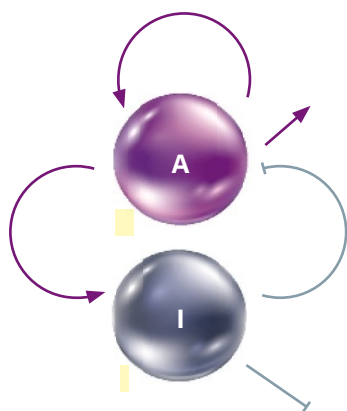


## LE MODÈLE DE TURING : UNE QUESTION D'AUTOORGANISATION

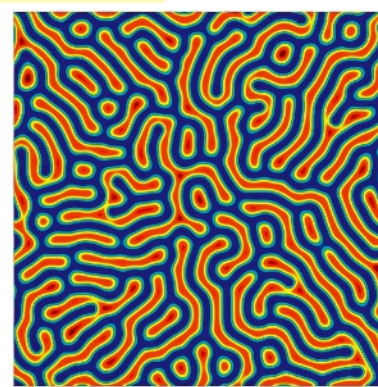
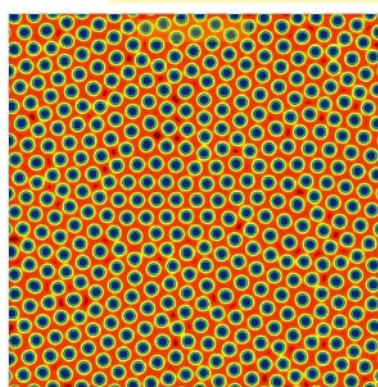
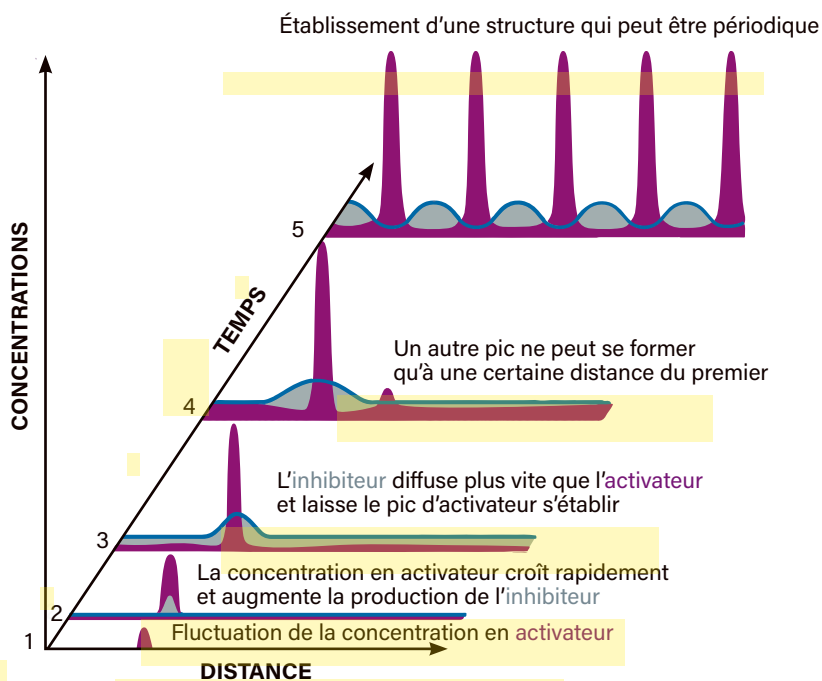
**L**e Britannique Alan Turing est surtout connu pour sa construction d'une machine ayant dévoilé le fonctionnement d'Enigma, système qui chiffrait les messages nazis durant la Seconde Guerre mondiale, ainsi que pour ses travaux sur l'intelligence artificielle, qui ont posé les jalons théoriques de l'invention 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).

évolution rapide et ne produit pas de motifs périodiques complexes...

