

ceaux de musique. La difficulté vient de faire comprendre et de faire composer à un ordinateur cette musique visuelle».

Plus prosaïquement, les bons joueurs de go évaluent une position en fonction de la forme et des positions respectives des groupes de pierres, et leurs raisonnements sont souvent plus intuitifs que rationalisés. Comment programmer ces capacités intellectuelles? Les meilleurs programmes de go actuels exécutent des milliers de règles identifiées empiriquement par des experts du jeu, mais les joueurs ne savent pas décrire comment ils évaluent les positions et choisissent leur coup. D'où la difficulté de programmation.

Au Laboratoire d'informatique de Paris VI, l'équipe *Métaconnaissance* de Jacques Pitrat étudie des méthodes générales pour faire découvrir par l'ordinateur lui-même des connaissances d'experts. J'ai appliqué ces méthodes

au jeu de go : le programme nommé *Introspect* s'améliore par observation et analyse de son propre fonctionnement, puis il donne ses connaissances au programme qui joue véritablement, le programme *Gogol*. Fondé sur l'auto-observation, l'apprentissage d'*Introspect* s'effectue de la façon suivante : ayant en mémoire la configuration du damier, il cherche les conséquences de chaque coup joué et analyse les raisons tactiques de ce coup. Quand il trouve des idées tactiques qu'il n'aurait pas su mettre en œuvre, il s'enrichit d'une connaissance nouvelle.

Une fois apprises et traduites en langage d'exécution rapide, les règles sont données au programme *Gogol*. Celui-ci n'envisage que quelques coups parmi les quelque 250 coups envisageables à chaque branche de l'arbre de recherche ; exécuté par un microprocesseur *Pentium 133*, il joue un coup

en dix secondes sur un damier 19×19 . Il envisage à chaque coup des centaines d'arbres de recherche qui comprennent chacun entre 2 et 500 nœuds, et il prévoit des séquences jusqu'à 60 coups à l'avance. À chaque nœud de chaque arbre, le programme applique les règles qu'il a apprises et qui conseillent les coups à utiliser. Ces règles, écrites par le programme, sont au nombre de 10 000.

Ainsi mon «métaprogramme» bat la plupart des autres programmes de go qui ont été écrits par des humains (il s'est classé sixième sur 40, lors de la dernière coupe Fost, qui a eu lieu en août 1997) et son potentiel de progression est supérieur à celui des autres programmes : une petite amélioration du métaprogramme peut conduire à de grandes améliorations des programmes finaux.

Tristan CAZENAVE
Université Paris VI

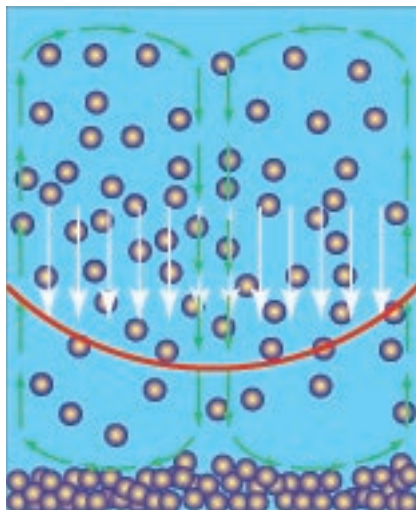
Convection intrinsèque

Lors de la sédimentation, un mouvement de convection s'ajoute à la chute des particules.

Les lois du phénomène de sédimentation permettent de retracer l'histoire des sédiments à partir de leur arrangement actuel. On utilise le phénomène pour séparer différentes espèces de particules ou pour clarifier les liquides. L'idée que l'on se fait de la sédimentation est en général assez simple : dans un liquide, les particules lourdes tombent au fond. La réalité est plus complexe : nous avons montré qu'au mouvement descendant des particules, s'ajoutait un mouvement de convection global de la suspension, c'est-à-dire des particules et du fluide.

Une sphère isolée tombant dans un liquide déplace ce liquide. En 1851, George Stokes a montré que la perturbation de la vitesse du liquide autour de la sphère décroît comme l'inverse de la distance à son centre. Cette perturbation modifie la vitesse d'une autre particule qui se déplace dans le liquide, laquelle modifie la vitesse de la première. Avec de nombreuses particules, chacune d'elles ressent les influences de toutes ses voisines. En modélisant cette interaction hydrodynamique à longue portée, on montre que, lorsque la concentration en particules augmente, la vitesse de sédimentation diminue. Cependant, ce résultat ne prend pas en compte l'effet des parois latérales du récipient.

Dans un récipient, les sphères ne peuvent s'approcher à moins d'un rayon des parois, en raison de leur volume. La densité de la suspension près des parois est ainsi inférieure à ce qu'elle est ailleurs dans la suspension. Étant moins dense, la suspension (les billes et le liquide) subit la poussée d'Archimède et remonte. Ce mouvement ascendant près des bords est équilibré par un mouvement descendant au centre. Ainsi se forment des rouleaux de convection.



Dans un récipient, une suspension de petites billes sédimente ; on filme la chute des billes et on détermine leur vitesse. Le profil de vitesse mesuré (courbe rouge) révèle une vitesse inférieure près des bords. Cette expérience confirme qu'au mouvement de chute des billes (flèches blanches) s'ajoute une remontée de la suspension près des bords et une descente au voisinage du centre (flèches vertes).

Prédite dans les années 1980, cette convection intrinsèque n'avait jamais été observée. Pour notre expérience, nous avons utilisé un récipient rempli d'un liquide d'indice de réfraction égal à celui de petites billes de verre. La suspension est ainsi transparente. Quelques billes de la suspension sont recouvertes d'une mince couche d'argent. À l'aide d'une caméra, on suit alors le mouvement de ces billes. La mesure de la vitesse de sédimentation moyenne est enregistrée d'un bord à l'autre du récipient lors du passage des billes. Nous avons observé que les particules tombent plus rapidement au centre que sur les bords, démontrant l'existence d'un mouvement de convection intrinsèque.

