

# Systèmes réticulés spatiaux en état de tensegrité

par René MOTRO

Ces compositions structurales de câbles et de butons sont en état d'auto-équilibre stable. Après un demi-siècle de recherche scientifique, les premières réalisations d'envergure en construction voient enfin le jour. Des applications en conquête spatiale et en biologie sont même envisagées.

**René MOTRO** est professeur à l'université de Montpellier-II. Il est directeur du laboratoire de mécanique et génie civil (LMGC/UMR CNRS 5508).  
motro@lmgc.univ-montp2.fr  
<http://www.lmgc.univ-montp2.fr/CS/motro.html>

## 1. Définition

Les systèmes réticulés spatiaux ont connu un essor remarquable dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle [1]. Les constructeurs les ont utilisés sous diverses configurations : grilles planes à double nappe, voûtes cylindriques, coupôles... Ils sont principalement constitués de composants à fibres moyennes rectilignes, qui sont sollicités uniquement par un effort normal de compression ou de traction. Cet état de sollicitation économique par rapport aux états induisant de la flexion ne peut être réalisé que lorsque les fibres moyennes des **barres** (c'est le nom qu'on leur donne pour les différencier des poutres) sont coïncidentes. Cette nécessité d'ordre mécanique se combine avec les impératifs technologiques pour définir les impératifs que doivent satisfaire les solutions technologiques retenues pour les nœuds d'assemblage.

Une classe particulière de systèmes réticulés spatiaux comprend les systèmes **autocontraints** et en état de **tensegrité**.

On peut donner des exemples de **systèmes réticulés autocontraints** pour des géométries linéaires (cas d'un câble à l'intérieur d'un tube avec un dispositif de raccourcissement du câble associé, figure **1a**), plane (croix de Saint-André, figure **1b**) dont les diagonales peuvent être raccourcies pour mettre le système en tension et spatiale (octaèdre avec trois diagonales tendues qui reconstituent la croix de Saint-André dans l'espace tridimensionnel, figure **1c**). Dans tous les cas, il existe initialement un état de sollicitation des éléments qui résulte des dimensions des composants et de leur assemblage, indépendamment de toute action extérieure. Ils sont autocontraints.

Le mot **tensegrité** n'appartient pas au vocabulaire courant. C'est un néologisme dérivant du mot anglais *tensegrity* proposé par Richard Buckminster Fuller [2]. Il voulait ainsi qualifier un état de « tension intégrale » (*tensional integrity* qui par contraction donne *tensegrity*) en référence à un concept « d'ilôts

de compression dans un océan de traction » qu'il souhaitait pouvoir réaliser.

L'état de tensegrité d'un système peut être décrit comme « un état d'autoéquilibre stable du système, dont les composants comprimés constituent un ensemble discontinu à l'intérieur d'un ensemble continu de composants tendus » [3].

### Repères historiques

Les systèmes réticulés appartiennent de longue date au vocabulaire des ingénieurs. Ils font le quotidien des charpentes dont sont constituées nombre de constructions. On peut dire qu'après les études théoriques de ce que l'on a appelé l'« école suisse » dans le domaine de la statique graphique, des réalisations exemplaires comme celles d'Eiffel ont placé les constructions réticulées à un niveau remarquable. Leur légèreté en particulier autorise des prouesses intéressantes ; la nécessité de couvrir des espaces toujours plus importants sans points d'appuis intermédiaires a favorisé le développement des systèmes réticulés spatiaux dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Il a toutefois fallu attendre les quinze dernières années pour que l'autocontrainte des systèmes réticulés soit appliquée pour des systèmes très spécifiques qui sont dans un état dit de « tensegrité ». Les premières études dataient pourtant des années 1950. Il a fallu une clarification mécanique, associée à un développement des systèmes « tendus » (pour lesquels certains composants comme les câbles ont une rigidité unilatérale), pour que l'on voit les premières réalisations industrielles. Elles se font désormais de plus en plus nombreuses dans des situations très variées.

Certains systèmes réticulés spatiaux autocontraints répondent à cette définition avec quelques particularités :

- comme tous les systèmes réticulés, leurs composants ne sont soumis qu'à des sollicitations de traction ou de compression simple, pourvu que la coïncidence des fibres moyennes des éléments soit assurée ;
- ils sont soumis à un état d'autocontrainte initial. Les composants tendus (les câbles) n'ont pas de rigidité en compression, et la conception de ces systè-

**Sur les systèmes réticulés spatiaux :**  
*Structures réticulées spatiales* [C 2 575] de J. Mouty  
*Constructions métalliques. Structures à câbles* [C 2 580] de J.-P. Laute

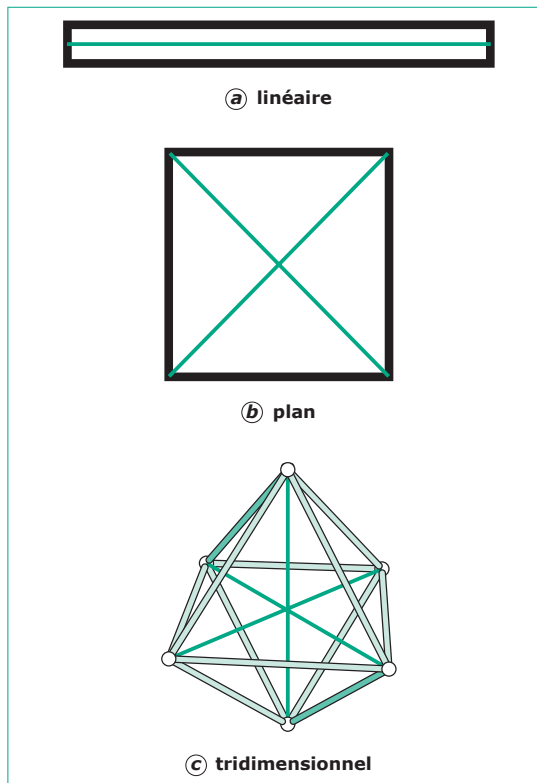


Figure 1 – Systèmes autocontraints

mes doit tenir compte de cette unilatéralité en évitant toute sollicitation de compression dans ces composants autant dans l'état initial non chargé que dans les états chargés. Cette condition porte le nom de condition de **conformité** ;

- ces systèmes réticulés acquièrent leur rigidité par l'autocontrainte qui stabilise les éventuels mécanismes infinitésimaux ;

- deux caractéristiques importantes sont d'ordre topologique : la continuité ou la discontinuité d'une part, l'intériorité d'un ensemble par rapport au second d'autre part.

Ils constituent en cela une sous-classe des systèmes réticulés spatiaux autocontraints. C'est le cas du système à trois composants comprimés (butons) et neuf composants tendus (câbles), plus petit système tridimensionnel satisfaisant les caractéristiques énoncées. Certains auteurs, comme David Georges Emmerich [4], lui donnent le nom d'*equilibrium* élémentaire ou encore de *simplex* (figure 2). Si, en outre, les butons sont de même longueur  $s$  et les câbles de longueur identique  $c$ , le système est qualifié de régulier.

En raison de leurs spécificités, la conception de ces systèmes est délicate : leur géométrie (tant du point de vue topologique que du point de vue dimensionnel) doit permettre la mise en œuvre d'autocontraintes conformes au sens défini précédemment. Ce sont de fait deux objectifs que doivent satisfaire les concepteurs, un de ces objectifs est associé à la géométrie, l'autre à l'état d'autocontrainte initial.

