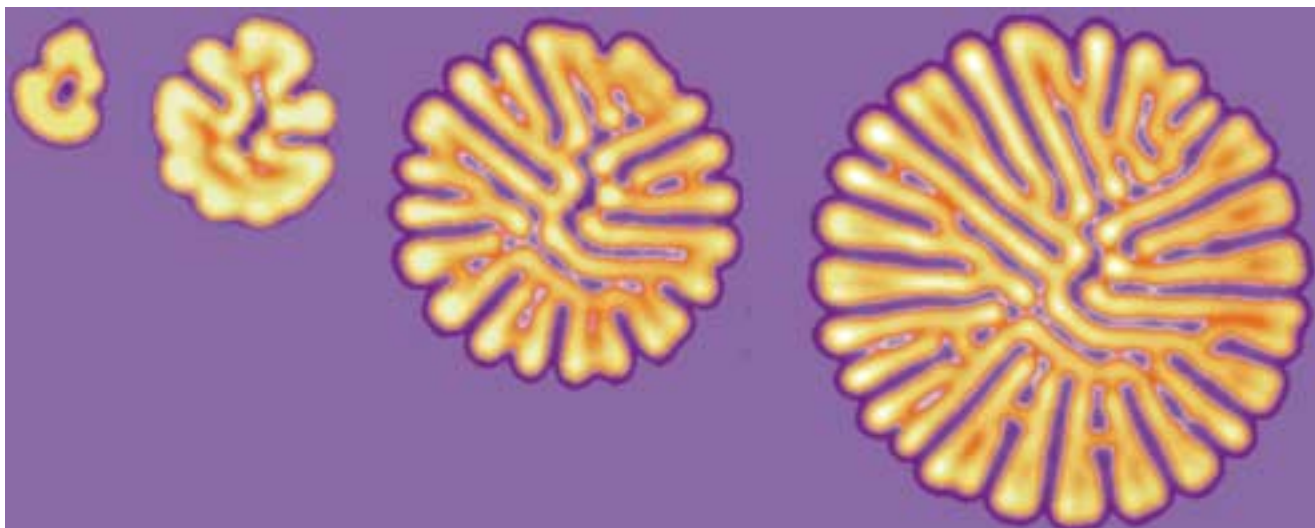




6. D'ÉTRANGES MOTIFS «FLORAUX» se déploient transitoirement lors du développement de la structure de Turing. Ces structures «transitoires» semblent résulter de l'interaction entre l'instabilité de

Turing et d'autres instabilités morphologiques. Nous voyons ici différents stades du développement de ces motifs transitoires, pris à des intervalles de dix minutes.

bleu sombre, réversible. L'amidon, compte tenu de sa taille (c'est un polysaccharide de masse molaire de l'ordre du million de daltons), diffuse très lentement par rapport aux petits ions impliqués dans la réaction chimique. On peut même le considérer comme immobile. Ainsi, le complexe amidon-iodure immobilise à tout moment une partie de l'iodure en solution et la diffusion apparente de l'iodure total s'en trouve ralentie, alors que celle du chlorite n'est pas affectée. Pour mieux comprendre ce phénomène, comparons la diffusion des ions iodure aux mouvements d'une population de petites billes que l'on aurait déposées sur un plateau parsemé de petites alvéoles et agité en tous sens. Une partie des billes est immobilisée en passant dans les alvéoles. L'agitation les faisant ressortir au bout d'un certain temps, elles reprennent alors leur libre circulation. Ainsi, le mouvement de la population de billes est globalement ralenti par la rétention temporaire d'une fraction d'entre elles dans les alvéoles.

Une profusion de motifs

La différence de composition des solutions de réactifs dans les réservoirs de part et d'autre du bloc de gel engendre des gradients de concentration entre les deux faces d'alimentation du gel. Du caractère plus ou moins abrupt de ces gradients dépend la largeur de la région où se développe l'instabilité de Turing. On obtient ainsi des motifs très différents : simples

motifs bidimensionnels tels que les réseaux hexagonaux de taches ou les bandes parallèles décrits précédemment, mais aussi des motifs plus exotiques liés au caractère tridimensionnel des structures qui s'établissent parfois (voir la figure 1).

Tout comme pour les systèmes à l'équilibre, il est possible d'établir des diagrammes d'état des systèmes de non-équilibre en fonction des valeurs de divers paramètres (généralement, la concentration de divers réactifs dans les réservoirs). On détermine ainsi, pas à pas, toute une séquence d'états. Une telle séquence d'états peut être observée en une seule expérience, dans des disques de gel dont l'épaisseur varie continûment (ce sont des disques aux faces non parallèles). Dans de tels cas, l'épaisseur du disque joue le rôle du paramètre de contrôle dont la valeur varie continûment le long d'un diamètre du disque. Une séquence de motifs peut être ainsi analysée en une seule expérience (voir la figure 5).

Chimie et biologie : mêmes dessins

Comme nous l'évoquions au début de cet article, A. Turing proposait des processus de réaction-diffusion pour expliquer certains aspects de la morphogenèse des êtres vivants. En particulier, les motifs pigmentés décorant la peau de nombreux animaux pourraient résulter de tels processus.

