

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.

2. LE POIDS DU DÔME est supporté par un nombre minimum de tiges articulées.

© Allegra Fuller Snyder, Buckminster Fuller Institute, Santa Barbara

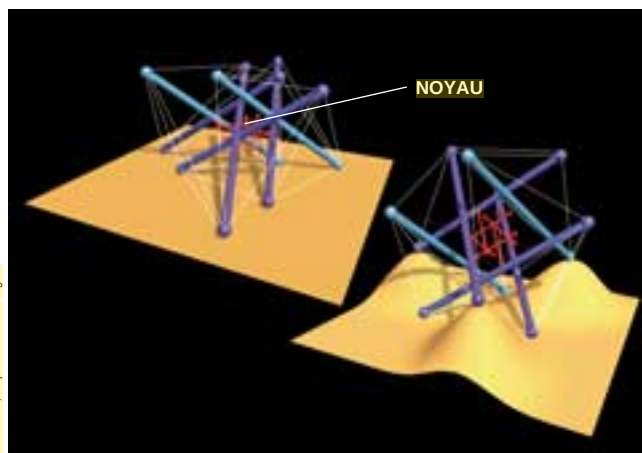


travaillant en traction sont distincts de ceux qui travaillent en compression. Avant qu'une telle structure ne soit soumise à une force extérieure, tous les éléments qui la constituent sont précontraints, en traction ou en compression. Au sein de la structure, les tiges rigides en compression exercent une force de traction sur les éléments élastiques en traction, qui, eux-mêmes, compriment les tiges rigides. Ces forces s'équilibrent dans l'ensemble de la structure et la stabilisent.

Ces deux types de structures ont une caractéristique commune : les forces sont transmises à tous les éléments structuraux. En d'autres termes, un accroissement de la tension sur l'un des éléments est transmis à tous les autres éléments de la structure, y compris les plus éloignés. Cette augmentation globale de la tension est équilibrée par une augmentation de la compression de certains éléments de la structure. Cette structure se stabilise par un mécanisme associant tension globale et compression locale. À l'op-



3. QUAND ELLES COLLENT À UN SUBSTRAT, les cellules exercent des forces qui en plissent la surface.



4. CE MODÈLE DE TENSÉGRITÉ représentant une cellule est fait de tiges rigides et d'élastiques. Comme une cellule vivante, il s'aplatit, ainsi que son noyau, lorsqu'il est fixé à une surface rigide (à gauche), et se rétracte en une forme plus sphérique lorsqu'il est sur un substrat souple qu'il déforme (à droite).

posé, la plupart des bâtiments tirent leur stabilité de l'existence d'une compression globale due à la force de gravité.

Dans ces structures, qu'il s'agisse des dômes de Buckminster Fuller ou des sculptures de K. Snelson, les éléments sur lesquels s'exercent les efforts de traction se réarrangent en minimisant la longueur entre deux points de la structure : ces éléments constituent les arêtes d'une géodésique. Aussi les structures de tensegrité supportant un poids donné sont-elles aussi légères que possible.

Du squelette au cytosquelette

Quel rapport y a-t-il entre la tensegrité et le corps humain ? Les principes de la tensegrité s'appliquent à toutes les échelles. À l'échelle macroscopique, les 206 os qui composent notre squelette sont comprimés par la force de gravité et stabilisés dans la position verticale grâce à la traction exercée par les muscles, les tendons et les ligaments (qui jouent un rôle similaire à celui des

câbles dans les sculptures de K. Snelson). Dans l'organisme, les os sont les structures de compression, tandis que les muscles, les tendons et les ligaments travaillent en traction. À l'autre extrémité de l'échelle, les protéines et autres molécules essentielles sont aussi stabilisées par la tenségrité. Je me suis particulièrement intéressé au niveau intermédiaire entre ces deux extrêmes : l'échelle cellulaire.

À Yale, je travaillais avec James Jamieson et m'intéressais aux interactions mécaniques des constituants des systèmes biologiques, en particulier des cellules. À cette époque, vers la fin des années 1970, les biologistes se représentaient la cellule comme un gel ou un fluide visqueux délimité par une membrane, en gros un ballon rempli de mélasse. On savait que les cellules contiennent une armature interne, ou cytosquelette, composée de trois types de protéines : les microfilaments, les filaments intermédiaires et les microtubules. Toutefois, leur rôle dans le contrôle de la forme des cellules était mal compris.

À l'époque, on s'interrogeait également sur le comportement des cellules quand elles sont disposées sur différentes surfaces. On savait que les cellules s'étalent et s'aplatissent lorsqu'elles adhèrent à du verre ou au fond d'une boîte de Pétri en matière plastique. En 1980, Albert Harris, de l'Université de Caroline du Nord, montra que, lorsqu'elles sont fixées sur un substrat en caoutchouc flexible, les cellules se contractent et s'aplatissent moins. L'aplatissement est réduit par la déformation du caoutchouc.