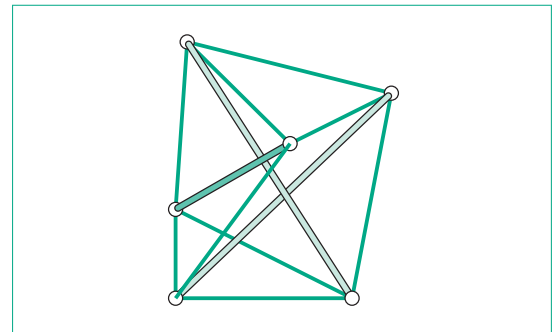


Figure 2 – *Equilibrium* élémentaire ou *simplex*

## 2. Quelques concepts fondamentaux

### 2.1 Sur la géométrie d'autocontrainte

La géométrie doit satisfaire la condition d'équilibre lors d'une mise en autocontrainte. Plusieurs approches sont possibles pour définir la ou les géométries associées, dans le cas d'un système dont on connaît les composants (nœuds, butons et câbles) et le mode d'assemblage (liste des composants avec les nœuds extrémités qui traduit la structure relationnelle du système).

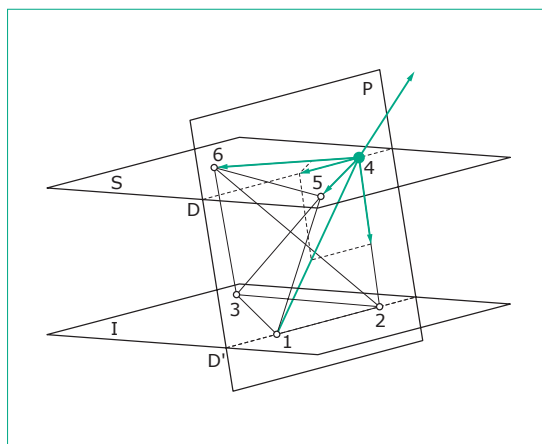
Il existe une bibliographie très abondante sur le sujet : des modèles physiques, des méthodes numériques diverses, des considérations statiques ou dynamiques, quelquefois des méthodes analytiques permettent d'atteindre le résultat requis.

Dans le cas du *simplex*, on peut par exemple étudier la statique d'un nœud en dehors de toute action extérieure (ils sont tous équivalents). Ainsi, le nœud 4 (figure 3) reçoit trois câbles et un bouton ; deux de ces câbles sont identiques, ils sont situés sur le plan supérieur (on parle de câbles de nappe), leur action résultante sur le nœud 4 est portée par la bissectrice de l'angle au sommet du triangle équilatéral. En conséquence, la condition nécessaire d'équilibre du nœud considéré correspond au fait que le plan  $P$  défini par les deux autres éléments, le bouton et le câble d'entretoisement, contienne cette bissectrice. Cette bissectrice  $D$  est l'intersection du plan supérieur  $S$  et de  $P$  qui coupe le plan inférieur  $I$  selon une droite  $D'$  qui porte un côté du triangle de nappe inférieure. Les plans  $S$  et  $I$  étant parallèles, les droites  $D$  et  $D'$  le sont aussi. Deux géométries spatiales satisfont cette condition nécessaire : elles sont qualifiées de *lévogyre* et de *dextrogyre*.

On retrouve ce résultat avec les autres méthodes évoquées. Il correspond à une rotation relative de  $30^\circ$  d'un des triangles de câbles de nappe par rapport à l'autre.

### 2.2 Sur l'autocontrainte

L'autocontrainte est définie à une constante près par la valeur des efforts internes dans chaque élément en l'absence de toute action extérieure. Ces efforts internes résultent des déformations nécessaires pour assurer l'assemblage des éléments



**Figure 3 – Condition nécessaire d'équilibre sous autocontrainte : cas du simplex**

lors de la construction. On peut illustrer cet état d'autocontrainte dans le cas de l'exemple précédent. Si l'on considère par exemple une valeur unité pour la compression dans le buton, une première décomposition graphique peut donner la valeur de la tension dans le câble d'entretoisement et dans le câble fictif ; une deuxième décomposition de celui-ci selon les deux côtés du triangle équilatéral donne la valeur des tensions dans les câbles de nappe.

## 2.3 Sur les mécanismes

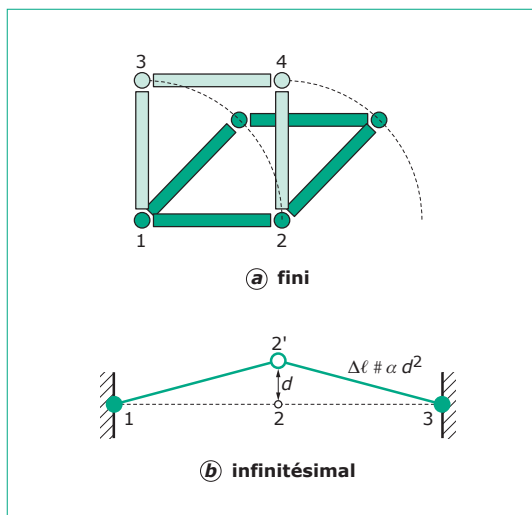
Les systèmes réticulés spatiaux en état de tensegrité peuvent être le siège de mécanismes. Il n'est pas question ici des mouvements d'ensemble des solides, on suppose que les conditions aux limites interdisent de tels déplacements.

L'ordre de grandeur des déformations des composantes associées aux mécanismes conduit à distinguer deux types principaux de mécanismes :

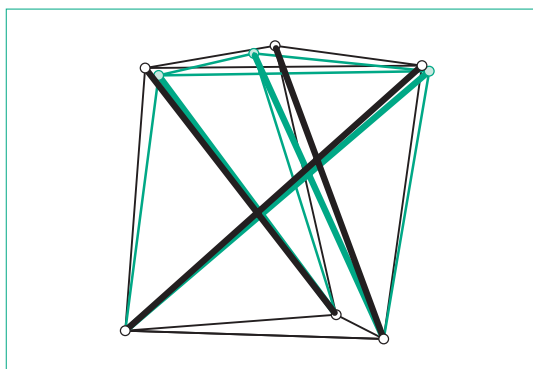
- des **mécanismes finis** pour lesquels la géométrie du système peut être modifiée sans aucune déformation pour chacun des éléments. C'est par exemple le cas d'un cadre plan comportant quatre nœuds et quatre barres dont la géométrie peut être modifiée par une action de type « cisaillement » (figure 4a) ;

- les **mécanismes infinitésimaux** se traduisent par une modification de la géométrie d'ensemble associée à des déformations faibles (infinitésimales) des composants. On « active » ces mécanismes en appliquant certaines actions spécifiques aux nœuds des systèmes qui n'ont pas de rigidité dans la direction de l'action d'activation. On peut décrire un exemple simple pris hors du champ des systèmes en tensegrité : on considère trois nœuds et deux composants rectilignes alignés (figure 4b). Les nœuds 1 et 3 sont fixes ; une action telle que celle que l'on peut appliquer au nœud 2 active le mécanisme et induit des déformations d'allongement de deuxième ordre par rapport à la longueur des composants.

Un ensemble d'actions appliquées sur les trois nœuds supérieurs du simplex, conformément au schéma de la figure 5, active un mécanisme du



**Figure 4 – Mécanismes**



**Figure 5 – Simplex : mécanisme infinitésimal**

simplex qui est composé d'une rotation du triangle supérieur associée à une translation verticale ascendante ou descendante de ce triangle. Il est possible de démontrer théoriquement que c'est le seul mécanisme infinitésimal pour le simplex.

