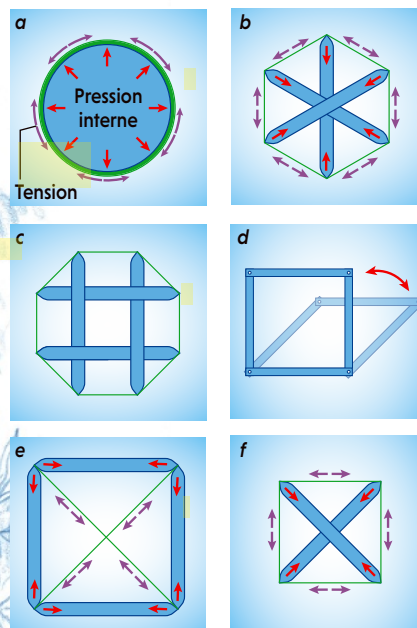
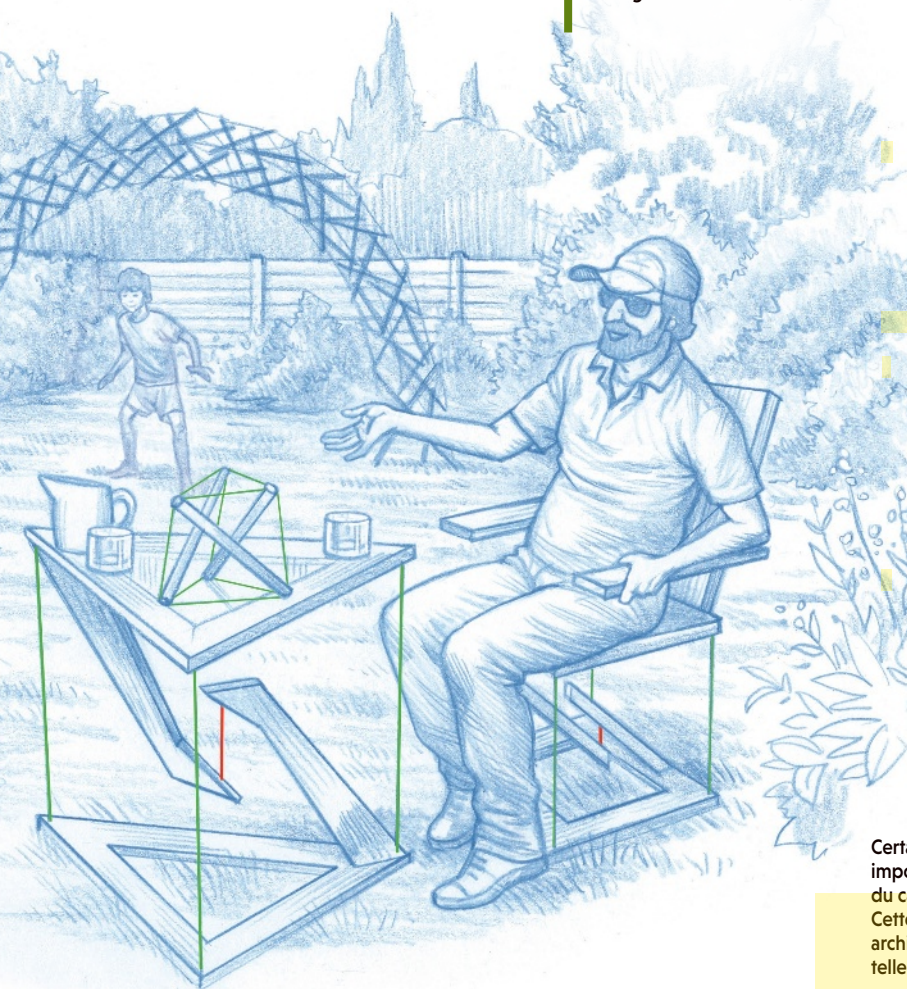


## TENSÉGRITÉ À DEUX DIMENSIONS

**U**n ballon gonflé est rigide, car la pression de l'air intérieur met en tension l'enveloppe (a). Une configuration analogue de forces de tension et de compression est à l'œuvre dans des structures rigides comme celles représentées en b et c et qui relèvent du concept de tenségrité : les câbles du contour sont en tension tandis que les tiges, dans l'intérieur, sont en compression. Un carré constitué de quatre tiges articulées à leurs extrémités n'est pas rigide (d). Pour le rigidifier, il suffit de relier les sommets opposés par des câbles (e) ; dans ce cas, les câbles sont en tension. Un théorème de dualité montre que l'on peut échanger les tiges et les câbles (f) : la structure ainsi obtenue est rigide aussi.