Ces mesures remettent en cause certains aspects de la théorie : pour des suspensions diluées, celle-ci prédit que la vitesse de la convection croît linéairement avec la concentration en particules. Or, nos expériences montrent que la vitesse de la convection croît à faible concentration et atteint une limite lorsque le volume de billes est compris entre 20 et 30 pour cent du volume de la suspension ; au-delà, elle s'annule. Nous avons aussi observé la structure de la suspension près des parois. À fortes concentrations, des couches diluées et concentrées alternent jusqu'à quelques diamètres de billes des parois. Aux concentrations élevées, la densité des couches externes est égale à celle du centre, et la convection n'a pas lieu.

Yannick PEYSSON
et Élisabeth GUZZELLI, ESPCI, Paris

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.

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

© Allegra Fuller Snyder, Buckminster Fuller Institute, Santa Barbara

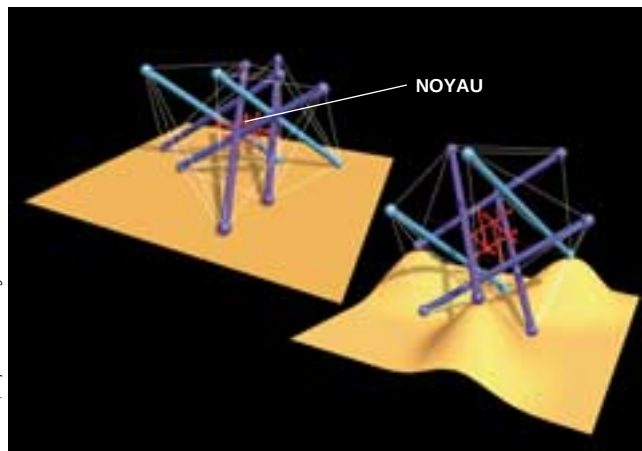


travaillant en traction sont distincts de ceux qui travaillent en compression. Avant qu'une telle structure ne soit soumise à une force extérieure, tous les éléments qui la constituent sont précontraints, en traction ou en compression. Au sein de la structure, les tiges rigides en compression exercent 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



