

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