HAL open science

Comportement d'un anneau de tenségrité

Anh-Dung Nguyen, Jérôme Quirant, Franck Cevaer, Jean-François Dubé

To cite this version:

Anh-Dung Nguyen, Jérôme Quirant, Franck Cevaer, Jean-François Dubé. Comportement d'un anneau de tenségrité. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-01577538

HAL Id: hal-01577538

https://hal.science/hal-01577538v1

Submitted on 26 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Comportement d'un anneau de tenségrité

A.D. NGUYEN, J. QUIRANT, F. CEVAER, J.F. DUBE

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil - Université Montpellier 2, 860 rue de St Priest, 34090 Montpellier

Résumé :

Les anneaux de tenségrité sont des systèmes réticulés qui possèdent la particularité de pouvoir être déployés. Ils sont dans un état d'autocontrainte qui stabilise leurs mécanismes. Nous étudierons le comportement de la structure en service et lors du pliage.

Abstract :

Tensegrity rings are pin-jointed systems that can be deployable. They are in a self-stressed state stabilizing their mechanisms. In this paper, the behavior of this structure under loading and during folding will be presented.

Mots clefs: tenségrité, système déployable.

1 Introduction

La tenségrité, la traduction du mot anglais tensegrity provenant de la contraction de **ten**sile et int**egrity**, est une notion proposée par Fuller [1] pour décrire une structure en auto-équilibre dont les éléments tendus forment un ensemble continu. Au cours des années, cette définition a évolué [2] et des champs d'application prometteurs sont également envisagés.

L'anneau de tenségrité est présenté pour la première fois par Pugh en 1976 [3] sous le nom « circuit pattern » . Motro et al. [4] ont montré la possibilité de plier complètement la structure.

La structure possède un espace intérieur sous forme de tube d'où vient le nom d'anneau de tenségrité. La géométrie de base est un prisme droit dont le polygone générateur est un pentagone. Le système est composé d'un circuit unique de 15 barres et 30 câbles comme le montre la figure 1 .Si l'on souhaite que toutes les barres soient de longueur identique et que les pentagones servant à la génération du module soient inscrits dans un même cercle, alors il existe une relation entre la hauteur du module H et le rayon R du cercle circonscrit aux nœuds :

$$H = 4R\sqrt{\frac{\cos(2\pi/5)}{3}} \qquad (1)$$

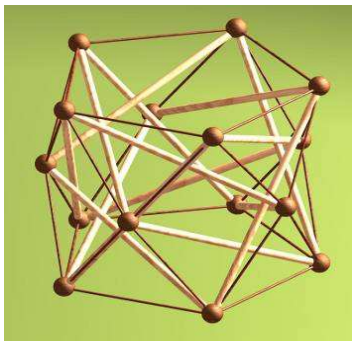

FIG. 1 – Perspective

En ce qui concerne le comportement mécanique, ici nous résumerons quelques éléments essentiels. Pour les lecteurs intéressés, une communication plus détaillée a été publiée par les mêmes auteurs [5]. En fait, la structure ne comporte aucun mécanisme infinitésimal. On trouve 6 états d'autocontrainte linéairement indépendants et il est possible de trouver une combinaison linéaire de ces états qui respecte l'unilatéralité du comportement des câble [6] . La figure 2 visualise l'état d'autocontrainte combiné. La réponse du système due au chargement de 5 forces nodales descendantes (figure 3) est ensuite analysée par simulation numérique à l'aide du code de calcul éléments finis ANSYS. Ainsi, nous observons deux phases linaires du comportement de l'anneau avant et après le relâchement des câbles non-coplanaires (figure 4). Le niveau de précontrainte peut avancer ou retarder ce point de passage. Si la précontrainte est très élevée, la structure atteint sa rupture sans que les câbles se détendent (courbes AC4 à AC6 figure 4).