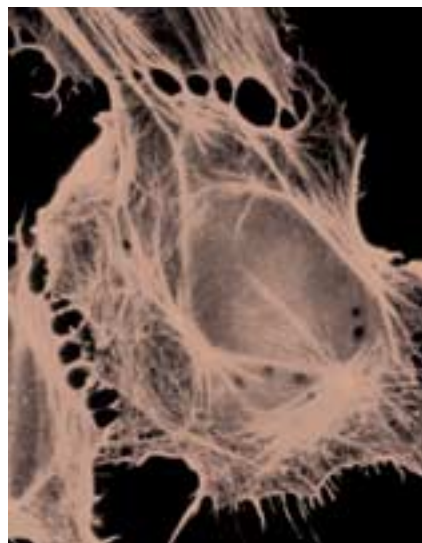
MICROTUBULES



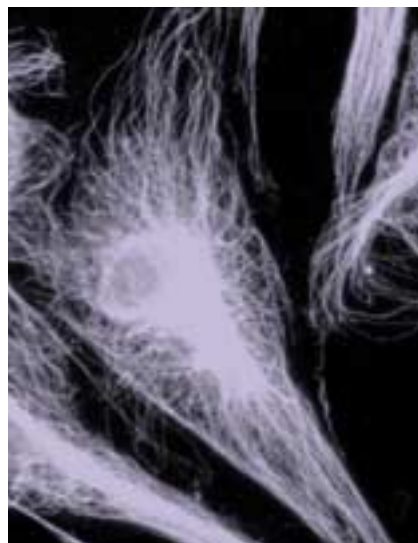
FILAMENTS INTERMÉDIAIRES



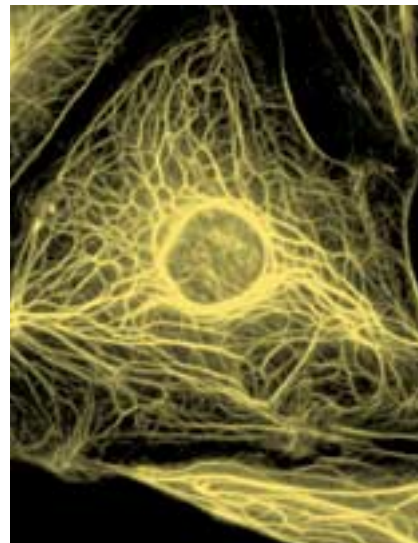
Laurie Grace



Donald E. Ingber

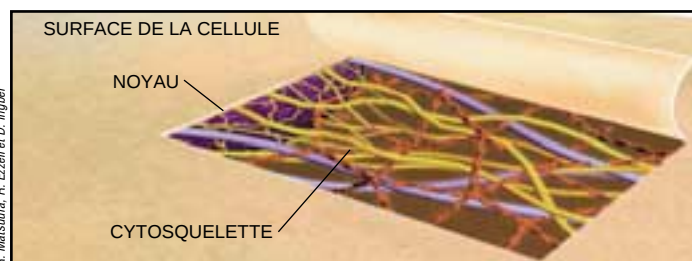


Donald E. Ingber

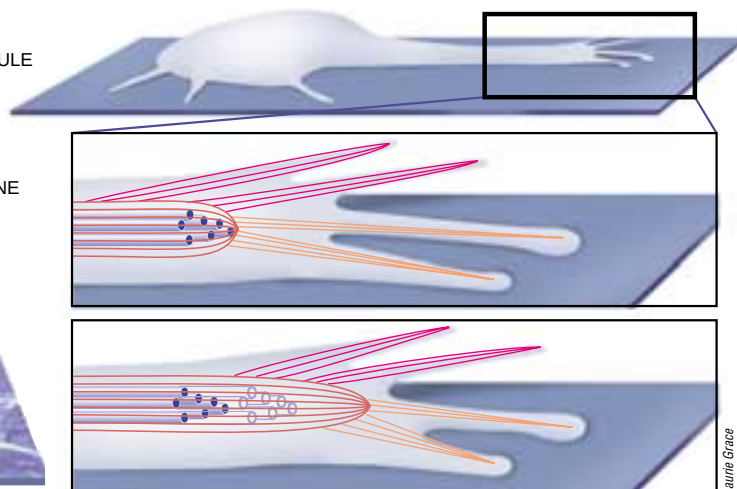
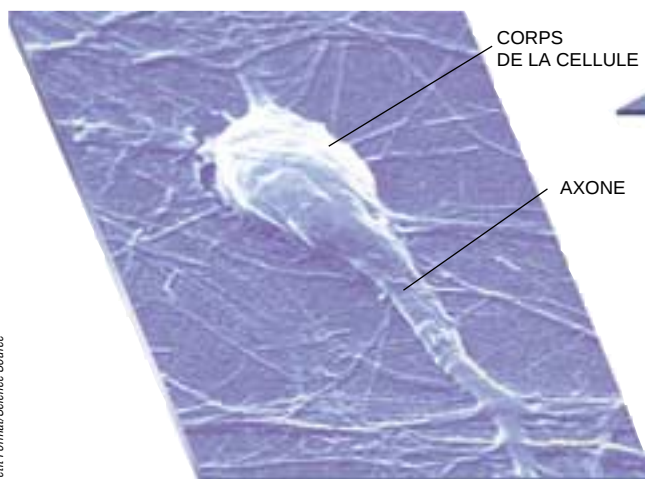


Robert D. Goldman, Northwestern University Medical School

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. Matsura, R. Ezzeil et D. Ingber



6. UNE CELLULE NERVEUSE présente des prolongements nommés axones, qui la relient électriquement aux cellules nerveuses voisines (ci-dessus et en haut à droite). Les axones se ramifient à leur extrémité (illustrations à droite), par exemple lors de la réparation d'une lésion : leurs microtubules (en violet) se prolongent. Des microfilaments contractiles (en rouge) entourent les microtubules, les comprimant et restreignant ainsi leur croissance. Ces

mêmes microfilaments, cependant, sont reliés à d'autres microfilaments (en orange) qui se projettent en avant jusqu'aux points où la cellule se fixe au substrat sous-jacent (illustration du milieu à droite). Lorsque les microfilaments s'étirent vers l'avant à la rencontre de ces points d'adhérence, ils permettent aux microtubules de s'allonger, et à l'axone de progresser (illustration en bas à droite).

des tiges au tissu. Ces liaisons simulaient les intégrines, les molécules qui assurent l'adhérence des cellules entre elles ou à leur substrat.

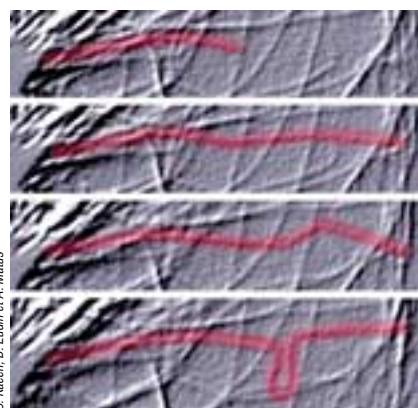
Lorsque les extrémités des tiges étaient cousues sur un tissu solidement épinglé, le modèle restait aplati, exactement comme une véritable cellule sur un substrat rigide (en verre par exemple). Lorsque je retirais les épingles et libérais le tissu de son support, le modèle de tenségrité retrouvait sa forme sphérique, en plissant le tissu sous-jacent. De plus, quand j'aplatissais le modèle en le fixant au tissu formant le substrat, la cellule et son noyau interne se déformaient ensemble : le modèle du noyau se déplaçait vers le bas du modèle de la cellule. Ensuite j'ai montré que les « vraies » cellules et leurs noyaux s'étalent et s'orientent de la même façon lorsqu'ils adhèrent à un substrat : ainsi, les structures de tenségrité imitent le comportement des cellules des organismes vivants.

Maillage interne des cellules

Dans les années qui suivirent cette expérience, les connaissances sur la constitution mécanique des cellules renforcèrent la pertinence du modèle. En outre, conformément aux modèles de tenségrité, la structure de la plupart des cellules dépend non seulement des trois types principaux de filaments du cytosquelette, mais aussi de la

matrice extracellulaire à laquelle, dans l'organisme, les cellules sont liées.

À l'intérieur de la cellule, les tensions mécaniques se répartissent dans le réseau de microfilaments élastiques du cytosquelette. Ces microfilaments tirent la membrane de la cellule et tous ses constituants internes vers le noyau central. Deux types principaux d'éléments travaillant en compression s'opposent à ces tractions vers l'intérieur, l'un situé à l'extérieur de la cellule et l'autre à l'intérieur. Le composant externe est la matrice extracellulaire ; les tiges internes comprimées sont soit des microtubules, soit de grands faisceaux de microfilaments entrecroisés à l'intérieur du cytosquelette. Les filaments intermédiaires, le troisième composant du



7. UN MICROTUBULE EN CROISSANCE et comprimé se déforme. L'allongement du microtubule est bloqué par les constituants du squelette de la cellule.

cytosquelette, constituent les organes de liaison de l'ensemble, reliant les microtubules et les microfilaments contractiles entre eux, à la membrane cellulaire et au noyau. En outre, ils constituent des sortes de haubans qui maintiennent en place et immobilisent le noyau, au centre. Bien que le cytosquelette soit entouré de membranes et qu'il baigne dans un fluide visqueux, c'est ce réseau de tiges et de câbles qui stabilise la forme de la cellule.

La cellule et le noyau sont physiquement reliés par des filaments élastiques et pas seulement par un cytoplasme fluide : aussi, une traction sur des récepteurs de la surface de la cellule perturbe immédiatement des structures au plus profond de celle-ci. Andrew Maniotis, dans mon équipe, en a récemment fait la démonstration directe en fixant des micropipettes aux récepteurs d'adhérence à la surface de cellules et en exerçant une traction vers l'extérieur : il s'ensuit un réalignement immédiat des filaments du cytosquelette et des structures internes du noyau, dans la direction de la traction.