## 2.4 Sur la stabilisation des mécanismes infinitésimaux par les états d'autocontrainte

La notion de stabilisation correspond à un retour à la position initiale, par l'énergie acquise dans la déformation induite par le mécanisme, après annulation de la cause de son activation. On pourrait considérer que les mécanismes infinitésimaux sont inacceptables s'ils ne sont pas « contenus, stabilisés » par l'état mécanique du système. Selon les cas, l'autocontrainte peut ou non assurer cette stabilisation. L'exemple de la figure 4b pris hors du domaine des systèmes de tensegrité illustre le propos. Si les longueurs de fabrication des composants  $\ell_{12}$  et  $\ell_{23}$  sont plus importantes que les distances géométriques

$d_{12}$  et  $d_{23}$  correspondantes, il est nécessaire de comprimer ces barres pour les aligner. Cet état est instable. Si on déplace le nœud 2, si donc on active le mécanisme infinitésimal, les deux barres retrouvent leur longueur de fabrication initiale, il n'y a plus d'énergie interne dans le système qui ne revient pas dans l'état aligné lorsque l'action d'activation disparaît. Il est facile de concevoir, à l'inverse, qu'un état de tension initiale stabiliserait un tel système. Dans le mécanisme, l'énergie de déformation par allongement augmente et autorise un retour à l'état initial si l'on supprime l'action extérieure.

On peut traiter théoriquement le cas des systèmes en état de tenségrité ; de nombreux travaux ont été publiés sur ce sujet, dont en particulier celui de Nicolas Vassart [5]. L'unilatéralité de rigidité des composants a des conséquences importantes, peu familières pour les ingénieurs. Ainsi, dans le cas du simplex, l'état d'autocontrainte stabilise le mécanisme infinitésimal, mais une transformation duale (buton pour câble et vice versa) conduit à une situation dans laquelle le mécanisme n'est pas stabilisé.

**En conclusion**, il faut insister sur le fait que l'étude de la stabilisation des mécanismes infinitésimaux par les états d'autocontrainte constitue une des étapes importantes de l'analyse des systèmes en état de tenségrité.

## 2.5 Généralisation

Les concepts fondamentaux présentés, géométrie d'autocontrainte, autocontrainte, mécanismes, stabilisation des mécanismes, constituent une base caractéristique d'étude. Illustrés ici avec des exemples volontairement simples, ils sont valables pour des constructions plus complexes. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre des solutions générales et de développer des méthodes numériques associées pour rechercher les géométries d'autocontrainte, pour identifier les bases vectorielles d'autocontrainte, celles des mécanismes ; il faut également vérifier la conformité des sollicitations induites avec les rigidités unilatérales de certains composants.

## 2.6 Classification des systèmes réticulés et place des systèmes en état de tenségrité

Il est utile de replacer les systèmes en tenségrité dans le cadre général des systèmes réticulés dont les composants sont soumis soit à de la compression, soit à de la traction. Une classification pertinente repose sur le nombre d'états d'autocontrainte  $ss$  et sur celui des mécanismes infinitésimaux  $m$ . Dans le cas général, on peut écrire l'équilibre d'un système réticulé spatial sous la forme :

$$[A] \cdot \{t\} = \{F\} \quad (1)$$

Dans cette expression,  $[A]$  est la matrice d'équilibre du système : son nombre de lignes est égal au nombre de degrés de liberté du système généralement noté  $N$ , le nombre de colonnes est égal au nombre  $b$  des composants (appelés barres lorsqu'ils peuvent équilibrer indifféremment de la compression

et de la traction). La valeur de  $N$  est reliée à celle du nombre de nœuds  $n$  par la relation classique :

$$N = 3n - 6 \quad (2)$$

En effet, il existe trois degrés de liberté de translation par nœud et il est nécessaire de bloquer six degrés de liberté pour éviter tout mouvement d'ensemble du système.

On peut par ailleurs, par une étude d'algèbre linéaire, retrouver les deux relations suivantes établissant la valeur de  $ss$  et de  $m$ , en fonction de  $N$ ,  $b$  et  $r_A$ , qui est le rang de la matrice d'équilibre :

$$m = N - r_A \quad (3)$$

$$ss = b - r_A \quad (4)$$

Quatre classes de systèmes réticulés peuvent ainsi être identifiées (tableau 1).

**Tableau 1 – Classes de systèmes réticulés**

Classe	$r_A$	$ss, m$	Caractéristiques
1	$r_A = b$ $r_A = N$	$ss = 0$ $m = 0$	Systèmes statiquement et cinématiquement déterminés
2	$r_A = b$ $r_A < N$	$ss = 0$ $m = N - r_A$	Systèmes cinématiquement indéterminés
3	$r_A < b$ $r_A = N$	$ss = b - r_A$ $m = 0$	Systèmes statiquement indéterminés
4	$r_A < b$ $r_A < N$	$ss = b - r_A$ $m = N - r_A$	Systèmes statiquement et cinématiquement indéterminés

L'indétermination cinématique est associée à l'unicité de définition géométrique. En pratique, les systèmes réticulés « classiques » sont ceux de la classe 1. On est assuré dans cette situation de la possibilité de déterminer les efforts internes et d'éviter tout mécanisme, fut-il infinitésimal. La règle connue sous le nom de « règle de Maxwell » exprime l'égalité entre nombre de barres et nombre de degrés de liberté, ce qui, sur le plan mathématique, atteste de la possibilité d'inverser la matrice d'équilibre, puisqu'elle est carrée.

Les systèmes réticulés autocontraints en état de tenségrité sont généralement de la classe 4, mais on peut avoir aussi des exemples en classe 3 pour lesquels il n'existe pas de mécanismes infinitésimaux. Dans les situations pratiques, il est souvent très simple d'annuler les mécanismes infinitésimaux en choisissant des conditions aux limites appropriées, ce que les ingénieurs savent très bien faire.

## 3. Histoire et actualité

### 3.1 Travaux des précurseurs

Certains auteurs se réfèrent aux constructivistes russes [6] pour exhumer les racines conceptuelles des systèmes réticulés en état de tenségrité. Il est vrai que la construction proposée par Karl Iogansen en 1921 (figure 6), lors d'une exposition manifeste de ce groupe, fait penser au simplex précédemment décrit (figure 2).

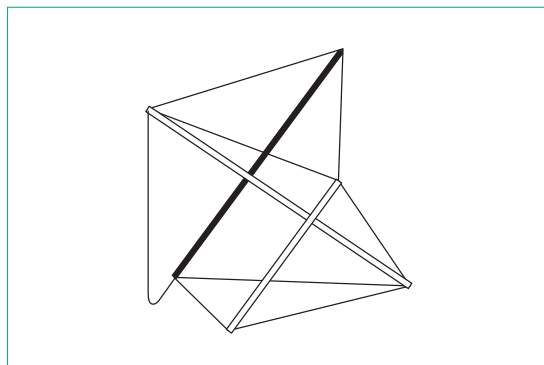


Figure 6 – Sculpture de Karl Iogansen, 1921

L'histoire ne dit pas si Kenneth Snelson, David Georges Emmerich et Richard Buckminster Fuller ont vu cette sculpture qui, présentant des mécanismes finis, ne peut être considérée comme étant en état de tensegrité. Néanmoins, l'histoire retiendra que ces trois hommes ont déposé des brevets dans une période relativement courte, entre 1959 et 1965, sans que la chronologie puisse établir clairement l'antériorité conceptuelle. Il reste qu'un examen minutieux de ces brevets met en évidence l'originalité de la démarche du sculpteur Kenneth Snelson. Lors de sa rencontre avec Fuller en 1948, il a entrepris une série de réalisations qui l'ont conduit de proche en proche à la constitution de systèmes en état de tensegrité ; *One to another*, *One to the next* et finalement *Double X* marquent les étapes de sa réflexion et nous les avons décrites précisément par ailleurs [7]. Il faut noter particulièrement le rôle qu'il fait jouer à un module élémentaire que l'on peut qualifier d'écarteur : il s'agit en fait d'un cadre de câbles avec une croix de Saint-André, en état d'autocontrainte. Lorsque l'on rompt l'un des câbles, le fonctionnement du système est caractérisé par une tendance à l'écartement des nœuds 1 et 2. En fait, cet ensemble est équivalent à un vérin agissant dans la direction 12 (figure 7).

