

réaction à une contrainte locale. Le raidissement linéaire s'explique alors : lorsque la force appliquée augmente, de plus en plus d'éléments se disposent dans la direction où s'exerce la contrainte.

Avec Dimitrije Stamenovic, à Boston, nous avons mis au point un modèle mathématique qui prédit le raidissement linéaire des tissus, des cellules et même des molécules. Nous utiliserons ce modèle pour faciliter la conception de matériaux nouveaux dotés de cette propriété et qui seraient utiles pour des applications telles que des revêtements protecteurs et des organes artificiels

Les travaux de N. Wang sur la déformation magnétique et les expériences de traction de A. Maniotis ont montré que des contraintes appliquées à des récepteurs de la surface cellulaire qui sont associés au métabolisme – et non à l'adhérence – ne sont pas répercutées à l'intérieur de la cellule. Ces études confirment que les forces mécaniques sont transmises à l'intérieur des cellules, via des trajets moléculaires spécifiques ; désormais, nous comprenons mieux comment les cellules détectent les stimulations mécaniques qui régulent le développement des tissus. Ces perspectives éclairent tout un ensemble de phénomènes, de l'activation d'un muscle soumis à une ten-

sion jusqu'à la croissance des racines des plantes soumises à la gravité.

Les dômes géodésiques moléculaires

Bien que les modèles de tenségrité aient élucidé de nombreux comportements cellulaires, une énigme subsistait. Nombre de cellules s'étalent et s'aplatissent alors qu'elles sont démunies de microtubules, ces tiges travaillant à la compression et qui jouent un rôle clef dans le modèle. Si, en leur absence, les cellules vivantes peuvent passer d'une forme sphérique à une forme aplatie, comment la tenségrité se manifeste-t-elle ? En procédant par modélisation grossière, je découvris avec surprise que le réseau de microfilaments est lui-même une structure de tenségrité.

Dans le cytosquelette d'une cellule, les microfilaments contractiles forment un réseau qui se réorganise localement selon différentes formes, tels de grands faisceaux ou des treillis de triangles. Pour étudier le mécanisme qui règle cette réorganisation, j'ai modélisé le réseau de microfilaments par une armature polyédrique constituée de pailles et comprenant six triangles et quatre carrés (voir la figure 9). Un seul élastique, enfilé à travers toutes les pailles et noué aux

extrémités, solidarise les pailles. Je supposais que chaque paille du modèle représente un microfilament contractile, capable d'exercer une tension mécanique en se raccourcissant. On sait que les microfilaments contractiles exercent une résistance d'autant plus grande qu'ils sont plus courts. Ainsi, dans le modèle, l'élastique interne « fédérateur » simulait la tension continue exercée dans la structure tout entière par le raccourcissement de tous ces filaments.

Ce modèle de pailles modélisait une unité cytosquelettique modulaire reliée dans toutes les directions à d'autres modules similaires pour former une cellule isolée approximativement sphérique. La question à laquelle je tentais de répondre était : qu'arrivait-il à cette armature quand la cellule se collait à une surface rigide ?

Les cellules se fixent en établissant des liaisons avec les molécules de surface de la matrice extracellulaire. À vrai dire, les cellules ne sont pas « collées » à la matrice, mais « soudées par points » en des sites spécifiques. Les microfilaments contractiles réagissent

11. PARMI LES STRUCTURES précontraintes en porte-à-faux régies par la tenségrité figurent le système de muscles et d'os du cou de la girafe et, à droite, la sculpture à baguettes et à câbles de Kenneth Snelson.



Jim et Julie Butten, Photo Researchers, Inc.

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 tensegrité 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 tensegrité pour mettre en forme leur cytosquelette.

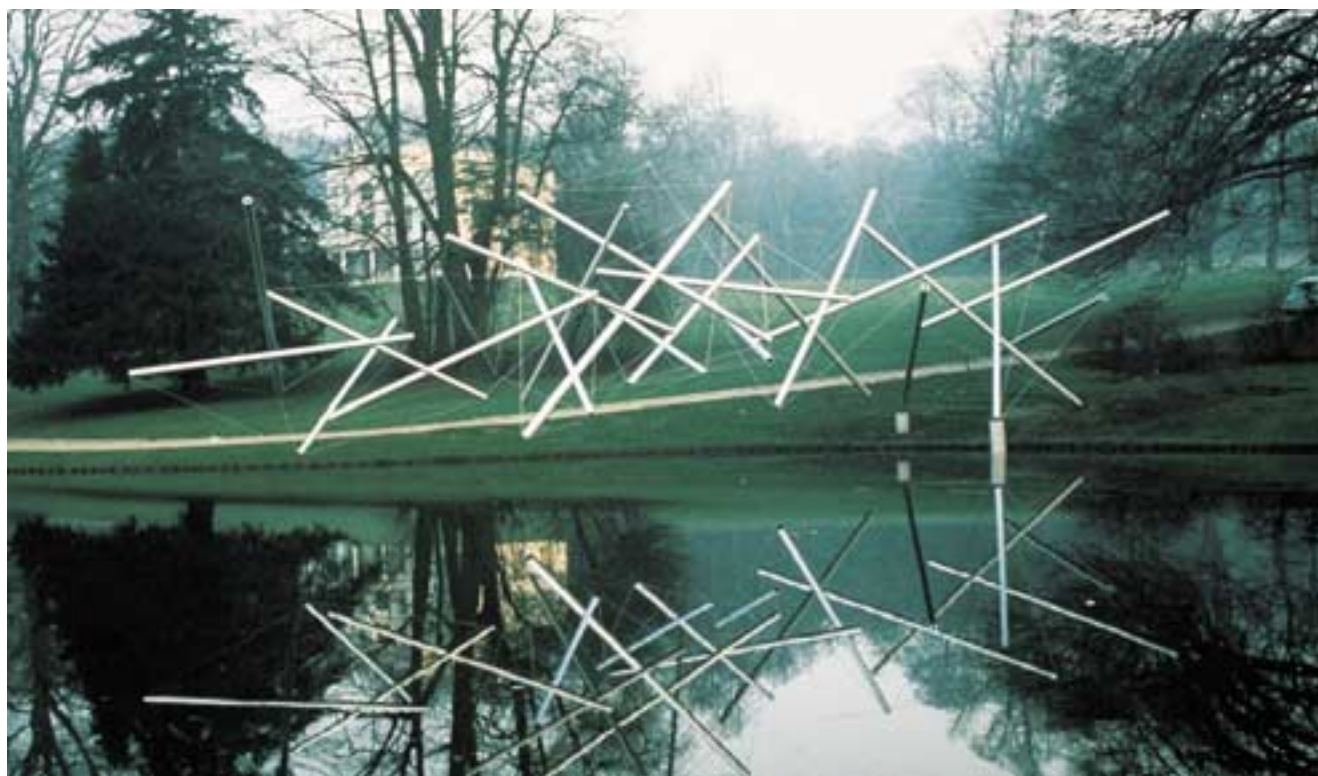
Un modèle universel?

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 tensegrité.

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