

à cet ancrage en se raccourcissant et en accroissant la tension dans tout le treillis. Les modèles à pailles laissent présumer que l'accroissement de la tension résultant de l'ancrage conduirait les filaments contractiles individuels (les carrés du modèle) à s'auto-assembler en faisceaux linéaires tendus entre les sites d'adhérence, où des intégrines fixent la cellule à la matrice. En fait, lorsque des cellules s'étalent sur une surface, les microfilaments contractiles s'alignent pour former des faisceaux.

Au contraire, au sommet de la cellule, il n'y a pas de substrat adhésif susceptible de s'opposer à la traction des microfilaments qui se raccourcissent. Là, seules la traction et la résistance exercées par les filaments voisins s'opposent à la contraction de chaque microfilament. Il y a déjà plusieurs années, Buckminster Fuller a montré qu'une traction vers l'intérieur et une déformation conduisent ce type de structure polyédrique à subir ce qu'il avait appelé une transformation «désarticulée» : l'armature très souple à base de carrés et de triangles se transforme en une structure de tenségrité totalement triangulée.

En reliant plusieurs modèles réalisés en pailles, je constatai que chaque module se contracte progressivement pour constituer une armature géo-

désique compacte, formée alternativement d'octaèdres et de tétraèdres. Dans une cellule, la contraction des réseaux de microfilaments reliés à la base de la cellule devrait tirer cette armature vers le bas, au-dessus du noyau sphérique, la transformant ainsi en un dôme triangulé, plus précisément en un dôme géodésique.

Elias Lazarides, Mary Osborn et Klaus Weber, de l'Institut Max Planck de Göttingen, ont observé ces transformations dans la région du cytoplasme, au-dessus du noyau de cellules étalées. Cette confirmation de l'existence d'un dôme géodésique à l'intérieur du cytosquelette est concluant : les cellules utilisent vraiment des architectures de tenségrité pour mettre en forme leur cytosquelette.

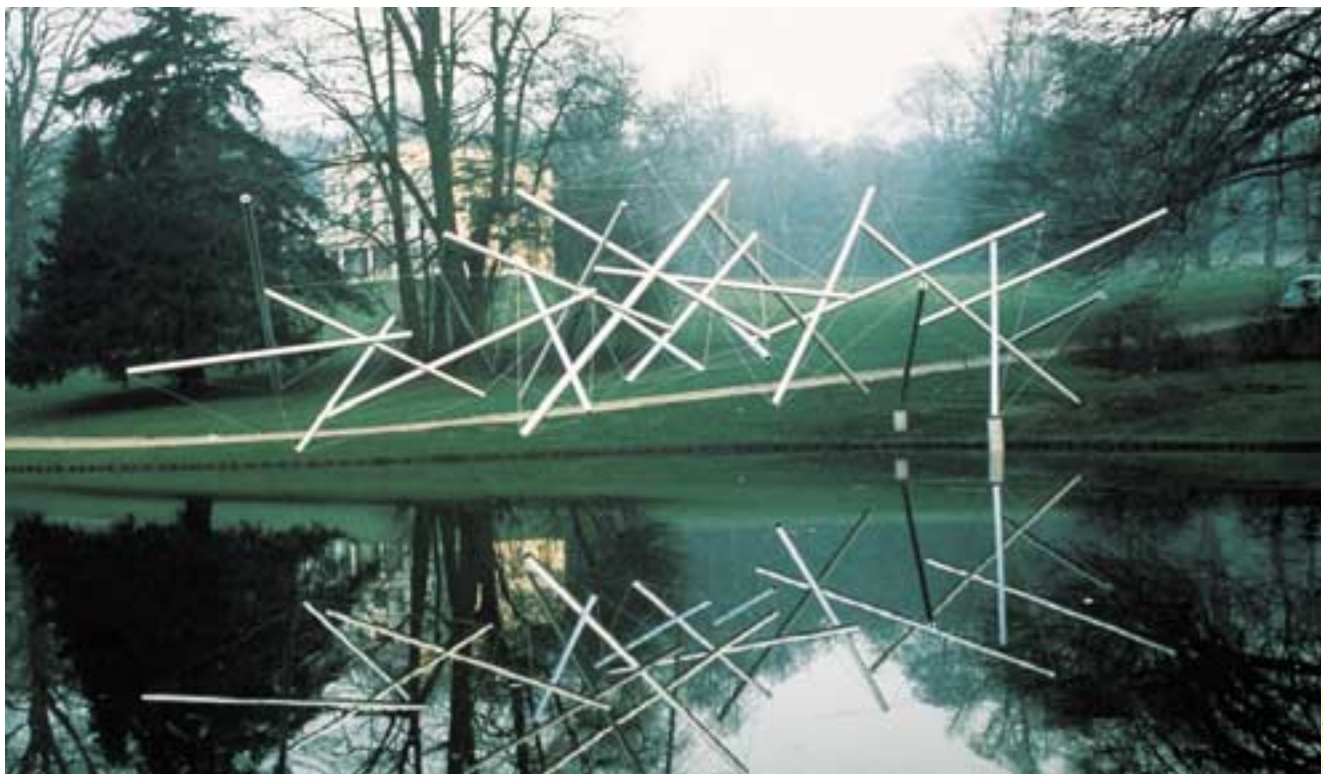
Un modèle universel?

