaque organe poursuit sa compartimentation ; par exemple, le squelette du bras se subdivise en trois segments principaux, le premier à l'origine de l'humérus, le second lui-même segmenté en cubitus et radius, le troisième se divisant en carpes, métacarpes, et phalanges, etc.

Des cascades d'activation de gènes contrôlent le déroulement graduel de ce processus. Si l'on connaît de mieux en mieux les gènes impliqués, le déclenchement du processus, en revanche, reste un mystère. Comment une direction, des coordonnées, peuvent-elles naître sans points de référence ?

L'AUTOORGANISATION, UNE THÉORIE TRÈS (TROP ?) PLASTIQUE

Les premiers éléments de réponse ont émergé des travaux pionniers d'une poignée de mathématiciens, le Britannique Alan Turing en tête. En 1952, ce dernier formula un modèle mathématique décrivant au moins deux éléments qui s'inhibent et diffusent (voir l'encadré page 29). Le « modèle de Turing » et d'autres variantes formulées plus tard postulent que l'interaction locale d'éléments d'un système peut stabiliser et amplifier de façon spontanée des fluctuations stochastiques (aléatoires), et créer ainsi des dynamiques qui mènent à la formation de motifs stables. Autrement dit, les tissus peuvent s'«autoorganiser» à partir d'un «bruit biologique», sans recours à une référence spatiale préalable.

Dans les années 1970, en adaptant ces modèles mathématiques à des problèmes de biologie (les éléments mathématiques devenant des molécules, par exemple), les théoriciens allemands Hans Meinhardt et Alfred Gierer ont mis en évidence leur immense potentiel. En effet, lorsque les résultats des équations de Turing sont traduits en images par simulations numériques, on observe la production de motifs stables au sein d'espaces initialement homogènes. Rayures, taches, méandres... la ressemblance est frappante : les simulations peuvent reproduire presque toutes les géométries des motifs naturels.

Aujourd'hui, l'autoorganisation est considérée comme l'un des procédés majeurs de formation des motifs. La formation de nombreux motifs biologiques pourrait reposer sur des dynamiques «de Turing», qu'il s'agisse des trajectoires optimisées des fourmis ou des piétons, de l'agrégation des mollusques sur les