Certaines constructions surprennent, comme la « table impossible », dont le plateau est suspendu par le bas (à l'aide du câble rouge, les câbles verts n'assurant que la stabilité). Cette table et ces chaises évoquent des structures architecturales fondées sur le concept de tenségrité, telles que l'objet posé sur la table et l'arche.

structures dont la partie rigide en bois (mât et coque) est résistante à la compression, tandis que les éléments chargés de canaliser et transmettre au navire la force considérable du vent sont des éléments souples résistants à la tension : la toile des voiles ainsi que le cordage du gréement.

C'est ce souci de légèreté que l'on retrouve plus tard dans les premiers avions, avec une structure en bois recouverte de toile huilée et rigidifiée par de nombreux câbles tendus.

Mais où est la physique dans tout ce savoir-faire d'ingénieur ? Du côté de la théorie de la rigidité structurale, dont les bases ont été posées au XIX<sup>e</sup> siècle par James Clerk Maxwell (1831-1879). Ce

grand physicien écossais s'est intéressé aux conditions nécessaires pour assurer la rigidité d'une structure composée de barres rigides assemblées entre elles par des articulations flexibles (charnières, pivots...). Seuls les résultats pour des structures à deux dimensions nous seront utiles pour la suite.

Un triangle formé de trois barres jointes à leurs extrémités est ainsi une structure naturellement rigide. Ce n'est en revanche pas le cas d'un carré, qui peut se déformer en losange si l'on agit sur les deux sommets opposés d'une diagonale (voir l'encadré ci-dessus, d).

Une façon de rigidifier le carré est d'y adjoindre une barre qui rejoint justement

ces deux sommets opposés. Selon que l'on cherche ensuite à écarter ou à rapprocher ces sommets, cette barre se trouvera soit en tension, soit en compression. Il est toutefois possible de rigidifier le carré avec uniquement deux câbles tendus, qui relient chacun les deux paires de sommets opposés. On obtiendra une structure d'autant plus rigide que ces câbles sont tendus et les barres se trouveront alors en compression.

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> À partir de cette situation, la magie de la tensegrité peut opérer: un théorème de dualité indique que l'on peut obtenir, à partir d'une structure rigide barres-câbles comme celle que nous venons d'envisager, une autre structure rigide en remplaçant tous les câbles par des barres et toutes les barres par des câbles. Attention, cependant: la structure obtenue est rigide, mais pas nécessairement stable!

Qu'obtient-on avec notre exemple? Un carré formé de câbles tendus, maintenu rigide grâce à deux barres en croix, qui sont en compression. On a donc un contour sous tension et un intérieur en compression... De façon assez inattendue, on retrouve le même arrangement de forces que dans un ballon: son contour est une membrane souple tendue et l'intérieur est de l'air sous pression, le ballon étant d'autant plus rigide que la pression de l'air intérieur est importante.

