

## **AUTO-ORGANISATION**

Le terme d'auto-organisation désigne l'émergence spontanée et dynamique d'une structure spatiale, d'un rythme ou d'une structure spatiotemporelle (se développant dans l'espace et le temps) sous l'effet conjoint d'un apport extérieur d'énergie et des interactions à l'oeuvre entre les éléments du système considéré.

De nombreux exemples biologiques répondent à cette définition. Le plus emblématique est l'établissement du fuseau mitotique, structure transitoire qui réalise la ségrégation des chromosomes lors de la division cellulaire. Il a été montré que ce fuseau, ancré sur les parois de la cellule-mère, est un assemblage dynamique de filaments, les microtubules, et de moteurs moléculaires (protéines capables de se mouvoir et d'exercer des forces sur ces filaments). Les exemples abondent aussi aux échelles supérieures: développement de colonies de bactéries, variation périodique des populations dans un système prédateur-proie, déplacement cohérent d'un banc de poissons, fourmilières. La notion n'est pas spécifique au vivant: elle s'applique à la synchronisation d'oscillateurs couplés, aux ondes observées dans certains systèmes chimiques alimentés en continu, à l'apparition de motifs périodiques dans un liquide chauffé par le dessous (cellules de convection), à la formation des dunes, des rivages, ou même des galaxies.

### **Genèse de la notion d'auto-organisation**

Cette notion est apparue au milieu du XXème siècle, à la croisée des mathématiques et de l'informatique, avec les travaux de J. Von Neumann sur les automates cellulaires (modèles numériques discrets où l'état d'une cellule évolue en fonction de l'état des voisines), et ceux de N. Wiener, fondant la cybernétique (étude en parallèle de l'organisation, des mécanismes de contrôle et de la communication dans les systèmes vivants et artificiels). Suivirent un article fondateur d'A. Turing (1952) sur la morphogenèse (conception de modèles où le couplage de réactions chimiques et de la diffusion des réactifs produit des motifs en bandes) et les travaux d'I. Prigogine sur les structures dissipatives (structures stationnaires hors d'équilibre où la dissipation d'énergie entretient une organisation locale). Toutes ces études soulignèrent l'importance des rétroactions, des non linéarités et du caractère ouvert et hors d'équilibre des systèmes pour qu'il y apparaisse des formes stables et reproductibles sans plan d'ensemble ni prescription extérieure. L'essentiel était dit. Les ouvrages ultérieurs d'H. Von Foerster (1962), d'H. Haken (1977) et de H. Atlan (1979) achevèrent d'établir et de populariser la notion d'auto-organisation. Les recherches portent aujourd'hui sur sa mise en évidence expérimentale et sur l'élaboration de modèles opératoires, dans différents domaines allant de la biologie à la linguistique, en passant par la physique et les sciences sociales.

### **Les mécanismes de l'auto-organisation**

Le préfixe <<auto>> souligne qu'il peut apparaître des phénomènes collectifs robustes dans un ensemble d'éléments en interaction, sans qu'il y ait besoin ni d'un chef d'orchestre, ni d'une préparation initiale inhomogène, ni de conditions extérieures biaisant les interactions ou la dynamique individuelle. Le terme central d'<<organisation>> suggère une apparition d'ordre et renvoie aux notions d'entropie et d'information. Par exemple, une structure spatiale va émerger d'un mélange homogène de composants. En termes techniques, on parle d'une diminution (locale) de l'entropie. Il n'y a en cela nulle violation du second principe de la thermodynamique puisque le système est ouvert: la diminution d'entropie se fait aux dépens d'une consommation d'énergie. Une partie de l'énergie absorbée par les organismes vivants sert ainsi à maintenir leur organisation dynamique. Les structures auto-organisées sont hors d'équilibre, car parcourues de flux de matière et d'énergie. Elles s'évanouissent si on coupe les flux entrants: il est par exemple impossible de

figer et d'isoler un fuseau mitotique. Ces structures nous apparaissent stationnaires si les flux entrants compensent les flux sortants. Pour être non triviales, elles doivent découler de compétitions entre des tendances contradictoires, par exemple une amplification locale (instabilité) contrebalancée par un mécanisme d'inhibition plus global. Elles manifestent une brisure de la symétrie présente initialement, typiquement amorcée par une fluctuation, amplifiée par les non linéarités et stabilisée par un mécanisme de rétroaction; cette brisure de symétrie se traduit dans l'apparition de formes ou de rythmes. Les interactions doivent donc être non linéaires mais elles peuvent être à courte portée (i.e. entre éléments voisins) et présenter une composante aléatoire. Du fait de ces principes communs à tous les phénomènes auto-organisés, des modèles très similaires se rencontrent dans des domaines très différents et à des échelles très différentes (dynamique des populations et réactions chimiques, par exemple).

Une notion parfois confondue avec l'auto-organisation, mais en réalité plus faible, est la relaxation vers un état d'équilibre: lorsque l'énergie des différents états du système (par exemple les différentes conformations d'une protéine) dessine un paysage complexe, le système peut spontanément évoluer vers une situation plus ordonnée, si celle-ci est assez favorable énergétiquement pour compenser le coût entropique de l'ordre (cela correspond pour la protéine à se replier dans une structure bien déterminée). En autorisant le franchissement de barrières énergétiques, le bruit permet une plus large exploration des états possibles, et conduit à des états plus ordonnés, ce qu'on fait lorsqu'on secoue une boîte remplie de billes pour les tasser ou dans la technique métallurgique du recuit.

### **Enjeux et prolongements de la notion d'auto-organisation**

Une propriété des structures auto-organisées est d'être très sensibles aux variations des paramètres contrôlant les interactions; jointe à la sélection naturelle, elle donne une grande capacité d'adaptation. Plus généralement, lorsque les propriétés globales rétroagissent sur les propriétés des éléments, on peut observer une stabilisation spontanée du système dans un état critique (présentant des fluctuations à toutes les échelles d'espace et de temps): on parle de criticalité auto-organisée.

En biologie, des mécanismes d'auto-organisation semblent impliqués dans l'homéostasie, l'établissement de la polarisation cellulaire, les réseaux métaboliques, la différenciation cellulaire et le développement; la notion d'auto-organisation doit ainsi être coordonnée à celles de signal et de programme génétique, également invoquées pour expliquer ces phénomènes. D'autres applications sont les mouvements de foule, l'évolution des systèmes de villes, l'adaptation des écosystèmes, les structures cognitives où l'auto-organisation rejoint la notion d'apprentissage.

L'auto-organisation a ainsi apporté l'idée que des formes stables et statistiquement reproductibles peuvent découler d'un équilibre dynamique, mettant en jeu des règles locales et stochastiques. Il s'agit d'un phénomène essentiellement collectif: les propriétés globales ne peuvent se réduire à celles d'un ou plusieurs éléments isolés; on rejoint là les notions (encore inachevées) d'émergence et de complexité.