La structure géodésique observée à l'intérieur du cytosquelette est un exemple classique d'un motif naturel existant à toutes les échelles. Des groupes sphériques d'atomes de carbone baptisés fullerènes, ainsi que des virus, des enzymes, des organites, des cellules et même de petits organismes, ont des formes géodésiques. Pourquoi? À mon avis, la répétition de ce motif constitue une preuve visuelle de l'existence de règles de base pour

l'auto-assemblage. En particulier, toutes ces entités se stabilisent en trois dimensions de la même façon, à savoir en réarrangeant leurs éléments pour minimiser l'énergie et la masse, à l'aide de tensions exercées de façon continue et de compressions locales, c'est-à-dire au moyen de la tenségrité.

L'assemblage des virus, les plus petites formes de vie sur Terre, met en jeu des liaisons entre un grand nombre de protéines qui s'assemblent en une enveloppe virale géodésique renfermant le matériel génétique. Lors de la formation d'un virus, des extensions linéaires de protéines chevauchent des prolongements voisins d'autres protéines, pour constituer une armature géodésique triangulée à l'échelle nanométrique. Chaque joint de cette armature se stabilise, car les forces d'attraction intermoléculaires (les liaisons hydrogène) équilibrent les forces exercées par les prolongements protéiques qui résistent aux compressions et aux déformations.

Le même schéma de base se retrouve dans les fullerènes, si ce n'est que les blocs de construction sont des atomes et non des protéines. En effet, 60 atomes de carbone forment une sphère géodésique recouverte de 20 hexagones alternant avec 12 pentagones : c'est le motif des ballons de football. Les 90 liaisons carbone-



Kenneth Snelson

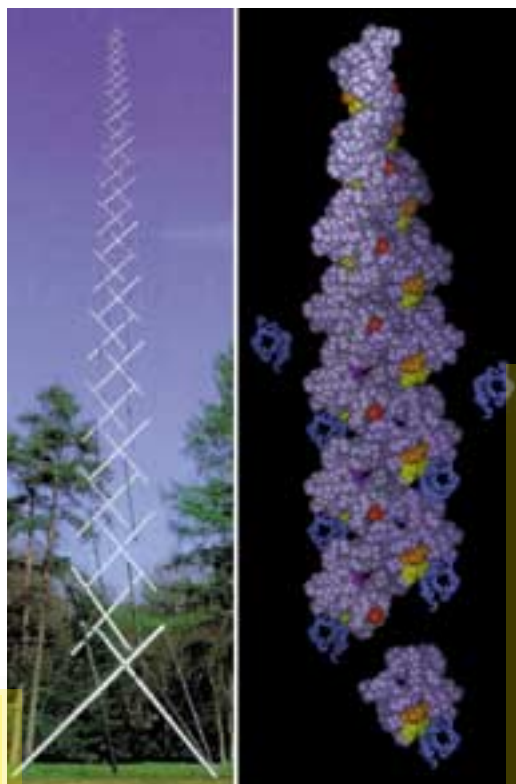
carbone d'un fullerène sont les tiges d'une sphère de tensegrité.

Il est cependant moins évident que ces mêmes règles de construction s'appliquent à des structures irrégulières, comme de nombreuses molécules biologiques dont la forme n'est pas une géodésique. Les protéines, qui imposent la structure des cellules et plusieurs de leurs fonctions, sont de longues chaînes d'acides aminés. De petites régions de ce squelette d'acides aminés se replient en hélices qui se stabilisent du fait de l'équilibre entre les forces d'attraction des liaisons hydrogène et les forces qui permettent aux protéines de résister à la compression : ces régions hélicoïdales se stabilisent grâce à la tensegrité, comme n'importe quelle molécule hélicoïdale telle que l'ADN.