Comment la mécanique commande la biochimie

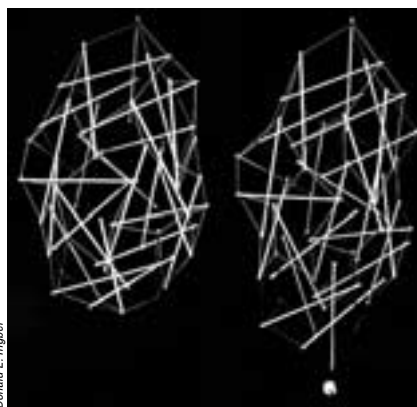
La tenségrité explique des phénomènes autres que la stabilisation de la forme des cellules et des noyaux. Au milieu des années 1980, Steven Heidemann, qui travaillait avec Harish

Joshi et Robert Buxbaum, à l'Université du Michigan, a montré que la tenségrité explique comment les cellules nerveuses déploient des prolongements minces et très allongés, nommés prolongements axonaux, qui sont remplis de microtubules et transmettent des signaux électriques dans le système nerveux. Cette croissance est nécessaire pour la réparation des lésions nerveuses.

L'équipe de S. Heidemann a découvert qu'à leurs extrémités les microtubules sont comprimés par la traction exercée à l'intérieur des axones par les microfilaments contractiles. Plus important encore, ces chercheurs ont observé que l'assemblage des microtubules – et donc l'allongement des axones – résulte de la libération des contraintes de compression des microtubules, contraintes qui sont transférées aux sites d'interaction de la cellule et de sa matrice extracellulaire. Au niveau moléculaire, l'équilibre des forces de tenségrité associe la mécanique et la biochimie.

Tout récemment, Andrew Matus, de l'Institut Friedrich Miescher de Bâle, a parachevé cette expérience : il a fabriqué des cellules où les microtubules sont fluorescents et a ainsi observé la déformation (le flambement) de ces microtubules quand ils sont comprimés.

Le modèle de la tenségrité montre que la structure du cytosquelette cellulaire est modifiée par les forces transmises à travers la surface de la cellule. Ce constat est important, car un grand nombre d'enzymes et d'autres substances qui commandent la



Donald E. Ingber

8. LE RAIDISSEMENT LINÉAIRE est commun dans une structure de tenségrité : les éléments de la structure tournent pour s'orienter en plus grand nombre dans la direction de la contrainte appliquée (sur l'illustration de droite la tension est dirigée vers le bas)

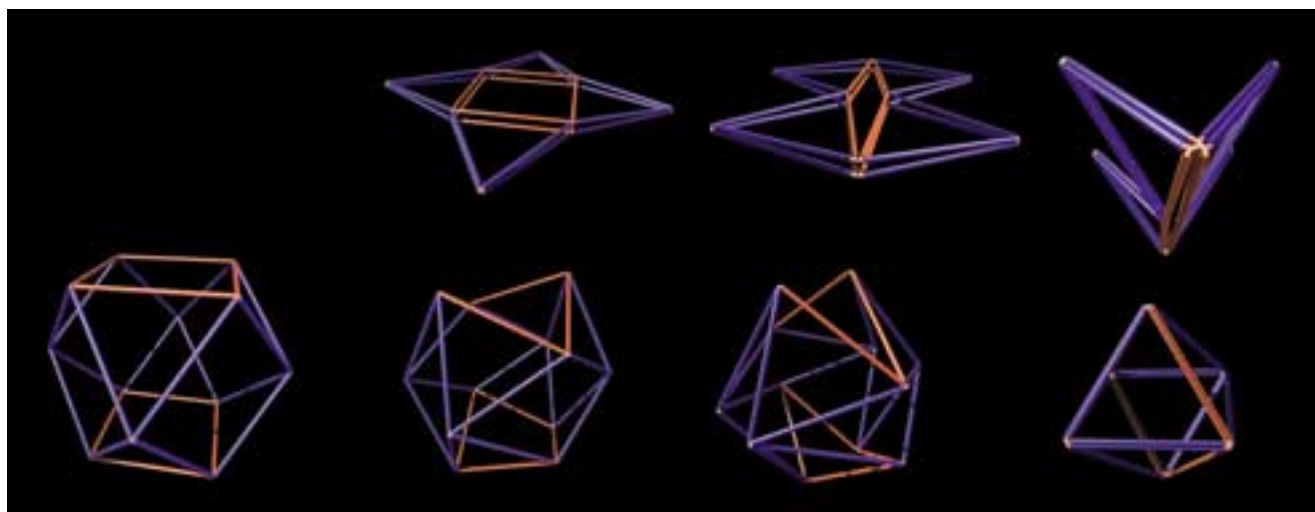
synthèse des protéines, la conversion de l'énergie et la croissance sont solidaires du cytosquelette ; une modification des caractéristiques géométriques et mécaniques du cytosquelette influe certainement sur les réactions biochimiques, modifie les gènes activés, et donc les protéines fabriquées.

Pour tester cette hypothèse, Rahul Singhvi et Christopher Chen, dans mon équipe, ont travaillé en collaboration avec George Whitesides, également à Harvard, et ont mis au point une méthode pour confectionner des formes cellulaires possédant certaines fonctions. Ils ont contraint des cellules vivantes à prendre différentes formes – sphérique ou aplatie, ronde ou carrée – en les plaçant sur de minuscules «îlots» adhésifs formés de matrice

extracellulaire et entourés d'une surface en Téflon à laquelle les cellules ne peuvent adhérer