La suite des réalisations de Snelson est tout à fait remarquable et nombre de personnes ont été surprises et fascinées par sa « tour aiguille » (*Needle Tower*) de 30 m de haut, longuement exposée dans les jardins du Hisshorn Museum à Washington (figure 8). Cette tour marque une rupture dans la culture constructive, elle met en évidence le fait que nos habitudes reposent sur un mode de compréhension entièrement conditionné par les effets directs et indirects de la gravitation terrestre. Ce n'est plus le cas pour les systèmes en état de tensegrité.

### 3.2 Place dans les structures légères

On peut s'interroger sur les raisons du non-développement de ce type de construction dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, alors que leur apparition est contemporaine de celle des membranes textiles et des réseaux de câbles entre 1950 et 1960. Plusieurs facteurs expliquent cette apparition tardive et celui des méthodes de modélisation n'est pas le moindre. En effet, si le début des années 1970 voit la

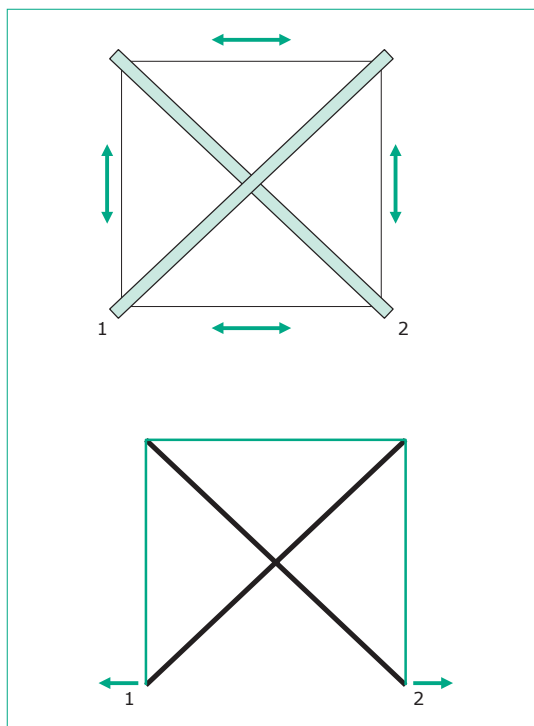


Figure 7 – Extrait du brevet de Kenneth Snelson et interprétation mécanique (d'après [8])



Figure 8 – *Needle Tower*, Kenneth Snelson, 1966

naissance de nombreuses structures spatiales à barres sous l'impulsion de chercheurs et ingénieurs européens comme Z.S. Makowski ou Max Meringhausen, la fin de cette décennie est marquée par les réalisations de Frei Otto à Montréal et Munich. À ce propos, on sait que Richard Buckminster Fuller ambitionnait de construire le Pavillon américain à Montréal en utilisant le principe de la tensegrité, il n'a pu le faire faute des connaissances de l'époque, non



seulement dans le domaine des moyens de calcul mais aussi dans celui de la modélisation mécanique de constructions, qui ne répondaient pas aux principes connus à ce moment ; l'indétermination cinématique et la souplesse exigeant des calculs non linéaires n'étaient pas assez maîtrisées. C'est certainement pour cela que David Georges Emmerich avait privilégié des études purement géométriques pour ce qu'il appelait des structures « autotendantes », au risque d'avoir quelques résultats, fort peu nombreux d'ailleurs, démentis par des études plus mécaniques.

Les réseaux de câbles avaient bénéficié de travaux de recherche importants dans ces années. Ainsi Nicolas Esquillan, par ailleurs ingénieur du Palais du CNIT à Paris, avait organisé en 1962 dans la capitale française un congrès de l'Association internationale pour les coques et structures spatiales dont le thème était celui des structures tendues. On retrouve dans les actes de cette réunion scientifique, des noms qui ont marqué la suite de l'histoire des structures légères, et en tout premier lieu celui de Frei Otto, qui rend hommage dans son texte à Bernard Laffaille, un autre ingénieur français. Celui-ci avait proposé vainement un réseau de câbles pour le CNIT. Finalement, malgré l'échec de l'émetteur d'Europe 1, c'est lui qui a introduit les systèmes précontraints dans le domaine de l'architecture métallique, suivi bientôt par un de ses collaborateurs, René Sarger, qui terminera la couverture de la cathédrale de Royan après son décès.

### 3.3 Recherches récentes

Outre les problèmes purement mécaniques, c'est celui de la recherche de forme basée sur un dialogue entre géométrie et forces, entre visible et invisible, qui a posé les problèmes les plus difficiles. Comment concevoir une composition structurale avec des éléments sans rigidité de compression qui autorise une mise en autocontrainte ? C'est ainsi que l'on peut poser cette question qui a désormais reçu de nombreuses réponses comme en témoigne l'étude bibliographique réalisée récemment par S. Pellegrino et G. Tibert pour l'*International Journal of Space Structures* [9].

Le principe même des systèmes de tensegrité avait de quoi séduire les constructeurs et les ingénieurs audacieux. On affirme souvent que les dômes câbles comme celui d'Atlanta (Georgia Dome) sont des systèmes en état de tensegrité. Tous ne s'accordent pas

sur ce point. La présence d'un important anneau périphérique de compression est au centre des débats. Dans ce cas, la compression n'est pas à l'intérieur de la traction. Mais, en fait, la discussion ne doit pas se faire par rapport à une définition mais par rapport à un comportement mécanique : l'importance des efforts de compression dans ce composant peut induire des instabilités de forme qui justifient ses dimensions. Toutefois, il existe et il existera de mauvaises constructions en état de tensegrité et il existe d'excellentes solutions qui ne doivent rien à ce concept, comme en témoigne le Georgia Dome dont la portée de 246 m constitue un record comparable à celui du ...CNIT.

## 4. Premières réalisations

Après une trop longue période d'incertitude sur l'applicabilité des systèmes en état de tensegrité à la construction, le début du XXI<sup>e</sup> siècle a vu apparaître les premières réalisations. Elles ont été dans un premier temps le fait de chercheurs avant d'être mises en œuvre par des constructeurs comme ceux qui ont érigé des structures dans le cadre de l'Exposition suisse en 2002.

### 4.1 Des cellules élémentaires aux assemblages

Les premières maquettes, à des échelles diverses, ont été consacrées à des cellules élémentaires comme celles présentées sur la figure 9. Dans le premier cas, le rapport entre longueurs de composants comprimés et de composants tendus est égal à 1,47 ; dans le second à 1,55 ; le troisième à 1,63 (ces résultats sont obtenus par une recherche de forme d'équilibre). En fait, le troisième peut être considéré comme un assemblage de deux systèmes à trois butons.

Il est possible d'assembler plusieurs cellules élémentaires pour constituer une grille plane à double nappe (figure 10a) : les cellules étant elles-mêmes des « briques » autocontraintes, le résultat l'est aussi. Il est également possible de donner une double courbure à ces assemblages (positive comme sur la figure 10b, mais aussi négative).

