

bientôt une très forte élévation locale de la concentration d'activateur, qui ne diffuse que lentement dans le voisinage. L'inhibiteur qui est produit simultanément diffuse beaucoup plus vite et s'étend rapidement dans un plus vaste domaine autour de cette zone : l'inhibiteur empêche ainsi la propagation de l'activateur. Il se forme donc un pic localisé d'activateur. De tels pics tendent à émerger un peu partout, aléatoirement distribués. De leur compétition naissent, dans un système plan, des organisations régulières en réseaux hexagonaux de taches ou en bandes parallèles régulièrement espacées.

Les structures stationnaires obtenues résultent d'un bilan équilibré (d'un «équilibre dynamique») entre vitesse de transformation chimique et vitesse de diffusion des réactifs. Ce ne sont pas, comme les cristaux, des structures d'équilibre. Quand on cesse de fournir des réactifs, la réaction s'épuise, le caractère homogénéisant de la diffusion reprend ses droits et les structures s'effacent. Comme les êtres vivants, les structures de Turing meurent quand on cesse de les alimenter. Ces structures sont dites «dissipatives», car leur existence est liée à la consommation (dissipation) de matière ou d'énergie.

Depuis les travaux de I. Prigogine, elles ont été étudiées théoriquement, notamment par des biologistes théoriciens et des biomathématiciens qui les utilisent pour expliquer différents aspects de la morphogenèse. Ainsi, J. Murray s'est efforcé de rendre compte de la diversité des motifs sur le pelage des mammifères : rayures du zèbre, taches du léopard ou du guépard.

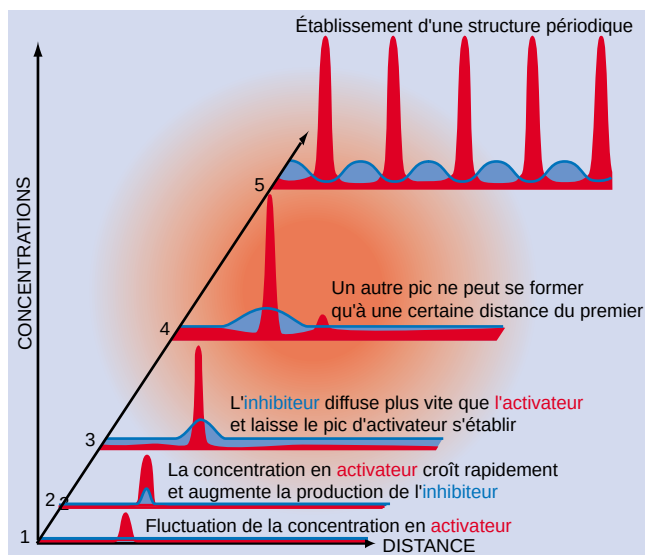
Pour J. Murray, l'organisation en taches ou en bandes est liée à une distribution spatiale de la concentration d'un morphogène. Cette distribution constituerait un «prémotif» et résulterait d'une instabilité de réaction-diffusion de type Turing. Ce prémotif, formé très tôt au cours du développement embryonnaire, serait «lu» à un stade ultérieur et figé. Le motif final sur le pelage des mammifères refléterait ce prémotif : la forte ou la faible concentration de morphogène, suivant la position considérée dans le prémotif, induirait ou non la différenciation des mélanocytes (cellules sécrétrices du pigment, la mélanine). Or, l'idée d'une organisation guidée par l'information reçue par chaque cellule est fondamentale en biologie du développement : selon L. Wolpert, le devenir d'une cellule au cours du développement peut être

détourné d'un type cellulaire vers un autre type, suivant la concentration locale ambiante des morphogènes.

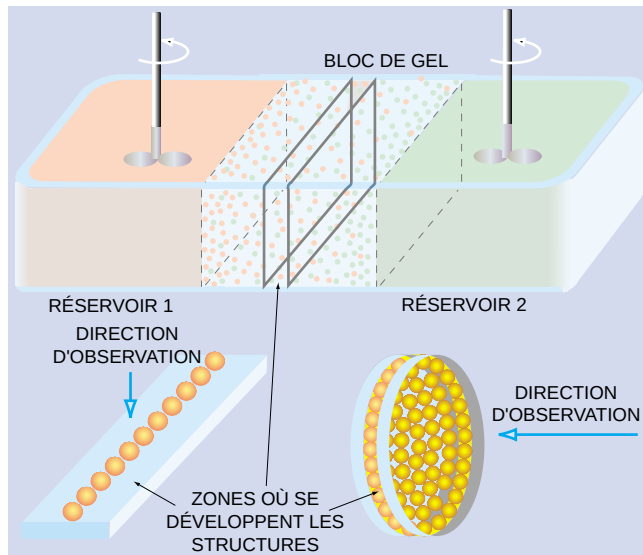
Ainsi les structures stationnaires de Turing pourraient expliquer certains aspects de la morphogenèse... pourvu que l'on accepte l'idée de morphogène. Les biologistes ont identifié des substances morphogénétiques dans certains tissus en développement.

Des réactions oscillantes aux structures de Turing

Pourquoi fallut-il attendre si longtemps pour observer de telles structures alors que tant d'équipes, depuis les années 1970, rêvaient de les découvrir? Le premier obstacle à leur réalisation était de disposer de réactions chimiques adéquates. Il s'agit de réactions chimiques oscillantes. Ce n'est qu'en 1968, au Congrès de Prague, après de longues années de contestations, que cette aptitude de certaines réactions chimiques à osciller a été reconnue par la communauté scientifique. À Prague, des chimistes et des biochimistes apportaient la preuve que les oscillations de ces systèmes (phénomènes à l'évolution périodique au cours du temps) étaient reproductibles



3. NAISSANCE D'UNE STRUCTURE DE TURING. Dans un système activateur (bleu)-inhibiteur (rouge) homogène se développent des hétérogénéités de concentration. (1) Sous l'effet de fluctuations du milieu un léger excès d'activateur se forme localement. (2) La concentration locale en activateur croît, entraînant la production locale d'inhibiteur. (3) L'inhibiteur diffuse plus rapidement que l'activateur, empêchant la concentration d'activateur de s'élever autour du pic d'activateur, qui est ainsi circonscrit. La concentration en activateur diminue même autour du pic. (4) D'autres pics d'activateur émergent, mais à distance du premier. (5) Il en résulte une structure stationnaire périodique.



4. LE RÉACTEUR SPATIAL est constitué d'un bloc d'hydrogel dont deux faces opposées sont en contact avec les solutions de réactifs contenues dans les réservoirs. L'oxydant est en 1, et le réducteur en 2. À partir de ces faces opposées, les réactifs diffusent dans le gel, se rencontrent et réagissent. Les structures de Turing se développent dans une strate entre les faces d'alimentation du gel. Des réacteurs de deux géométries ont été utilisés : ils diffèrent par le rapport de leurs dimensions et par la direction d'observation. Dans le réacteur à bande de gel représenté ici, on regarde entre les faces d'alimentation. Dans un autre type de réacteur à disque de gel, l'observation se fait à travers les faces d'alimentation.