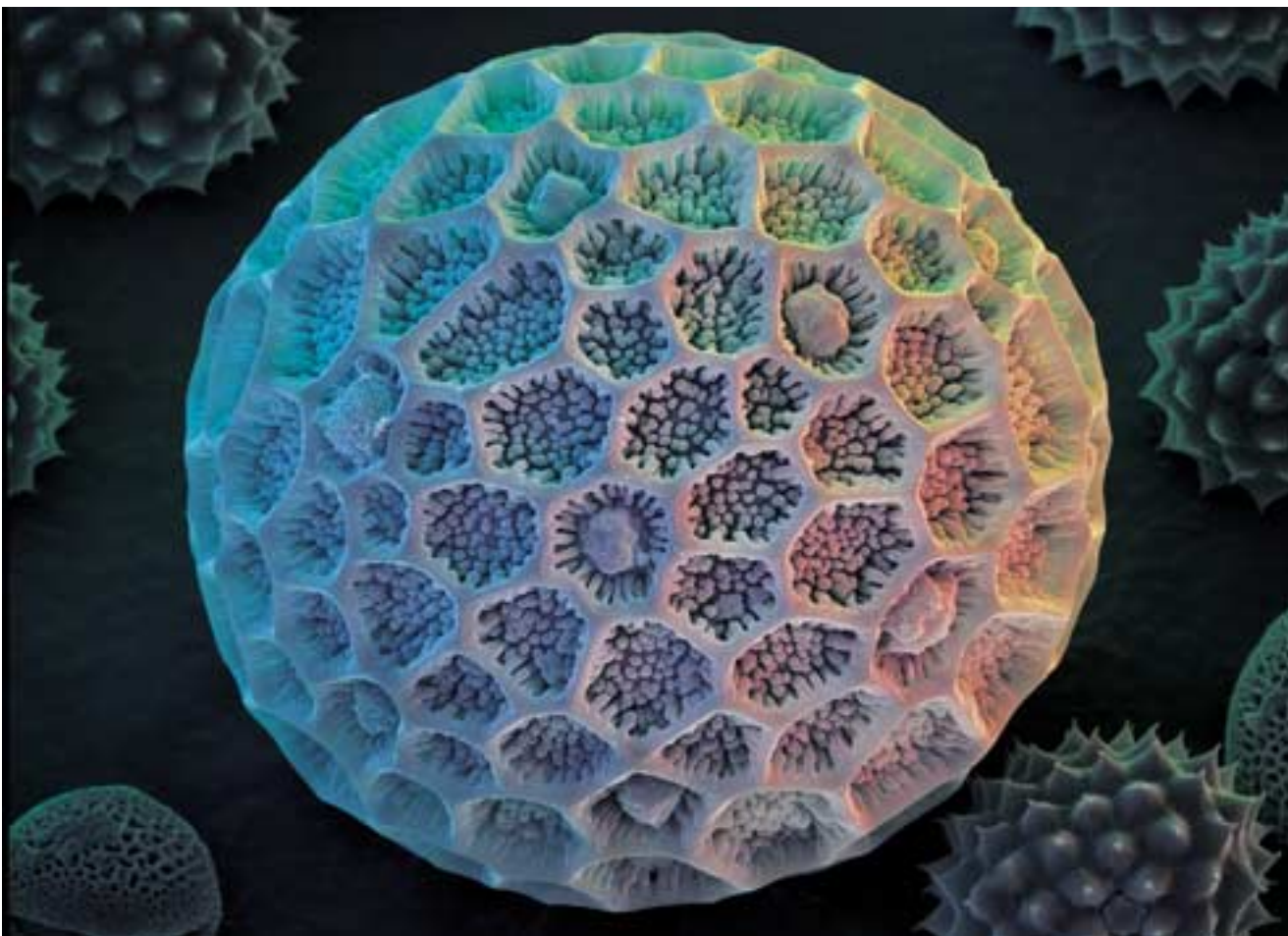
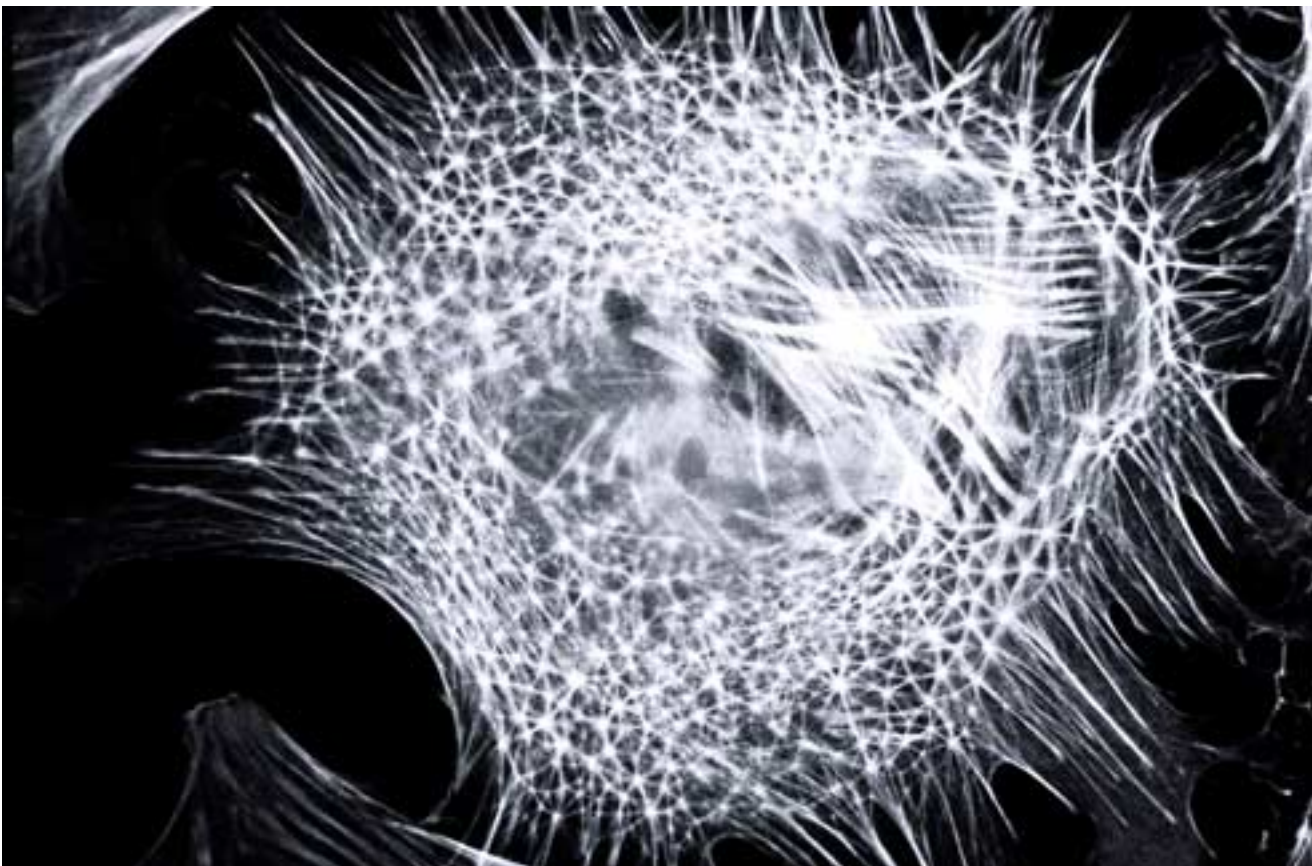
En agissant sur la forme des cellules, ils commandaient certains programmes génétiques. Les cellules qui s'étaient étalées et s'aplatissaient se divisaient mieux, tandis que les cellules rondes qu'ils empêchaient de s'étaler activaient un programme de mort programmée, ou apoptose. Quand les cellules n'étaient ni trop étalées ni trop contractées, elles ne se divisaient pas, elles ne mouraient pas, mais se différenciaient en tissus spécifiques : les cellules de capillaires formaient des tubes capillaires creux, les cellules hépatiques sécrétaient des protéines que le foie fournit habituellement au sang, et ainsi de suite.