Nous avons vu que des systèmes chimiques relativement simples peu-

vent spontanément produire des motifs variés. Toutefois, la ressemblance entre les motifs issus de la chimie et présentés plus haut et ceux que l'on observe dans la nature n'est souvent qu'assez lointaine ; l'organisation des motifs décorant les fourrures animales est bien plus irrégulière que la répartition périodique des motifs chimiques. D'après J. Murray, le prémotif de morphogènes est déposé très tôt au cours du développement embryonnaire et les expansions diverses subies ultérieurement par les différentes parties de l'embryon conduiraient à des déformations plus ou moins sévères du motif initial. Cela expliquerait les différences qualitatives entre motifs chimiques et biologiques.

Par ailleurs, si nous considérons la naissance des motifs chimiques, il convient de remarquer que les structures, au moment où elles émergent de l'état uniforme, sont le plus souvent irrégulières. Ce n'est que très progressivement que s'opère leur réarrangement aboutissant aux structures périodiques présentées sur la figure 1. Elles correspondent à un système ayant atteint son état asymptotique. Il est probable que, chez l'embryon, le prémotif de morphogène soit traduit en motif coloré avant que ne se soit écoulée cette période de réarrangement du motif (période qui, d'ailleurs, n'a peut-être aucun sens en biologie). Les motifs colorés sur les pelages des animaux ne seraient que l'image instantanée d'un «transitoire» (au sens mathématique de ce terme)

des processus qui leur ont donné naissance. Nous donnons, pour illustrer ce propos, deux instantanés de motifs chimiques tels qu'apparus au cours d'états transitoires du système et qui, à long terme, auraient abouti à une structure en réseau hexagonal de taches. Un traitement approprié de la palette de couleurs met en évidence d'étonnantes similarités entre ces motifs chimiques et ceux portés par les peaux du guépard et du léopard (voir la figure 2).

Dans des conditions un peu particulières («loin du seuil d'instabilité», diraient les spécialistes des systèmes non linéaires), bien d'autres motifs surprenants peuvent apparaître. Dans certains cas, les motifs s'étendent par division des premières taches apparues, évoquant curieusement la division cellulaire au cours de la croissance de tissus biologiques. Enfin notre équipe a récemment observé des croissances en forme de doigts, donnant naissance à d'étranges et transitoires «fleurs» chimiques (voir la figure 6).

Analogies et universalité

Aussi extraordinaires que soient les ressemblances entre structures chimiques de réaction-diffusion et certains motifs observés dans la nature, de telles similarités ne permettent nullement de conclure à l'identité des processus qui président à leur développement. De plus, étant donné l'extraordinaire complexité du réseau d'interactions propre à tout système biologique, isoler chez un être vivant des auto-activateurs et des inhibiteurs afin d'en vérifier le comportement *in vitro* tient souvent de la gageure.

Tout au plus, dans certains organismes où apparaissent des structures périodiques, on a réussi à identifier des morphogènes (par exemple le calcium au cours du développement des ramifications de l'algue *Acetabularia*) ou des molécules participant au processus d'auto-activation (au cours du développement du membre supérieur de l'embryon de poulet). Des expériences de biologie confirment aussi que, lors de la formation des motifs pigmentés sur la peau des mammifères, il y a bien développement de pré-motifs; toutefois l'origine de ceux-ci reste mal établie, et l'on sait que ce processus met aussi en

œuvre des migrations de cellules et l'adhésion entre cellules.

Quoi qu'il en soit des difficultés inhérentes au milieu biologique, les systèmes biologiques, aussi bien que les systèmes chimiques non linéaires, sont capables d'évoluer d'un état quasi indifférencié vers un nouvel état plus structuré. Cette transition constitue ce que les physiciens appellent une «brisure de symétrie». Ces brisures de symétrie peuvent être décrites par les mêmes équations mathématiques, définissant ainsi des classes d'universalité. Certains systèmes biologiques, tout comme les systèmes chimiques de réaction-diffusion, appartiennent au moins en partie à la même classe d'universalité, et les connaissances que l'on acquiert sur les uns contribuent à élucider les comportements des autres. Si des biologistes de plus en plus nombreux pensent que les processus de réaction-diffusion jouent un rôle au cours de la morphogenèse, il est certain que, outre la réaction-diffusion, d'autres processus physiques contribuent à l'élaboration des formes lors des multiples modifications qui ont lieu au cours du développement embryonnaire. Ce domaine de recherches est en plein essor.

Sur *Archimède*, l'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE, P. De KEPPEL présente «Les taches du léopard», le 13 mai 1997 à 20 heures.

P. De KEPPEL est directeur de recherche et É. DULOS est chargée de recherche au Centre de recherche Paul Pascal, laboratoire du CNRS à Bordeaux.

Oscillations and travelling waves in chemical systems, sous la direction R.J. Field et M. Burger, John Wiley & Sons, 1985.

Chemical waves and patterns, sous la direction de R. Kapral et K. Showalter, éditions Kluwer, 1995.

V. CASTETS, E. DULOS, J. BOISSONADE et P. De KEPPEL, *Experimental evidence of a sustained standing Turing-type non equilibrium chemical pattern*, in *Physical Review Letters*, n° 64, pp. 2953-2956, 1990.

P. De KEPPEL, J.J. PERRAUD, B. RUDOVICS et E. DULOS, *Experimental study of stationary Turing patterns...* in *International Journal of Bifurcation and Chaos*, n° 4, pp. 1215-1231, 1995.