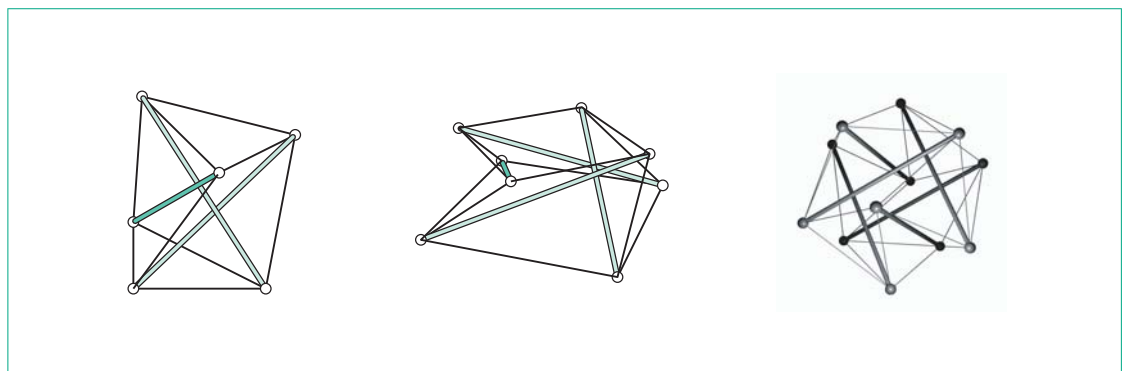


Figure 9 – Cellules élémentaires

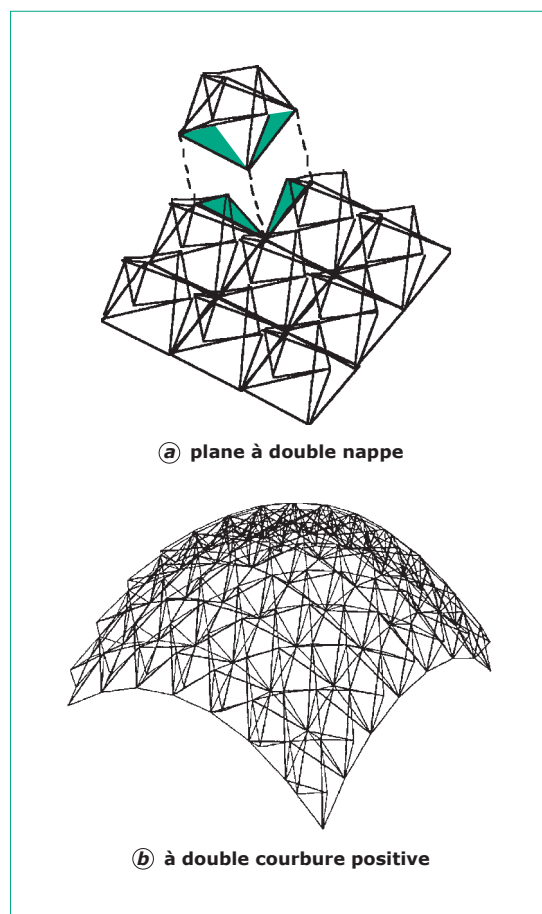


Figure 10 – Grilles constituées de cellules élémentaires

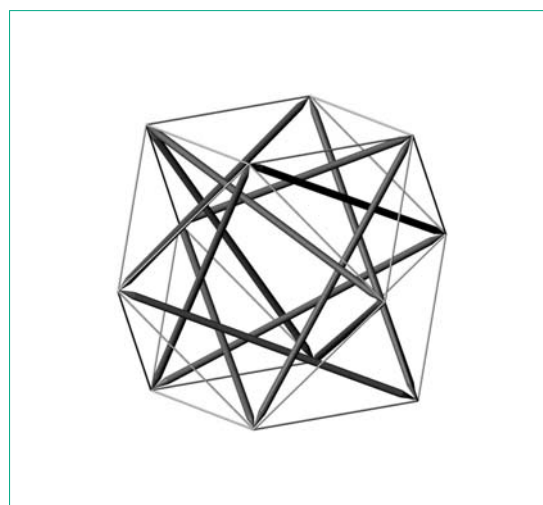


Figure 11 – Cuboctaèdre avec composants comprimés triangulaires

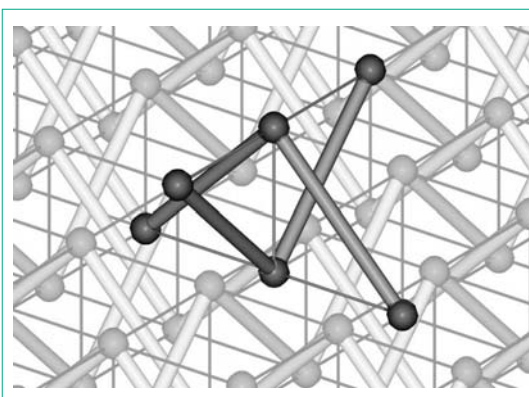


Figure 12 – Écarteur

Les cellules élémentaires ne comportent pas uniquement des composants linéaires comme dans les exemples des figures 9 et 10. Des composants d'ordre supérieur peuvent être constitués comme pour la cellule élémentaire de la figure 11.

Les composants comprimés sont ici des triangles entrelacés. Il y en a quatre dans le volume géométrique d'un polyèdre semi-régulier connu, le cuboctaèdre. La matière des composants triangulaires est comprimée.

## 4.2 Cas des systèmes « tissés »

Nos propres recherches nous ont conduit à concevoir des systèmes « tissés » [10]. Il ne s'agit plus dans ce cas d'une agglomération de modules mais d'une composition structurale plus complexe. Cette dénomination correspond en fait à l'entrelacement de composants comprimés. Cette conception est le fruit d'une collaboration industrielle pour une thèse de doctorat de Viniçius Raducanu [11]. La composition repose sur le principe d'un écarteur qui permet une mise en auto-contrainte en zone « courante » (figure 12).

Une grille de plus de 80 m<sup>2</sup> a été construite en 2000 sur ce principe de tissage (figure 13). Cette réalisation a permis en particulier de s'assurer de l'incidence faible des tolérances de fabrication sur la géométrie résultante. Nous avons également pu élaborer une procédure de mise en œuvre de l'auto-contrainte qui permet d'atteindre simultanément la double cible géométrique et sthénique caractéristique des systèmes en état de tenségrité.

## 4.3 Premières réalisations

Les réalisations de systèmes réticulés spatiaux en état de tenségrité commencent à se multiplier. La plus exemplaire est certainement l'Arteplage réalisée pour l'Exposition suisse en 2002 à Yverdon-les-Bains (figure 14). Dessinée par les architectes new-yorkais Diller et Scofidio, cette structure a été calculée par le bureau d'études suisse Passera & Pedretti qui a largement investi ce nouveau domaine d'exercice. Il s'agit dans ce cas d'une composition structurale basée sur un module dont les composants comprimés de base sont un carré et un « poteau volant » comprimé. Les