Ainsi, la reconfiguration mécanique de la cellule et du cytosquelette commande le fonctionnement de la cellule. Les cellules très aplaties, dont le cytosquelette est étiré, «sentent» qu'un plus grand nombre de cellules est nécessaire pour couvrir le substrat – comme lors de la cicatrisation d'une blessure – et qu'une division cellulaire s'impose. La forme arrondie correspond à la situation où trop de cellules sont en concurrence sur la matrice ; certaines doivent mourir pour empêcher une prolifération incontrôlée et la formation d'une tumeur. Entre ces deux situations extrêmes, le tissu se comporte normalement. Cette commutation ouvre de nouvelles voies pour le traitement des cancers ou la réparation des tissus, et peut-être même pour la création de tissus artificiels.



Slim Films, d'après Donald E. Ingber

9. CE MODÈLE à base de pailles et de joints flexibles illustre la façon dont des réseaux de microfilaments comprimés peuvent se réarranger en faisceaux linéaires (en haut à droite) ou en formes géodésiques triangulées telles qu'un octaèdre (en bas à droite).



Déformation volontaire des cellules

Dans la hiérarchie de l'auto-assemblage, le niveau suivant est celui de la formation des tissus créés par la jonction de cellules entre elles et avec leur matrice extracellulaire. Une propriété capitale des tissus est leur comportement mécanique. Un très grand nombre de tissus distincts, tels que les muscles, le cartilage, les vaisseaux sanguins et la peau, réagissent selon une loi de raidissement linéaire. Quand vous tirez sur votre peau, par exemple, vous sentez la résistance s'accroître à mesure que vous tirez plus fort. À une force externe croissante s'oppose une résistance également croissante. Des travaux récents montrent que même des molécules isolées comme

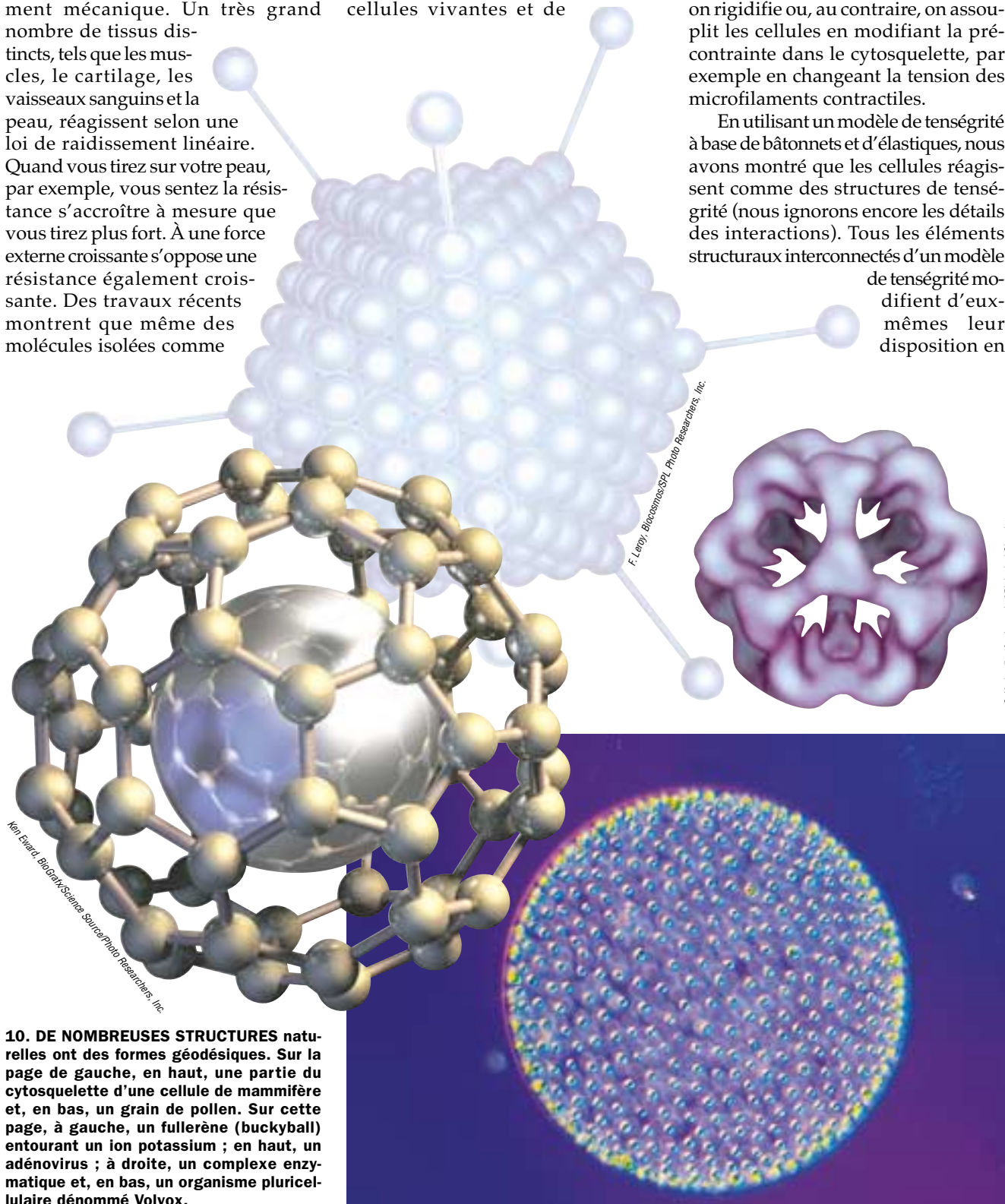
l'ADN manifestent ce raidissement linéaire ; avant le modèle de la tensegrité, il n'existait pas d'explication mécanique ou mathématique de ce comportement.