L'organisation d'une protéine est aussi un assemblage hiérarchisé. Les petites régions qui sont résistantes en raison de leur disposition en hélice sont séparées par des séquences d'acides aminés qui se comportent comme des articulations flexibles. Ces régions se replient (en raison des liaisons hydrogène), afin de stabiliser la molécule entière. Les hélices raidies peuvent être localement comprimées, même si les forces sont équilibrées dans l'ensemble de la molécule précontrainte.

Comme une force, même localisée, peut modifier la forme globale d'une structure de tensegrité, la liaison d'une molécule à une protéine peut imposer un réarrangement complet des différentes régions hélicoïdales sur toute la longueur de la protéine. Par exemple, lorsqu'une molécule portant un signal se lie à un récepteur qui traverse la membrane cellulaire, cette liaison peut modifier la conformation à l'extrémité opposée du récepteur. Ces changements déforment à leur tour des protéines adjacentes et déclenchent une série de restructurations moléculaires à l'intérieur de cette cellule. C'est ainsi que les cellules détectent les informations qui leur parviennent et y réagissent.

Ainsi, des molécules aux os, aux muscles ou aux tendons, la tensegrité est le système de construction privilégié de la nature. Seule la tensegrité peut expliquer, par exemple, comment, chaque fois que vous bougez



12. CETTE STRUCTURE de tensegrité verticale et ce modèle moléculaire de microfilament du cytosquelette tirent leur solidité du même principe : ils se stabilisent par équilibrage des compressions et des tensions. Dans le tissu d'un œil de mouche (en arrière-plan), les cellules ont une disposition géodésique pour la même raison : elle garantit la stabilité par le jeu d'une tension répartie globalement et d'une compression locale.

un bras, votre peau s'étire, votre matrice extracellulaire s'étend, vos cellules se déforment, et comment les molécules interconnectées qui forment l'armature interne des cellules ressentent cette sollicitation, le tout sans discontinuité.

La tensegrité peut même expliquer comment tous ces phénomènes sont aussi parfaitement ordonnés dans une créature vivante. À l'Université Johns Hopkins, Donald Coffey et Kenneth Pienta ont découvert que les structures de tensegrité fonctionnent comme des oscillateurs harmoniques couplés. L'ADN, les noyaux, les filaments du cytosquelette, les canaux ioniques membranaires, de même que les cellules entières et les tissus vibrent selon des fréquences de résonance caractéristiques. La répartition des forces au sein d'un réseau de tensegrité couple les éléments du système et les «accorde» mécaniquement, comme s'il n'y avait qu'un élément unique.

Si les variations dans l'ADN sont génératrices de diversité biologique, les gènes sont un produit de l'Évolution, et non la cause qui la dirige. En

fait, des formes géodésiques similaires à celles observées dans les virus, les enzymes et les cellules existaient déjà dans le monde inorganique des cristaux et des minéraux, bien avant que l'ADN n'existe. Même les molécules d'eau ont une structure géodésique.

Conséquences pour l'Évolution

Comment des constituants inorganiques ont-ils évolué en molécules organiques et en cellules ? Question pertinente. Après tout, en ce qui concerne la façon dont des propriétés nouvelles se manifestent, l'auto-assemblage des molécules en organites ou des cellules en tissus n'est pas très différente de l'organisation des atomes en composés. Par exemple, le sodium, qui est un métal explosif, et le chlore, qui est un gaz toxique, se combinent pour former du chlorure de sodium, dont une propriété inattendue est son utilité comme sel de table. Le principe qui importe ici est la façon dont une structure se forme et assure la cohésion de ses constituants ; cette caractéristique régit le comportement de la structure.

Toute matière est soumise aux mêmes contraintes spatiales, indépendamment de l'échelle ou de la position. Étant donné ces contraintes, la tensegrité constitue alors le principe de construction le plus économique et le plus efficace à l'échelle moléculaire, à l'échelle macroscopique et à toutes les échelles intermédiaires. Peut-être les structures de tensegrité entièrement triangulées ont-elles été sélectionnées au cours de l'Évolution en raison de leur efficacité structurelle, associant haute résistance mécanique et économie de matériaux. La flexibilité des structures de tensegrité précontraintes est sans doute avantageuse parce qu'elle leur permet de prendre diverses formes. Par exemple, si une molécule ou une cellule est apte à se transformer, à une température ou à une pression données, en une forme plus stable ou plus efficace sur le plan métabolique, sa durée de vie en est prolongée. Elle peut alors mieux interagir avec d'autres entités similaires pour donner de nouveaux auto-assemblages.

