

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



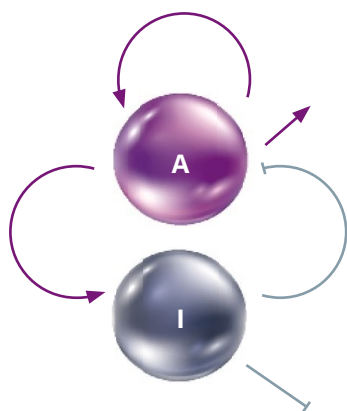
Si l'on modélise les trajectoires d'un groupe de fourmis en quête de nourriture seulement à l'aide de la théorie de l'autoorganisation, les trajectoires obtenues sont très variables. Il est nécessaire d'ajouter un signal extérieur dans la simulation pour contraindre le comportement des fourmis.

LE MODÈLE DE TURING : UNE QUESTION D'AUTOORGANISATION

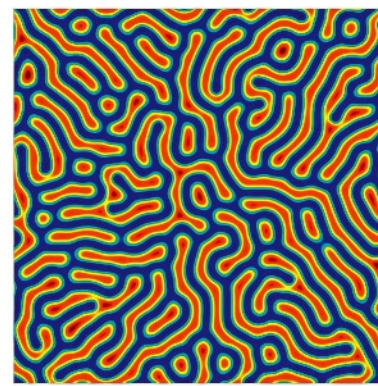
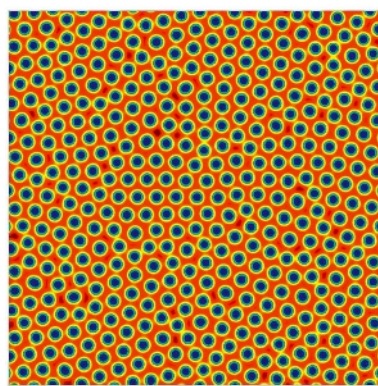
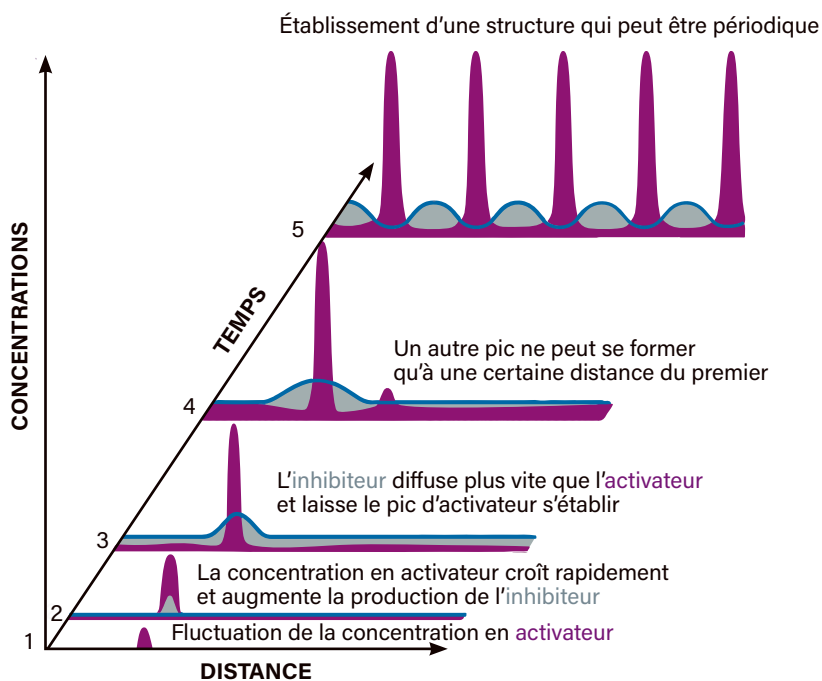
Le Britannique Alan Turing est surtout connu pour sa construction d'une machine ayant dévoilé le fonctionnement d'Enigma, système qui chiffrait les messages nazis durant la Seconde Guerre mondiale, ainsi que pour ses travaux sur l'intelligence artificielle, qui ont posé les jalons théoriques de l'invention des ordinateurs. Ses travaux de biologie théorique sont moins médiatisés. Pourtant, ils servent de fondement à des centaines d'études dans des domaines aussi variés que la médecine, l'épidémiologie, la météorologie, les études de comportement, l'embryologie ou la génétique.

S'intéressant à l'origine des formes de la nature, Turing imagina, en 1952,

un modèle mathématique permettant de passer d'un état homogène à un état organisé. Dans ce modèle, au moins deux substances diffusent avec des vitesses différentes dans un système, jouant respectivement le rôle d'activateur (A) et d'inhibiteur (I). Des équations dérivées partielles décrivent l'évolution de chaque substance et leur interaction au cours du temps : l'activateur stimule sa propre production, mais aussi celle de l'inhibiteur, qui diminue alors la production d'activateur. L'inhibiteur diffusant plus vite que l'activateur, il empêche la production de ce dernier sur une certaine zone autour de lui. Ainsi, de proche en proche, une structure dite « de Turing » se forme.



Une structure de Turing s'établit en plusieurs étapes : dans un système homogène contenant un activateur (A, en violet) et un inhibiteur (I, en gris), une fluctuation augmente légèrement la concentration locale de l'activateur (1). La concentration de l'activateur croît alors à cet endroit, entraînant la production d'inhibiteur (2). L'inhibiteur diffuse plus rapidement (3) que l'activateur, empêchant la concentration en activateur d'augmenter autour du pic d'activateur. D'autres pics d'activateur émergent à distance du premier (4) et ainsi de suite, jusqu'à former un motif stable qui peut être périodique (5).



Selon la valeur des paramètres des équations du modèle de Turing, les résultats obtenus varient. La structure produite peut être homogène, mais certains jeux de paramètres créent des motifs comme des pois ou des zébrures (à droite, ici obtenus à l'aide d'une variante du modèle de Turing), similaires à ceux observés dans la nature, par exemple sur des poissons (à gauche, un napoléon, et en haut, un chirurgien à voile indien).