En 1993, Ning Wang et James Butler ont mis au point un dispositif permettant de déformer des molécules situées sur la membrane externe de cellules vivantes et de

mesurer simultanément les réactions cellulaires. Nous avons constaté qu'en augmentant la contrainte exercée sur les intégrines (les molécules qui traversent la membrane cellulaire et relient la matrice extracellulaire au cytosquelette interne), les cellules réagissent en augmentant leur résistance, tout comme les tissus. De plus, on rigidifie ou, au contraire, on assouplit les cellules en modifiant la précontrainte dans le cytosquelette, par exemple en changeant la tension des microfilaments contractiles.

En utilisant un modèle de tensegrité à base de bâtonnets et d'élastiques, nous avons montré que les cellules réagissent comme des structures de tensegrité (nous ignorons encore les détails des interactions). Tous les éléments structuraux interconnectés d'un modèle

de tensegrité modifient d'eux-mêmes leur disposition en



10. DE NOMBREUSES STRUCTURES naturelles ont des formes géodésiques. Sur la page de gauche, en haut, une partie du cytosquelette d'une cellule de mammifère et, en bas, un grain de pollen. Sur cette page, à gauche, un fullerène (buckyball) entourant un ion potassium ; en haut, un adénovirus ; à droite, un complexe enzymatique et, en bas, un organisme pluricellulaire dénommé Volvox.

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 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.

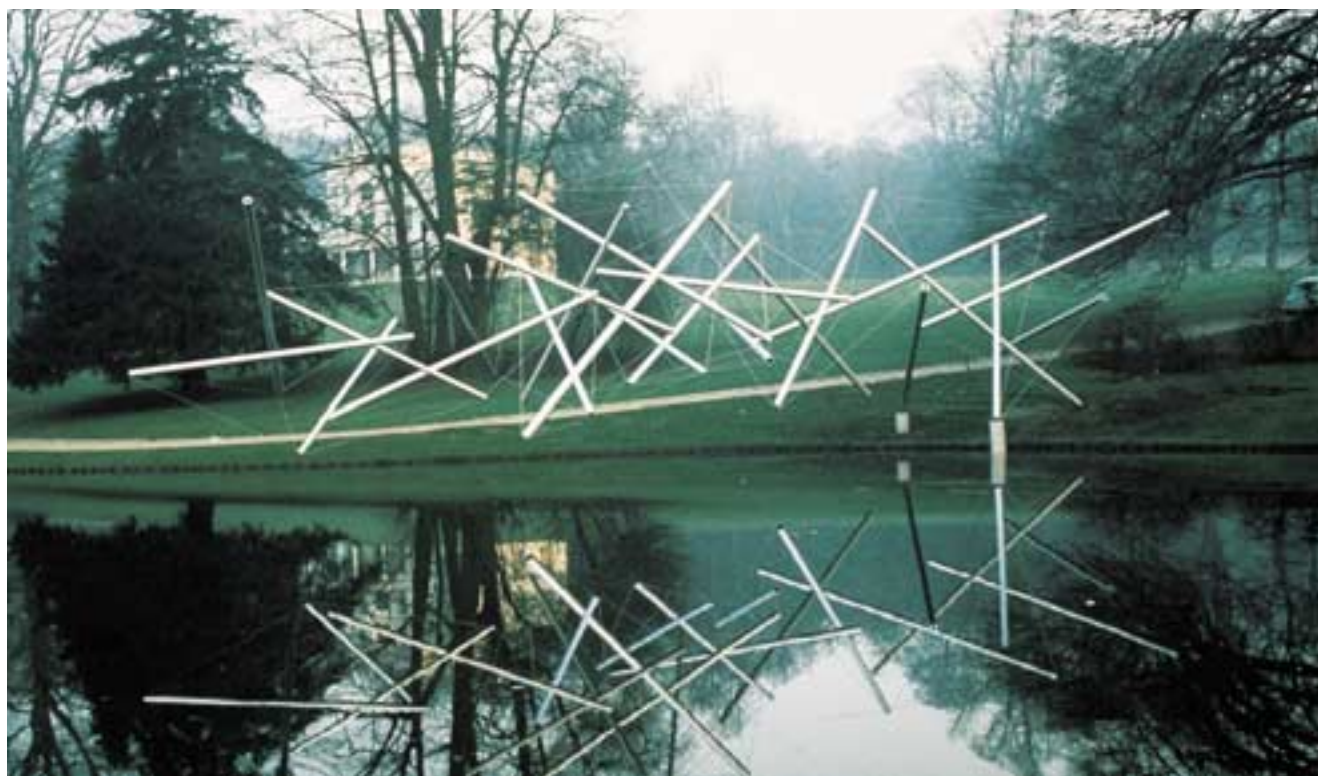
Un modèle universel?