## VERS UNE RÉCONCILIATION DES DEUX THÉORIES

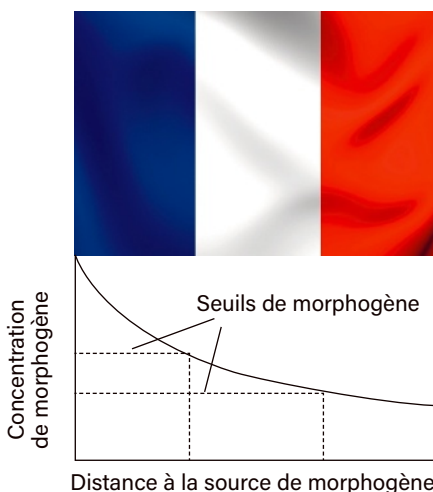
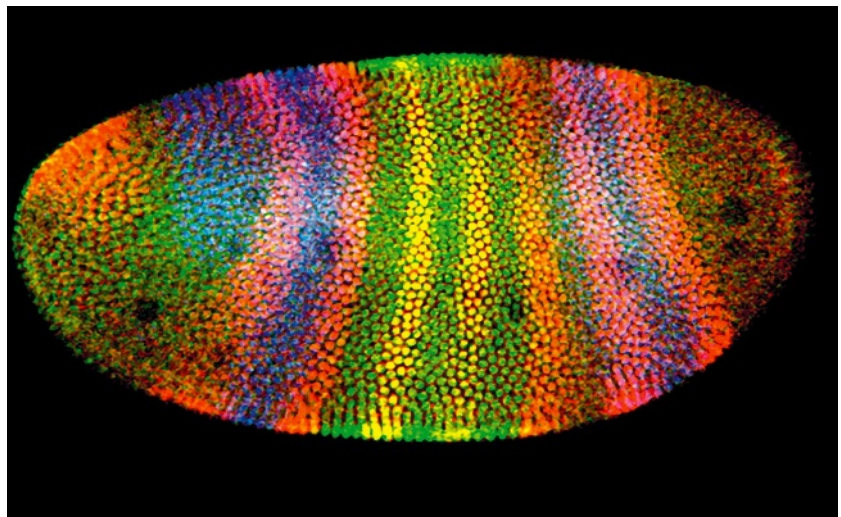
Longtemps, autoorganisation et instruction ont divisé partisans et détracteurs. Mais ces dix dernières années, les progrès de la biologie cellulaire et une meilleure compréhension de l'embryogenèse ont fini par les réconcilier. En effet, il est possible que ces deux stratégies agissent de concert, chacune apportant ses propres bénéfices au système. Par exemple, des signaux instructifs – c'est-à-dire fournis par un gradient de concentration d'une molécule – pourraient orienter l'autoorganisation. Ce serait notamment le cas lors de la formation des doigts, dont la répétition périodique est due à une autoorganisation du membre (voir la figure page ci-contre), mais dont la disposition radiale est contrôlée par un gradient d'une protéine nommée FGF, qui active la migration de certaines cellules.

On peut même extrapoler ce type de combinaison aux motifs comportementaux, par exemple des fourmis et des escargots de mer. En effet, plusieurs équipes françaises et anglaises ont montré que lorsque l'autoorganisation des fourmis en file indienne ou des escargots de mer en agrégats, créée par des fluctuations de leurs trajectoires ou de leurs recherches de nourriture, est simulée par ordinateur, les motifs obtenus sont très variables – un scénario peu souhaitable dans la nature (en trop petits groupes, les escargots de mer dessécheraient à marée basse, et désorganisées, les fourmis ne retrouveraient pas leur colonie). En revanche, si l'on ajoute des facteurs environnementaux comme la température pour les escargots de mer, qui influe sur le comportement des individus, l'autoorganisation se stabilise et reproduit les motifs observés en conditions naturelles.

Aussi, ces dernières années, on invoque souvent une combinaison de l'autoorganisation et de l'instruction dans le temps et l'espace pour

## LE MODÈLE D'INSTRUCTION DE WOLPERT

Le Sud-Africain Lewis Wolpert est à l'origine de certaines des plus grandes avancées de la biologie du développement. En 1969, il formula le « French Flag Problem », dans lequel le drapeau tricolore représente des régions ayant adopté une couleur différente en fonction d'une information de position (ci-dessous). Cette information peut provenir d'une autoorganisation similaire à celle du modèle de Turing (ce que Wolpert nomme le « balancing model » ou « modèle d'équilibrage ») ou d'une source externe – ce que l'on nomme aujourd'hui « modèle d'instruction ». Dans ce dernier cas, la source crée un gradient de signalisation (la quantité



de signaux est plus grande dans les régions proches de la source que dans les régions plus éloignées). Le gradient est « lu » par les éléments du système, par exemple les cellules d'un tissu, qui adoptent alors un destin (comme une couleur) en fonction de leur distance par rapport à la source. Ce modèle a servi de base théorique aux études d'embryologie précoce. En particulier, chez la drosophile, divers travaux ont montré que les segments de l'exosquelette sont formés par une série de gradients moléculaires que produisent des « morphogènes », comme l'avait prévu le théoricien. Notamment, à un

stade embryonnaire assez précoce, un gradient de la protéine Bicoid apparaît selon l'axe antéropostérieur de l'embryon et déclenche la production de plusieurs gènes de segmentation le long de cet axe (sur l'image ci-dessus, on distingue les gènes de segmentation hairy en rouge, krüppel en vert et giant en bleu). Ces gènes déclenchent à leur tour l'expression d'une autre classe de gènes de segmentation, les gènes pair-rule, toujours selon des bandes transversales, qui correspondront aux différents segments du corps de la mouche. Lewis Wolpert s'est tristement éteint cette année, de complications liées au Covid-19.