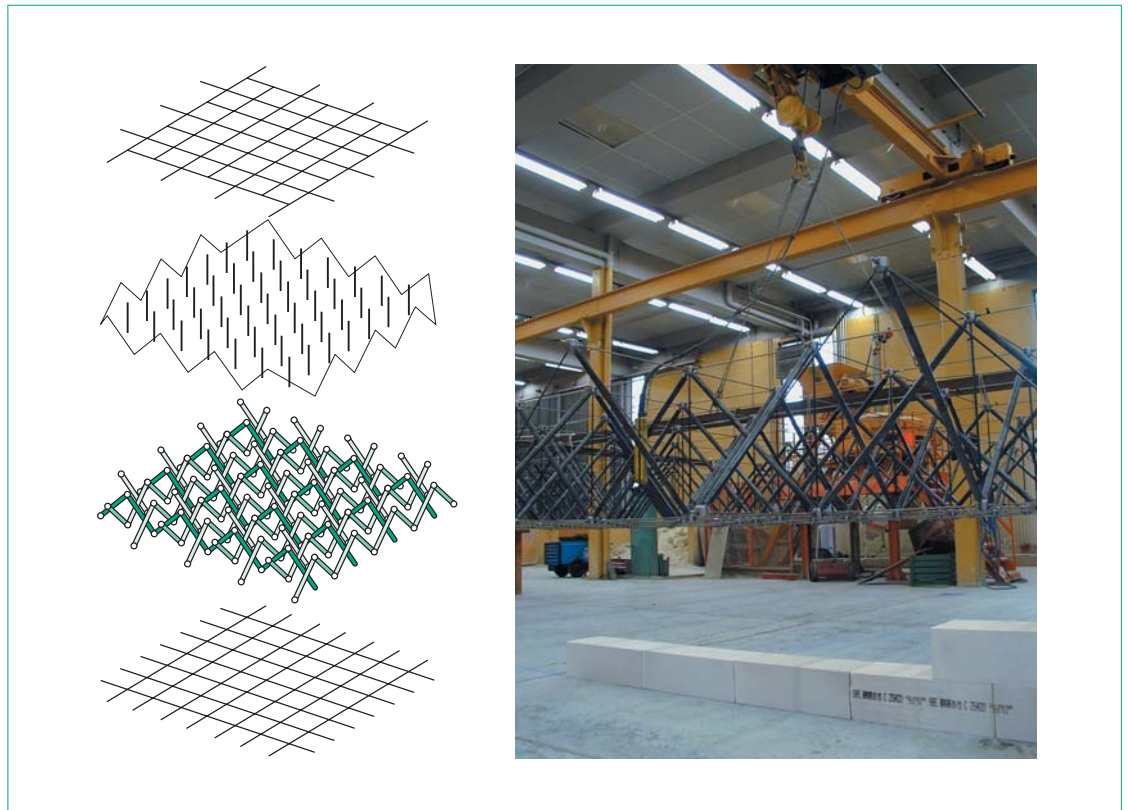


Figure 13 – Grille à double nappe en état de tenségrité. Projet Tensarch, 2000

La liste des **eurocodes** peut être consultée en ligne à l'Afnor : <http://www.afnor.fr>  
Eurocodes, CD-Rom, Afnor (2003)

## 5. Prospectives

### 5.1 Un élargissement du champ de composition structurale

Les systèmes en état de tenségrité renouvellent indiscutablement le vocabulaire structural. Il était assez évident que la réduction de la masse propre ne pouvait plus constituer un objectif intéressant dans la mesure où la diminution de cette masse propre s'accompagnait d'une augmentation du nombre de dispositifs annexes comme les haubans et les massifs d'ancrage pour les systèmes en câbles tendus ou les membranes textiles architecturales.

David Georges Emmerich avait largement anticipé cette situation, et il avait mis en lumière tout l'intérêt que l'on pouvait retirer de systèmes en état de tenségrité par la nature même d'une mise en autocontrainte qui ne nécessite aucun dispositif annexe. Il reste bien sûr à développer les procédés technologiques de mise en autocontrainte. Dans ce domaine, une étude théorique peut se révéler très utile : en effet, la détermination des bases d'autocontraintes permet de limiter les actions à un nombre réduit de

composants. Ce même type d'étude atteste du nombre d'états d'autocontrainte démontrant simultanément qu'une rupture de plusieurs composants (tendus ou comprimés) ne remet pas en cause la stabilité d'ensemble de ces systèmes, contrairement à ce qu'une étude insuffisante pourrait laisser penser. Il s'agirait en fait d'une confusion basée sur une méconnaissance du comportement mécanique de tels systèmes. Il est encore nécessaire de faire plus d'investigations, mais on peut penser que la composition structurale et la souplesse peuvent éviter des ruptures de type fragile. Le projet décrit succinctement dans le paragraphe 4.3 a été calculé en utilisant les modélisations requises par les **eurocodes** actuellement en vigueur. On peut attester que le niveau de sécurité est identique à celui de toute construction métallique.

Au-delà de ces considérations mécaniques, il faut souligner les perspectives nouvelles qui sont ouvertes par ce type de composition structurale. Elles sont exposées dans les paragraphes suivants.

### 5.2 Un nouveau principe de système pliable-dépliable

La réduction du volume des structures peut être nécessaire, par exemple pour modifier l'architecture d'un lieu ou pour transporter des constructions dans

**Sur les eurocodes :**  
*Eurocodes. Codes européens de conception des constructions* [C 60] de P. Bisch et J.-A. Calgaro  
*Eurocode 7 : calcul géotechnique* [C 240] de J.-P. Magnan  
*Constructions parasismiques. Eurocode 8* [C 3 292] de P. Bisch



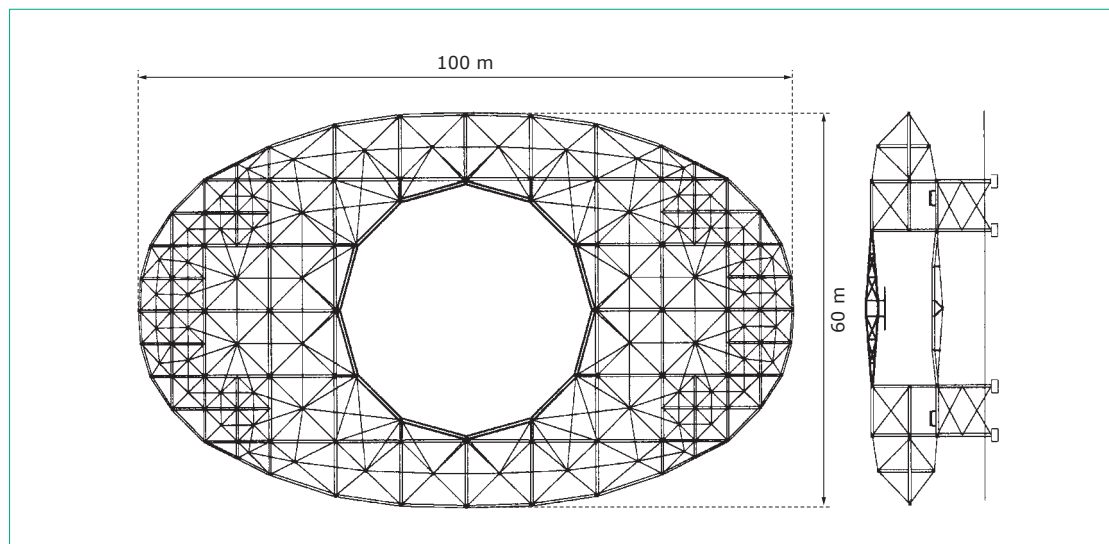


Figure 14 – Arteplage à Yverdon-les-Bains, Diller & Scofidio, architectes, Passera & Pedretti, ingénieurs

des navettes spatiales. C'est l'architecte espagnol Perez Piñero qui a popularisé les systèmes réticulés pliables-dépliables. Le principe qu'il a utilisé et développé est basé sur un mécanisme dit de ciseau, obtenu en articulant deux composants rectilignes autour d'un axe. Ce principe constructif nécessite l'addition ou le retrait d'éléments supplémentaires soit pour rigidifier le système, soit pour constituer des mécanismes finis nécessaires pour le pliage.

La constitution même des systèmes de tensegrité ouvre la voie à un nouveau principe de pliage et de dépliage. Si l'on prend le cas d'un système régulier pour simplifier le propos, on sait qu'un paramètre descriptif essentiel est le rapport  $r$  :

$$r = \frac{s}{c}$$

avec  $s$  longueur des butons,  
 $c$  longueur des câbles.