Les chercheurs sont maintenant convaincus que l'évolution biologique a commencé dans des couches d'argile plutôt que dans la mer primordiale. Il est intéressant de noter que l'argile consiste en un réseau poreux d'atomes disposés selon les règles géodésiques au sein de formes octaédriques et tétraédriques. Comme ces octaèdres et ces tétraèdres ne sont pas fortement compactés, ils peuvent bouger et glisser les uns par rapport aux autres. Cette souplesse, semble-t-il, permet à l'argile de catalyser un grand nombre de réactions chimiques, notamment celles qui ont pu produire les premiers éléments de construction de la vie organique.

Avec le temps, différents ensembles moléculaires se sont auto-assemblés pour former les premières structures ayant une fonction spécifique – les précurseurs des organites actuels –, qui se combinèrent pour créer les premières cellules. Ces cellules produisirent elles-mêmes des protéines qui s'auto-assemblèrent pour donner des supports d'ancrage des matrices extracellulaires, qui, à leur tour, se sont auto-assemblées en tissus pluricellulaires. Des organes se développèrent par auto-assemblage de tissus, et des organismes complexes firent leur apparition par combinaison et remodelage progressif d'organes différents. Le développement d'un embryon à partir d'un spermatozoïde et d'un ovule récapitule toutes ces étapes d'auto-organisation.

L'apparition de l'ADN et des gènes donna naissance à un nouveau mécanisme pour engendrer une diversité structurelle qui accéléra l'Évolution. Pendant tout ce temps, les règles défi-

nissant le processus d'auto-assemblage hiérarchique restèrent pratiquement inchangées. Il n'est donc pas surprenant que la disposition générale des os et des muscles soit extraordinairement voisine chez *Tyrannosaurus rex* et chez *Homo sapiens*, que les animaux, les insectes et les plantes doivent tous aux contraintes la stabilité mécanique de leurs organismes et que les formes géodésiques telles qu'hexagones, pentagones et spirales soient omniprésentes dans les systèmes naturels.

Ces principes de construction sont-ils universels? S'appliquent-ils à des structures qui sont façonnées par le jeu de forces de très grande ou de très petite envergure? Nous ne le savons pas. K. Snelson a cependant proposé un étonnant modèle d'atomes fondé sur la ténacité, et qui prolonge le modèle proposé en 1923 par le physicien français Louis de Broglie. Buckminster Fuller lui-même imagina que le Système solaire est une structure composée de multiples anneaux non déformables dont le mouvement planétaire est stabilisé par une attraction gravitationnelle continue. Le fait que notre Univers en expansion contienne de gigantesques amas de galaxies liées par la gravitation et des trous noirs isolés qui sont le siège, localement, d'énormes forces de compression nous conduit à nous interroger. Après tout, il n'y a peut-être dans la nature qu'un seul thème directeur. Comme le suggérait, au début du XX^e siècle, le zoologiste écossais D'Arcy Thompson, en se référant à Galilée qui, lui-même, citait Platon : le Grand Livre de la Nature serait-il écrit dans le langage de la géométrie?

Donald INGBER est professeur de pathologie à l'Université Harvard. Il est le fondateur de la Société *Molecular Geodesics Inc.* qui conçoit des matériaux nouveaux dont les propriétés sont inspirées des structures biologiques.

Donald L.D. CASPAR, *Movement and Self-Control in Protein Assemblies*, in *Biophysical Journal*, vol. 32, n° 1, pp. 103-138, octobre 1980.

Clay Minerals and the Origin of Life, sous la direction de A. Graham Cairns-Smith et Hyman Hartman, Cambridge University Press, 1986.

Donald E. INGBER, *Cellular Tensegrity : Defining New Rules of Biological Design That Govern the Cytoskeleton*, in *Journal*

of Cell Science, vol. 104, n° 3, pp. 613-627, mars 1993.

Ning WANG, James P. BUTLER et Donald E. INGBER, *Mechanotransduction across the Cell Surface and through the Cytoskeleton*, in *Science*, vol. 260, pp. 1124-1127, 21 mai 1993.

D'Arcy W. THOMPSON, *Forme et croissance*, Seuil-CNRS Éditions, 1994.

Christopher S. CHEN, Milan MRKSICH, Sui HUANG, George M. WHITESIDES et Donald E. INGBER, *Geometric Control of Cell Life and Death*, in *Science*, vol. 276, pp. 1425-1428, 30 mai 1997.

Donald E. INGBER, *Tensegrity : The Architectural Basis of Cellular Mechanotransduction*, in *Annual Review of Physiology*, vol. 59, pp. 575-599, 1997.