

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

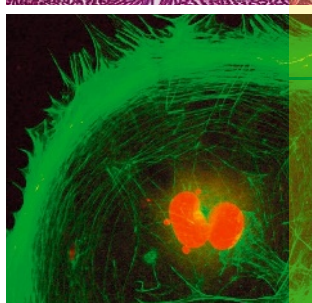
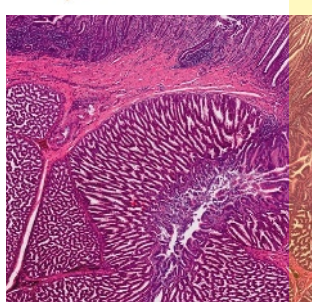
À l'échelle d'une seule espèce *a fortiori*, la reproductibilité des motifs est d'une précision méticuleuse, garantissant la fonction des organes ou la protection contre les attaques de l'environnement. Lorsque les variations existent, elles sont le plus souvent limitées à des modifications minimales 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

rochers pendant les marées, des mouvements coordonnés dans un essaim, des pois et zébrures périodiques, de la formation cyclique des vertèbres, des crêtes du palais et des empreintes digitales, ou encore de la polymérisation du squelette des cellules...

Devant un tel potentiel d'application, nombre de chercheurs se sont mis à étudier les propriétés mathématiques des dynamiques autoorganisées. Des mathématiciens ont ainsi proposé que l'autoorganisation suffirait à expliquer non seulement un grand nombre de motifs, mais également la diversité au sein d'une même géométrie. En effet, les résultats des simulations numériques sont extrêmement sensibles aux paramètres de départ dans le système homogène. Il suffit de modifier légèrement ces paramètres pour obtenir des résultats très différents, les stries devenant des pois ou des tessellations. C'est ainsi que depuis une quinzaine d'années, cette malléabilité permet aux chercheurs de recréer des variations observées dans la nature. Par exemple, modifier la taille du système initial reconstitue les différences de motifs pigmentaires entre espèces de serpents venimeux, l'évolution du nombre de barres colorées sur des poissons-anges tropicaux au cours de la vie, ou les variations de grosseur des taches des félins sauvages en fonction de leur âge, taille ou espèce.

Ainsi, l'autoorganisation pourrait être un mécanisme d'adaptation. Mais sa plasticité est aussi son talon d'Achille: il est en effet difficilement concevable que ce système stochastique produise des motifs avec la reproductibilité observée dans la nature. De plus, seule une fraction des dynamiques de Turing donnent lieu à des motifs: beaucoup de paramètres de départ produisent des résultats homogènes. De ces considérations sont nées différentes théories selon lesquelles l'autoorganisation doit être canalisée.

DES SOURCES DE SIGNAUX EXTERNES

Puisque l'autoorganisation ne peut à elle seule recréer la précision nécessaire à la survie, les biologistes du développement ont longtemps ignoré cette théorie au profit d'une autre, formulée par le biologiste britannique d'origine sud-africaine Lewis Wolpert en 1976 et nommée «instruction» (voir l'encadré page 30). Dans ce modèle, une source de signaux externes crée un gradient d'information de position déchiffré par les éléments individuels du système, tels que les cellules. En fonction de leur position dans le gradient, les éléments adoptent alors des destins spécifiques. La force de cette théorie est qu'intuitivement, elle correspond bien au déroulement par étapes spatiales successives de l'embryogenèse. De plus, il y a trente ans, les premiers



Seule, l'autoorganisation ne peut recréer la précision des motifs nécessaire à la survie



travaux de génétique fonctionnelle avaient effectivement lié la production de domaines distincts dans les tissus en développement à des gradients moléculaires formés par des facteurs appelés «morphogènes».

La drosophile, modèle génétique classique, est un cas d'école. Avant même sa ponte, l'œuf de cette mouche présente une asymétrie antéropostérieure. Sa fécondation a lieu au moment de la ponte. Dès lors, l'œuf fertilisé se divise rapidement et commence son développement, marqué par la segmentation du corps en zones qui deviendront les différentes parties de la tête, du thorax, de l'abdomen... Dans les années 1980, la biologiste allemande Christiane Nüsslein-Volhard et ses confrères américains Eric Wieschaus et Edward Lewis ont montré que le développement de ces différents segments démarre avant même la ponte et la division de l'œuf, par la formation d'un gradient d'ARN messager du gène *bicoid* (l'intermédiaire de production de la protéine codée par ce gène) selon l'axe antéropostérieur. Ce gradient «instruit» (selon le sens de Wolpert) une cascade d'expression de gènes en aval, dont les gènes *pair-rule* qui forment des rayures transversales, futurs segments du corps. Les trois chercheurs ont reçu le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1995 pour ces résultats majeurs.

À la suite de ces travaux, diverses équipes ont découvert d'autres morphogènes tant chez les invertébrés que chez les vertébrés, ce qui consacra l'instruction comme un procédé phare régissant la production de motifs. Le modèle de Wolpert a un avantage clé par rapport à celui de Turing: la hiérarchie stricte et conservée des programmes génétiques mis au jour permet d'expliquer la reproductibilité et la précision de beaucoup de motifs observés dans la nature. Mais il a lui aussi une limite: l'instruction ne s'applique pas à trop grande ou trop petite échelle. Le modèle de Wolpert est donc difficilement compatible avec la formation des motifs comportementaux ou subcellulaires. En outre, cette stratégie à elle seule n'explique pas une



Si l'on modélise les trajectoires d'un groupe de fourmis en quête de nourriture seulement à l'aide de la théorie de l'autoorganisation, les trajectoires obtenues sont très variables. Il est nécessaire d'ajouter un signal extérieur dans la simulation pour contraindre le comportement des fourmis.