Ce comportement s'explique si l'on considère la cellule comme une structure de tenségrité. Pour le démontrer, je bricolai une cellule composée de six tiges en bois et d'un jeu d'élastiques. Je disposai les tiges – qui subissaient les contraintes de compression – en trois paires. Chaque paire était perpendiculaire aux deux autres, sans qu'aucune tige n'en touche une autre. Les élastiques, subissant les forces de tension, reliaient les extrémités de toutes les tiges, tirant sur celles-ci jusqu'à ce

qu'elles se disposent en une forme tridimensionnelle stable. Pour simuler le noyau, je plaçai un modèle de tenségrité sphérique plus petit dans la grande structure qui représentait le reste de la cellule. Enfin, pour imiter les connexions du cytosquelette entre le noyau et le reste de la cellule, je tendis des brins élastiques allant de la surface de la grande structure de tenségrité à la plus petite, située à l'intérieur (voir la figure 4).

Quand on appuie sur ce modèle de tenségrité, il s'aplatit. Dès que la pression exercée est supprimée, l'énergie emmagasinée dans les filaments tendus ramène le modèle, à la manière d'un ressort, vers sa forme d'origine, approximativement sphérique. Pour simuler le comportement des cellules lorsqu'elles sont placées sur une surface, j'imitai un substrat de culture, en verre ou en matière plastique, en prenant un morceau de tissu tendu que j'épinglai solidement à un support en bois. Je fixai le modèle de tenségrité à ce substrat en l'aplatissant et en couplant les extrémités de quelques-unes

MICROFILAMENTS



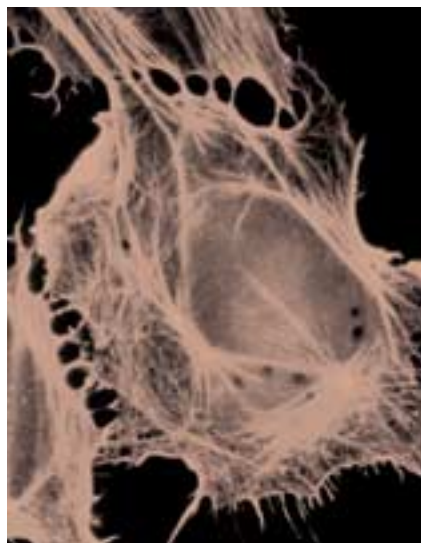
MICROTUBULES



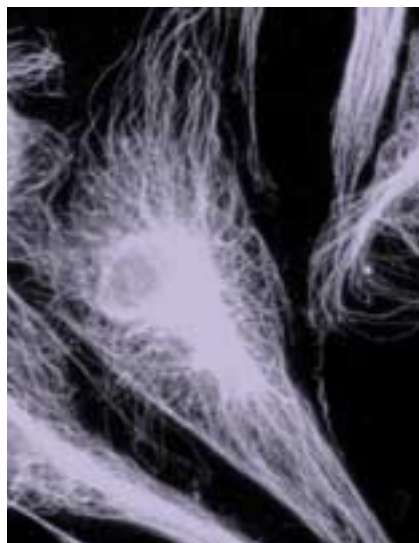
FILAMENTS INTERMÉDIAIRES



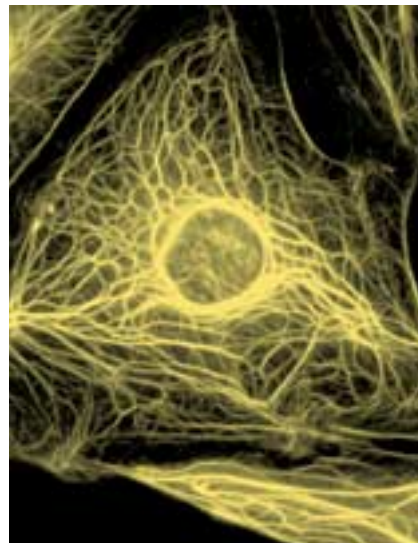
Laurie Grace



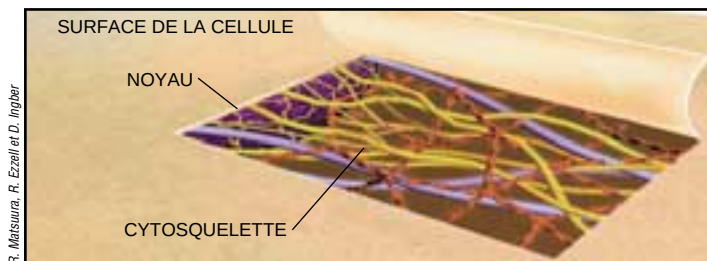
Donald E. Ingber



Donald E. Ingber



Robert D. Goldman, Northwestern University Medical School



5. LE CYTOSQUELETTE D'UNE CELLULE est composé de microfilaments (*en haut à gauche*), de microtubules (*en haut au centre*) et de filaments intermédiaires (*en haut à droite*), qui ont tous des dimensions de l'ordre de quelques nanomètres. La forme arrondie au voisinage du centre de chacune des photographies est le noyau de la cellule. Ces trois éléments constituent le maillage du cytosquelette, qui s'étend de la surface de la cellule au noyau (*illustration ci-contre à gauche*). La structure moléculaire de chacun de ces éléments est représentée au-dessus de la photographie correspondante, avec un codage des couleurs reproduit sur l'illustration à gauche.

R. Matsuura, R. Ezzeil et D. Ingber