La rigidification des systèmes résulte d'une augmentation de ce rapport. L'interprétation physique est tout à fait simple si l'on utilise l'analogie qu'offre une membrane pneumatique gonflable (figure 15). On peut en effet considérer une membrane gonflée comme un système en état de tensegrité : dans ce cas, il y a un seul composant comprimé qui est le fluide inséré dans l'enveloppe, et il est à l'intérieur du continuum tendu réalisé par cette enveloppe. Il y a une correspondance analogique entre d'une part le fluide et les butons, et d'autre part entre l'enveloppe et le réseau de câbles (dans le cas de la figure 15, l'ensemble des câbles est homéomorphe à une sphère, il n'y a pas de câble intérieur, mais ce n'est pas une obligation). Il apparaît ainsi que les systèmes réticulés spatiaux en état de tensegrité peuvent être considérés comme des **systèmes pneumatiques discrets**. Mais cette remarque, qui pourrait apparaître comme formelle, ouvre la voie aux différents modes de pliage-dépliage que l'on peut conce-

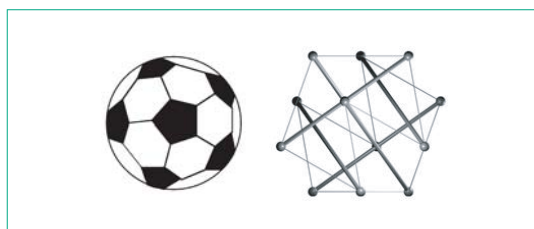


Figure 15 – Analogie du ballon

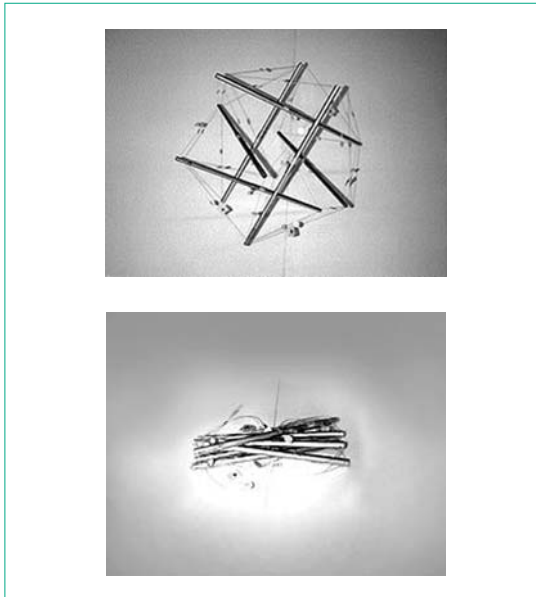
En effet, pour plier le système, il faut diminuer la valeur du rapport  $r$ , ce qui conduit à deux modes de pliage :

- mode câble : on augmente la longueur des câbles pour créer les mécanismes ;
- mode bouton : on réduit la longueur des butons pour créer les mécanismes.

Une action mixte peut être envisagée. L'intérêt est qu'une opération inverse permet de déplier le système et finalement de le rigidifier. Il s'agit là, bien sûr, de principes qui doivent être appliqués avec toutes les vérifications nécessaires, aussi bien par exemple pour assurer la compatibilité des trajectoires des nœuds dans le processus d'évolution géométrique, que pour réaliser technologiquement tous les dispositifs nécessaires à la mise en œuvre du pliage-dépliage.

Les deux modes évoqués peuvent être illustrés par les modèles réalisés dans notre laboratoire. Il s'agit d'un module à six barres plié selon le second mode (figure 16) et d'un assemblage de ces modules en forme de mât, dont le pliage est assuré selon le premier mode (figure 17).

Ces deux exemples ne sont qu'illustratifs. Il faut par exemple souligner qu'un mode peut se révéler



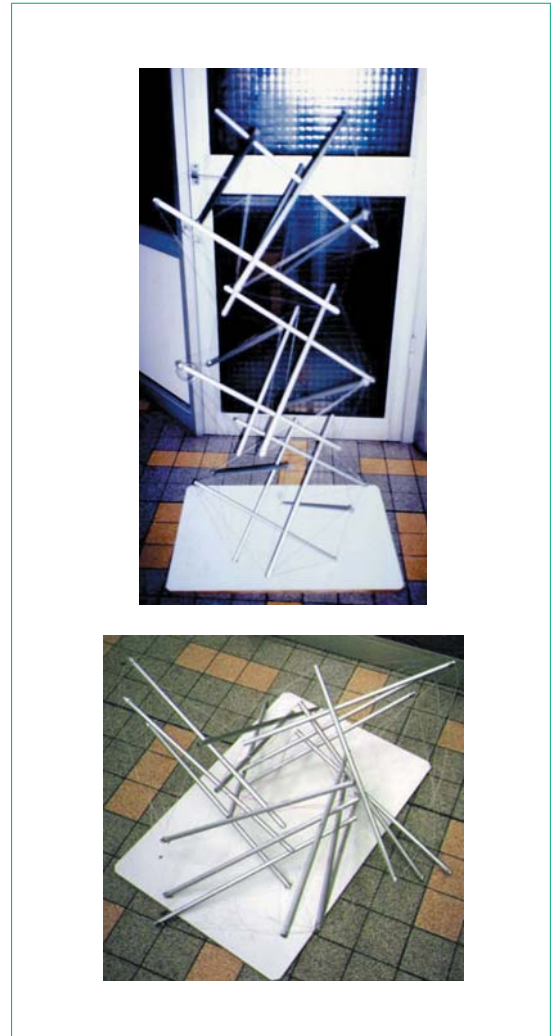
**Figure 16 – Pliage d'un système à six composants comprimés selon le mode bouton**

performant à une échelle donnée, pour un nombre réduit de composants, mais complètement inadapté dans les cas contraires. D'autres recherches, associées au pliage-dépliage des systèmes réticulés en état de tensegrité, ont été effectuées sur ces problématiques mais leur résultat sort du cadre de ce texte ; il s'agit, par exemple, des contacts entre composants dans le processus de pliage.

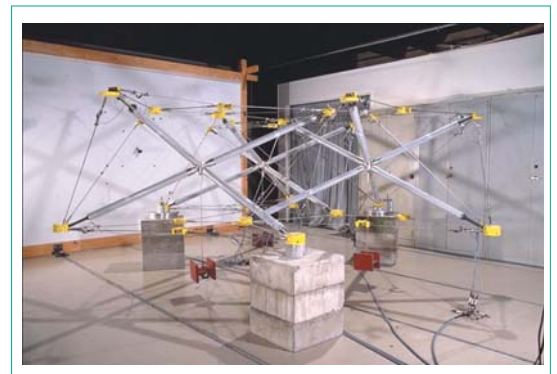
### 5.3 Contrôle actif des systèmes en état de tensegrité

La nature même de l'état de tensegrité offre une perspective intéressante pour les constructions. En déposant son brevet sur la précontrainte en 1928, Eugène Freyssinet avait ponctué près d'un quart de siècle de travaux et de recherches, en ouvrant la voie à une technologie principalement appliquée au béton : la précontrainte introduisait des actions choisies par le concepteur anticipant les effets des actions de l'environnement de la construction. L'état de tensegrité peut autoriser une progression dans ce continuum intellectuel : l'ingénieur peut moduler l'intensité des actions de précontrainte en fonction de critères particuliers pendant la vie de l'ouvrage.

C'est un pas important qui est ainsi franchi, celui du contrôle actif des constructions qui permet une maîtrise continue de la géométrie et des efforts internes dans le système. En la matière, la mécanique se rapproche de la robotique. Des efforts de recherche sur ce sujet ont été entrepris par diverses équipes, comme celle du laboratoire de mécanique et génie civil de l'université Montpellier-II (il s'agit de la suite apportée au projet de grille à double nappe décrit au paragraphe 4.2), mais aussi celle de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) qui a testé simultanément les aspects technologiques et de commande pour un système en état de tensegrité (figure 18).



**Figure 17 – Pliage d'un mât selon le mode câble**



**Figure 18 – Contrôle actif d'un système à trois « étoiles », EPFL**

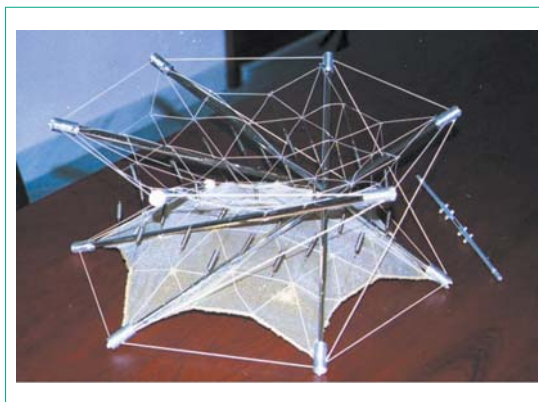


Figure 19 – Projet d'antenne spatiale

Dans ce cas, les chercheurs ont pu ainsi agir sur la distribution de l'autocontrainte pour rétablir l'horizontalité de la nappe supérieure, après une déstabilisation provoquée.