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

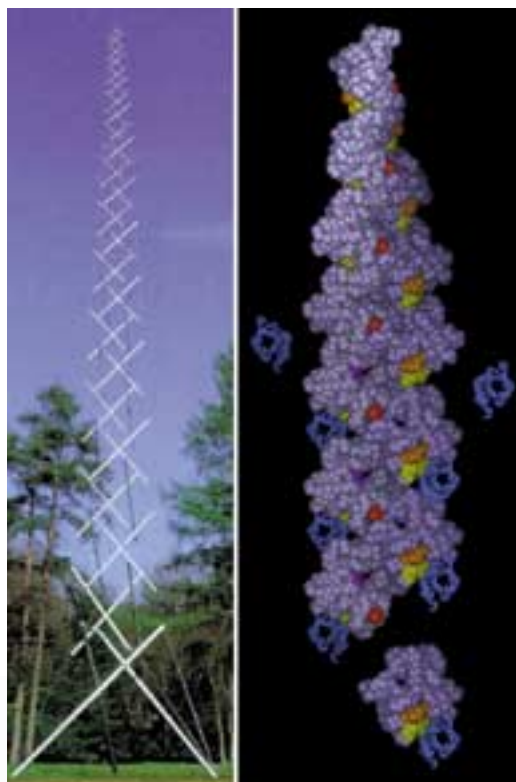
carbone d'un fullerène sont les tiges d'une sphère de tensegrité.

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 tensesgrité, 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.

L'enfouissement sous-marin des déchets radioactifs

CHARLES HOLLISTER • STEVEN NADIS

Peut-on stocker les déchets nucléaires dans les sédiments des fonds océaniques ? Les conditions sont favorables, mais des études restent à faire.

Les plaines abyssales, au centre des grandes plaques océaniques, semblent être parmi les terrains les moins valorisables de la planète. Le socle rocheux y est couvert d'une boue noire et pâteuse sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Dénuées de végétation et très peu fréquentées par la faune océanique, ces régions sont en outre dépourvues de richesses minérales.

Toutefois, nos sociétés pourraient y trouver la solution de deux problèmes lancinants : on pourrait apparemment y enfouir les déchets radioactifs issus de l'industrie électronucléaire, ainsi que les matériaux provenant du démantèlement des bombes atomiques. Les problèmes posés par ces deux types de déchets sont différents, mais l'enfouissement sous-marin serait une solution commune et définitive.

Des déchets radioactifs, barreaux de combustible usagé des centrales nucléaires et boues toxiques entreposées sur les sites de production d'armes nucléaires, ont été accumulés depuis plus d'un demi-siècle dans l'attente d'une méthode de stockage permanent. Aux États-Unis, 30 000 tonnes de combustible usagé attendent dans les bassins des centrales nucléaires, et cette quantité s'accroît d'environ 2 000 tonnes par an. Le dépôt de déchets nucléaires qui se construisait à Yucca Mountain, dans le Nevada, est aujourd'hui bloqué ; il ne devrait pas ouvrir avant 2015. En France, les centrales nucléaires produisent environ 1 200 tonnes de combustible usagé par an ; on évalue qu'en 2020, il y aura 57 000 mètres cubes de déchets de moyenne activité et 5 000 mètres cubes de déchets de haute activité.

Le problème du plutonium et de l'uranium issus du démantèlement des armes nucléaires est encore plus grave : qu'advient-il si de tels matériaux tombaient entre les mains d'individus ou d'états mal intentionnés ? Alors qu'une seule tonne de plutonium suffit à la fabrication de centaines de têtes nucléaires, les États-Unis et la Russie ont accumulé chacun plus de 100 tonnes de plutonium de qualité militaire, 50 tonnes de plutonium moins pur et des centaines de tonnes d'uranium très enrichi.

Deux méthodes de traitement des déchets sont aujourd'hui mises en œuvre, mais aucune n'apporte de solution définitive. La première est la vitrification : un mélange de plutonium militaire et d'autres déchets radioactifs est coulé dans un verre ou dans une céramique qui empêchent la fuite des atomes radioactif dans l'environnement et qui interdisent quasiment l'extraction du plutonium. Cette vitrification ne bloque toutefois pas les radiations : les déchets vitrifiés restent dangereux tant qu'ils ne sont pas entreposés dans un site approprié.

Aux États-Unis, une seule usine de vitrification a été construite, et même si elle fonctionnait à pleine capacité, elle ne produirait chaque jour qu'un seul cylindre de verre contenant à peine plus de 20 kilogrammes de plutonium, pour un coût unitaire de huit millions de francs. À ce coût, on devra ajouter celui du stockage.

La seconde méthode est la fabrication d'un combustible mixte pour les centrales nucléaires, par le mélange d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium : le combustible MOX. Cette méthode est utilisée en France. Aux

États-Unis, l'utilisation d'un tel combustible nécessiterait de profondes transformations des centrales nucléaires. De toutes façons, les réacteurs à oxyde mixte produisent d'autres déchets radioactifs.

Les déchets existent : il faut les traiter

Le gouvernement américain devra bientôt prendre une décision : depuis 15 ans, les sociétés qui exploitent des centrales nucléaires aux États-Unis paient par avance le ministère américain de l'Énergie pour le stockage ou le retraitement de leurs déchets, et les tribunaux viennent d'ordonner à ce ministère de s'acquitter de ses obligations contractuelles en acceptant, dès cette année, les barreaux de combustible usagé des centrales nucléaires. Que deviendront ces matériaux ? Le Sénat américain a voté des crédits pour la construction d'un site de stockage temporaire à Yucca Mountain, mais le président Clinton s'oppose à cette mesure provisoire.

Nous suggérons de ne rien décider dans l'urgence et, surtout, de ne prendre aucune décision irréversible. On devrait se contenter pour l'instant de transférer, selon les besoins, le combustible usagé, actuellement entreposé dans des bassins, vers des sites de stockage à sec et de colmater les conteneurs de déchets radioactifs sur les sites militaires. On doit laisser le temps aux scientifiques et aux ingénieurs d'explorer en détail les méthodes possibles de stockage permanent.

Certains ont proposé d'envoyer les déchets nucléaires dans l'espace, voire dans le Soleil, mais la plupart des