

L'architecture de la vie

DONALD INGBER

Un ensemble universel de règles de construction guide la conception des structures organiques, des simples composés carbonés jusqu'aux cellules et aux tissus les plus complexes.

La vie est la complexité même. De la bactérie à la baleine, les organismes se développent par le jeu des interactions compliquées d'un grand nombre de composants différents. Ces composants, ou sous-systèmes, sont eux-mêmes constitués d'éléments plus petits dont le comportement dynamique est autonome et spécifique, par exemple l'aptitude à catalyser des réactions chimiques. Pourtant, quand ces éléments sont combinés au sein d'unités fonctionnelles plus grandes – tels une cellule ou un tissu – des propriétés inattendues apparaissent, notamment la capacité de se déplacer, de changer de forme et de croître.

Bien que les chercheurs soient conscients de cette étrange particularité, ils n'en ont pas assez tenu compte dans leurs explications des principes fondamentaux de la vie. Au cours des dernières décennies, des biologistes ont exploré le fonctionnement du corps humain en caractérisant les propriétés des matériaux et des molécules essentielles de la vie, notamment l'ADN, matériau de base des gènes. Ils s'efforcent aujourd'hui d'identifier chaque élément de l'ensemble complet, le génome, spécifique de tout être humain. Les gènes spécifient la nature des protéines, les molécules clés de la vie ; aussi la connaissance prochaine du génome, Saint Graal de la biologie moléculaire, permettra-t-elle aux biologistes de constituer un catalogue presque complet des molécules d'un être humain. Toutefois, la structure des diverses parties d'une machine complexe, cellule ou moteur à explosion, n'explique pas le fonctionnement du tout. Aussi, identifier et décrire les pièces du puzzle moléculaire n'est que d'une aide minime pour la compréhension des lois régissant l'assemblage.

La nature fait appel à des règles d'assemblage simples illustrées par l'existence – à l'échelle moléculaire comme à l'échelle macroscopique – de motifs tels que spirales, pentagones et formes triangulaires. Ces motifs apparaissent dans les structures cristallines les plus régulières et dans les protéines les plus contournées, dans des organismes aussi différents que les virus, le plancton et l'être humain. Est-ce si étonnant ? Les matières organiques et minérales sont formées des mêmes éléments constitutifs : des atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote

et de phosphore ; la seule différence tient au mode d'assemblage des atomes dans l'espace.

Par auto-assemblage, les constituants se conjuguent pour donner naissance à des structures stables plus grandes dont les propriétés, nouvelles, ne pouvaient être prévues par les seules caractéristiques des éléments individuels. Dans la nature, l'auto-assemblage se manifeste à diverses échelles. À l'intérieur du corps humain, par exemple, de grosses molécules s'auto-assemblent en composants cellulaires, ou organites, qui s'auto-assemblent en cellules ; ces cellules s'auto-organisent en tissus, et les tissus en organes. Le résultat est le corps, organisé hiérarchiquement en différents systèmes, emboîtés comme des poupées russes. Ainsi, pour comprendre comment les créatures vivantes se forment et fonctionnent, il nous reste à découvrir les principes de cette organisation biologique.

Malgré des siècles d'étude, les chercheurs comprennent mal les forces qui poussent les atomes à s'auto-assem-

bler en molécules. Ils ignorent encore comment des groupes de molécules se conjuguent pour créer les cellules vivantes et les tissus. Ces 20 dernières années, j'ai découvert et étudié un aspect étonnant, mais apparemment fondamental, de l'auto-assemblage. Une large palette de systèmes naturels, atomes de carbone, molécules d'eau, protéines, virus, cellules, tissus, et même les êtres humains et les autres créatures vivantes, sont construits sur un même principe architectural, que nous désignerons par le néologisme de *tenségrité*. Ce terme caractérise la faculté d'un système à se stabiliser mécaniquement par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent.

Cette découverte fondamentale pourrait être appliquée dans de nombreux domaines. Au niveau cellulaire, la tenségrité explique comment la for-

me cellulaire et les forces mécaniques – telles que la pression dans les vaisseaux sanguins ou la compression dans les os – influent sur l'activité des gènes. Une meilleure intelligence des règles naturelles de l'auto-assemblage nous permet, dans des applications allant de la conception de médicaments à la fabrication de tissus, d'intégrer avec plus de pertinence les caractéristiques des molécules, des cellules et des autres constituants biologiques. L'omniprésence de la tenségrité dans la nature ouvre de nouvelles perspectives sur les forces qui régulent l'organisation biologique et, peut-être, sur l'évolution elle-même.

Qu'est-ce que la tenségrité?

Au milieu des années 1970, à l'Université Yale, j'étudiais parallèlement la biologie cellulaire et la sculpture, et j'ai eu alors le sentiment que la structuration des êtres vivants est plus dictée par l'architecture que par la composition chimique des éléments.

Les molécules et les cellules qui constituent nos tissus se renouvellent constamment, et c'est la pérennité des motifs et de leur architecture qui caractérise la vie.

Les structures établies par la tenségrité sont stabilisées, non par la résistance des constituants individuels, mais par la répartition et l'équilibre des contraintes mécaniques dans la totalité de la structure. Ces structures se répartissent en deux catégories. Dans la première, on classe les armatures constituées de tiges rigides, dont chacune peut travailler en traction et en compression, et qui sont assemblées en triangles, en pentagones ou en hexagones ; l'orientation des tiges détermine la position de chaque articulation et garantit la stabilité de la structure. Les dômes géodésiques de Buckminster Fuller sont ainsi constitués.

La seconde catégorie englobe les structures stabilisées par précontrainte, une idée mise en œuvre par le sculpteur Kenneth Snelson. Dans ses élégantes sculptures, les éléments

1. LA TENSÉGRITÉ – principe d'organisation d'un système architectural où des structures se stabilisent en équilibrant les forces opposées de compression et de tension – définit la forme et la solidité d'un certain nombre d'objets naturels et artificiels. Le cytosquelette d'une cellule vivante (à l'arrière-plan) est une structure formée de filaments et de microtubules connectés. La relation dynamique qui existe entre ces éléments structuraux fait penser à cette sculpture de Kenneth Snelson (au premier plan), où de longues tiges sont reliées par des câbles.