Même s'il est hasardeux de faire des anticipations, il est raisonnable de poursuivre des travaux de recherche dans cette voie qui peut être fort riche par ses applications (radar, panneau solaire par exemple), même si leur domaine sera par nature restreint.

#### 5.4 Utilisation dans la conquête spatiale

L'ensemble des propriétés décrites dans les paragraphes précédents, en particulier la pliability et le contrôle actif, constituent la base d'études déjà réalisées dans le domaine de la conquête spatiale. Nous les illustrons ici avec le projet élaboré par Gunar Tibert sous la direction du professeur Sergio Pellegrino à l'université de Cambridge [12]. Il s'agit d'un projet d'antenne spatiale, dont la constitution comprend un système réticulé « prismatique » en état de tensegrité, associé à une membrane et un réseau de câbles (figure 19).

Le pliage est assuré selon le mode bouton. Dans ce cas, le raccourcissement résulte d'une action mécanique sur le bouton dont on aperçoit un modèle sur la droite de la vue.

#### 5.5 Un modèle analogique pour la biologie

L'intérêt des recherches scientifiques est d'ouvrir des voies nouvelles, de proposer des solutions innovantes. Il y a celles attendues et poursuivies par les chercheurs, et celles inattendues. Le cas des systèmes de tensegrité est ainsi marqué par des applications surprenantes dans le domaine de la biologie. C'est le biologiste américain Donald Ingber qui a rendu publique l'analogie de comportement mécanique existant entre les systèmes en état de tensegrité et le cytosquelette des cellules endothéliales [13].

Ce comportement mécanique conditionne la transmission des messages biologiques entre la matrice extracellulaire et le noyau de la cellule (mécano-transduction). On peut ainsi comprendre certains dysfonc-

tionnements des cellules qui se manifestent d'ailleurs par des transformations morphologiques. Plusieurs équipes de recherche ont désormais investi ce domaine où l'état de tensegrité informe les biologistes.

### 6. Conclusion

Les quelques éléments présentés sont simplement une introduction pour la connaissance des systèmes réticulés spatiaux autocontraints en état de tensegrité. Le vocabulaire associé à leur étude n'est pas toujours connu, les concepts de base sont inusités et méritaient d'être soulignés. Cette présentation n'est que la partie émergente d'un iceberg d'études et de recherches menées depuis de nombreuses années. La bibliographie permettra à ceux qui le souhaitent d'avoir accès à une information plus complète et plus précise. Il reste que les premières réalisations voient le jour et il est sûr que leurs utilisateurs seront surpris et fascinés comme beaucoup ont pu l'être en découvrant la *Needle Tower* de Kenneth Snelson.

### Bibliographie

#### Références

- [1] MAKOWSKI (Z.S.). – *Space Structures, a short review of their development*. International Conferences on Space Structures, University of Surrey, édité par R.M. Davies, Blackwell Scientific Publications (1966).
- [2] FULLER (R.B.). – *Inventions : the patented works of R.B. Fuller*. St-Martin's Press (1985).
- [3] MOTRO (R.). – *Tensegrity, Structural Systems for the future*. Kogan Page (2003).
- [4] EMMERICH (D.G.). – *Réseaux*. Dans « Space Structures : A study of methods and developments in three-dimensional construction ». Proceedings of the International Conference on Space Structures, Guildford, 1966, édité par R.M. Davies, Blackwell Scientific Publications (1967).
- [5] VASSART (N.). – *Recherche de forme et stabilité des systèmes réticulés autocontraints*. Thèse de doctorat, université de Montpellier-II (1997).
- [6] LODDER (C.). – *The Transition to Constructivism. The Great Utopia. The Russian and Soviet Avant-Garde. 1915-1932*. Exposition au musée Guggenheim, New York (1992).
- [7] MOTRO (R.), SMAILI (A.) et FOUCHER (O.). – *Form controlled method for tensegrity formfinding : Snelson and Emmerich examples*. International IASS Symposium on Lightweight Structures in Civil Engineering, Contemporary problems, Varsovie (juin 2002), édité par Jan B. Obrebski, Micropublisher, pp. 243-248 (2002).
- [8] SNELSON (K.). – *Continuous tension, discontinuous compression structures*. Brevet américain n° 3 169 611 (16 fév. 1965).
- [9] TIBERT (A.G.) et PELLEGRINO (S.). – *Review of Form-Finding Methods for Tensegrity Structures*. International Journal of Space Structures, 18, n° 4 (2003).
- [10] RADUCANU (V.) et MOTRO (R.). – *Système à autoéquilibre stable pour élément de construction*. Brevet français n° 01 04 822, déposé le 9 avril 2001 aux noms de CNRS/société Tissage et Enduction Serge Ferrari.
- [11] RADUCANU (V.). – *Architecture et système constructif : cas des systèmes de tensegrité*. Thèse de doctorat, université de Montpellier-II (2001).

[12] TIBERT (G.). – *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*. Thèse de Doctorat, Royal Institute of Technology, Stockholm (2002).

[13] INGBER (D.E.). – *The Architecture of Life*. Scientific American, pp. 30-39 (janv. 1998).

## CD-Rom

*Eurocodes*. Afnor (2003).

## Dans les Techniques de l'Ingénieur

MOUTY (J.). – *Structures réticulées spatiales*. [C 2 575], Structure et gros œuvre (1986).

LAUTE (J.-P.). – *Constructions métalliques. Structures à câbles*. [C 2 580], Structure et gros œuvre (1992).

FRUITET (L.). – *Constructions métalliques. Halls en rez-de-chaussée*. [C 2 635], Structure et gros œuvre (1991).

BISCH (P.) et CALGARO (J.-A.). – *Eurocodes. Codes européens de conception des constructions*. [C 60], Construction – Généralités (2004).

MAGNAN (J.-P.). – *Eurocode 7 : calcul géotechnique*. [C 240], Structure et gros œuvre (1995).

BISCH (P.). – *Constructions parasismiques. Eurocode 8*. [C 3 292], Bâtiment et travaux neufs (2002).

## Thèses

CAÑADAS (P.). – *Modèle de tensegrité viscoélastique pour l'étude de la réponse dynamique des cellules adhérentes*. Thèse de doctorat, université de Paris-Val-de-Marne (2003).

LE SAUX (C.). – *Modélisation numérique du pliage et du déploiement de systèmes spatiaux avec prise en compte des contacts et des frottements : cas des systèmes de tensegrité*. Thèse de doctorat, université de Montpellier-II (2002).

AVERSENG (J.). – *Méthodologie de mise en autocontrainte des systèmes de tensegrité*. Mémoire de DEA, université de Montpellier-II (2001).

AUTUORI (B.). – *Méthodologie de mise en prétension des systèmes de tensegrité*. Mémoire de DEA, université de Montpellier-II (2000).

QUIRANT (J.). – *Systèmes de tensegrité et autocontrainte : qualification, sensibilité et incidence sur le comportement*. Thèse de doctorat, université de Montpellier-II (2000).

BOUDERBALA (M.). – *Systèmes spatiaux pliables/dépliables : le cas de systèmes de tensegrité*. Thèse de doctorat, université de Montpellier-II (1998).

WENDLING (S.). – *Loi de comportement d'une structure de tensegrité élémentaire : application à la mécanique cellulaire*. Thèse de doctorat, université de Paris-XII (1997).