### UNIQUEMENT DES CÂBLES ET DES BARRES

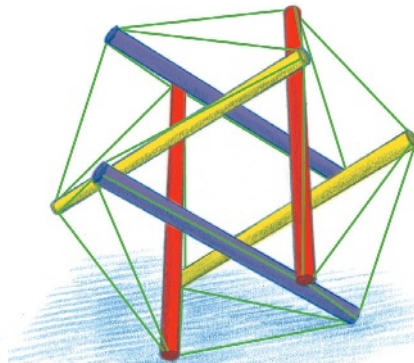
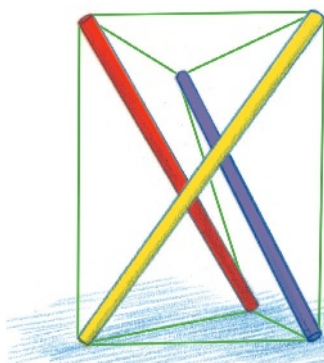
La tensegrité est la généralisation de ce schéma, le rôle de la surface du ballon étant en général tenu par un filet de câbles et celui de l'air intérieur par des barres. À trois dimensions, l'objet le plus simple est composé de trois barres et neuf câbles (voir l'encadré ci-contre). L'enveloppe est constituée des arêtes d'un prisme triangulaire. Cette structure a été proposée dans des brevets déposés autour des années 1960 par trois personnes qui se sont disputé la paternité du concept: Fuller déjà cité, l'architecte et ingénieur français d'origine hongroise David Georges Emmerich et le sculpteur américain Kenneth Snelson.

Les titres de leurs brevets sont instructifs. Le brevet d'Emmerich est explicite sur la nature de l'objet: «Construction de réseaux autotendants» (1963). Celui de Fuller, «Tensile-integrity structures» (1962), donnera par contraction le nom de tensegrité. Et celui de Snelson, plus conceptuel, explicite les caractéristiques des dispositifs: «Continuous tension, discontinuous compression structures» (1965). Ces origines multiples se retrouvent dans la définition admise aujourd'hui: «Un système de tensegrité est un système qui est dans un état stable auto-équilibré qui comprend un ensemble discontinu de composants en compression à l'intérieur d'un continuum de composants en tension.»

De même que l'on obtient des structures gonflables complexes par assemblage de ballons, on peut concevoir des

## TENSÉGRITÉ À TROIS DIMENSIONS

À trois dimensions, l'objet rigide le plus simple qui relève du concept de tensegrité est composé de trois barres, dont les extrémités sont reliées par neuf câbles (à chaque extrémité, trois câbles se rejoignent). Sur le même principe, on peut construire des structures rigides comportant davantage de barres, comme l'objet à six barres représenté ci-dessous à droite. En plus d'arches et tours construites ainsi dans un but artistique ou pour illustrer la tensegrité, certains édifices exploitent cette idée, comme le pont Kurilpa, à Brisbane, en Australie, inauguré en 2009.



structures en tensegrité par l'assemblage de modules élémentaires. C'est ainsi que sont conçus les exemples les plus célèbres et les plus frappants de tensegrité: des arches (voir l'illustration pages 88-89) ou des tours comme la *Needle Tower II*, de Snelson, installée dans le jardin d'un musée néerlandais.

### TENSÉGRITÉ, VRAIMENT?

Qu'en est-il de notre «table impossible»? Elle est bien composée d'éléments solides et de câbles. Le câble central assure la sustentation. Son extrémité supérieure est accrochée à la base tandis que l'extrémité inférieure est accrochée au plateau. Autrement dit, le plateau est suspendu à la base par ce câble.

Mais le centre de gravité du plateau est situé bien au-dessus du point d'attache. S'il n'y avait que ce câble, le plateau basculerait donc instantanément. C'est la raison d'être des câbles périphériques: ils assurent la stabilité du plateau, tout comme les haubans assurent la stabilité d'un poteau. Cependant, le câble central et les câbles périphériques n'exercent pas sur le plateau des contraintes de compression, mais de flexion; et, surtout, ces câbles ne dessinent pas une structure continue.

Aussi étonnante soit-elle, cette table n'est donc pas du tout un prototype de tensegrité! Au moins aura-t-elle eu le mérite de remettre au goût du jour des structures qui laissent le spectateur perplexe et admiratif, même lorsqu'il en comprend les principes. ■

### BIBLIOGRAPHIE

Y. Bansod et al., **Overview of tensegrity – I: Basic structures**, *Engineering Mechanics*, vol. 21(5), pp. 355-367, 2014.

R. Motro, **Tensegrité**, Hermès-Lavoisier, 2005.

A. Pugh, **An Introduction to Tensegrity**, University of California Press, 1976.