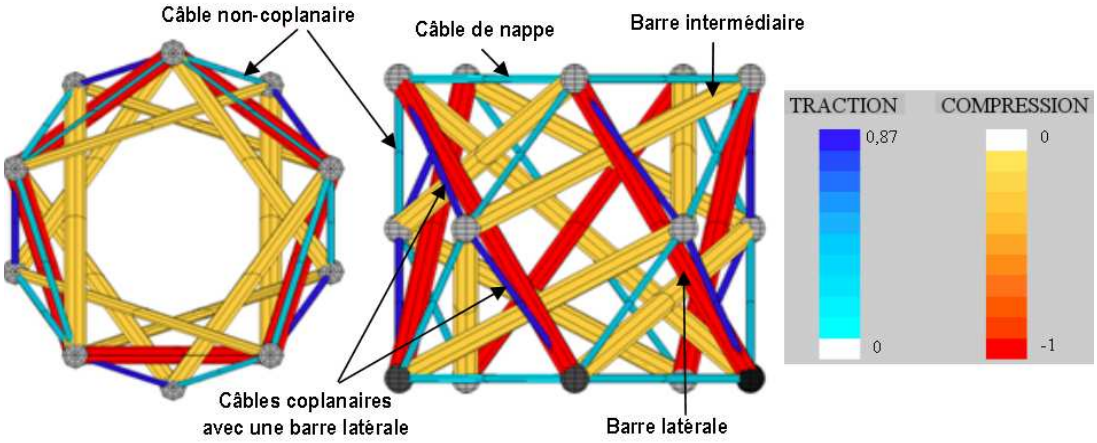

FIG. 2 – Etat d'autocontrainte en kN

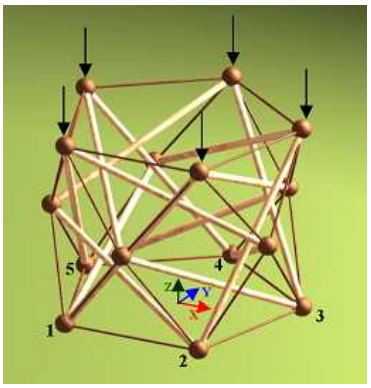

FIG. 3 – Systèmes sous chargement

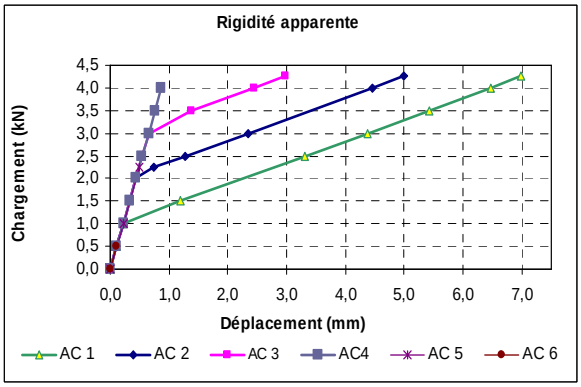

FIG. 4 – Evolution du déplacement vertical de la nappe supérieure (mm) en fonction de la charge totale (kN)

L'étude paramétrique sur l'influence de la rigidité (ES) des éléments permet de constater que les câbles jouent un rôle plus important sur la rigidité globale du système que les barres. En effet, doubler la rigidité des câbles permet de réduire presque deux fois le déplacement alors qu'une variation de la raideur des barres a peu d'impact.

2 Conception du prototype

Un prototype de hauteur d'homme a été monté avec des câbles en acier et des barres en composite pultrudé. L'avantage de cette structure réside dans sa légèreté, sa précision en terme de géométrie. La longueur des éléments prévue en tenant compte des dispositifs de connexion est décrite dans le tableau suivant :

Longueur des barres	220 cm
Longueur des câbles de nappes	148 cm
Longueur des câbles intermédiaires	112 cm
Rayon du cercle circonscrit	125 cm
Hauteur du module	161 cm

TAB. 1 – Propriétés géométriques globales du module

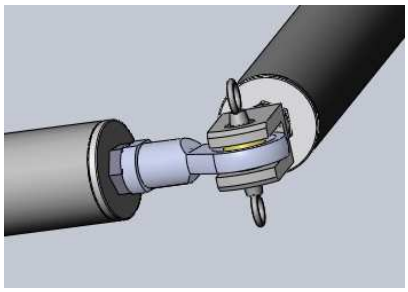

FIG. 5 –Nœud modélisé

FIG. 6 –Nœud fabriqué

FIG. 7 – Prototype léger de 25 kg soulevé par une personne

Les figures 5, 6 et 7 décrivent la composition des nœuds et la taille du prototype.

3 Etude du pliage

3.1 Approche analytique

En nous basant sur l'hypothèse de la symétrie circulaire du module et la constance de longueur des barres et des câbles tendus au cours du pliage, nous tirons un système de 3 équations gouvernant la géométrie de l'anneau pour une configuration quelconque avec 4 inconnues: H, R_1, R_2 et α :

$$4R_1^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{5}+\frac{\alpha}{2}\right) + H^2 = L^2 \tag{2}$$

$$R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos\left(\frac{7\pi}{5}+\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{H^2}{4} = L^2 \tag{3}$$

$$R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos\left(\frac{\pi}{5}+\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{H^2}{4} = B^2 \tag{4}$$

Où R_1 et R_2 sont les rayons du cercle circonscrit aux pentagones de nappe et intermédiaire, α l'angle de rotation relatif du pentagone supérieur par rapport au pentagone inférieur, H la hauteur du module. Dans la position pliée, nous obtenons R_1^{max} = 1,23R, R_2^{max} = 1,06R et α^{max} = 18,2° qui sont les 3 valeurs maximales des inconnus obtenues pour la position pliée. Cela nous permet de déduire que l'angle α varie de 0 à 18,2°. Nous recalculons alors H, R_1 et R_2 en fonction du paramètre α (figure 8). Le contact entres les barres est détecté analytiquement quand la structure atteint la hauteur de 25cm.

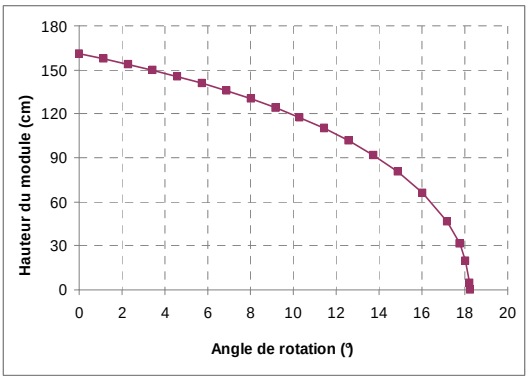

FIG. 8 – Hauteur du module en fonction de α

3.2 Approche numérique

Pour pouvoir simuler le dépliage sous le logiciel ANSYS, nous avons supposé que les câbles de nappes étaient très souples en divisant par 10 000 leur rigidité réelle par modification du module d'Young. Cette technique est directement inspirée du mode expérimental qui consiste à allonger ces câbles pour générer le pliage. Des déplacements verticaux sont alors appliqués sur les 5 nœuds de la nappe supérieure. La déformation des câbles de nappes est le paramètre qui est relevé pour traduire l'allongement nécessaire à une réduction de hauteur du module donnée. Comme les éléments actifs sont très souples, l'effort qui se développe dans l'ensemble des éléments est négligeable au cours du pliage. Les figures 9 et 10 présentent la déformée correspondant à un déplacement imposé égal à 60cm. La courbe hauteur - allongement des câbles sera présentée ultérieurement dans la partie **4. Comparaison**. Le contact entre les éléments n'est pas pris en compte.

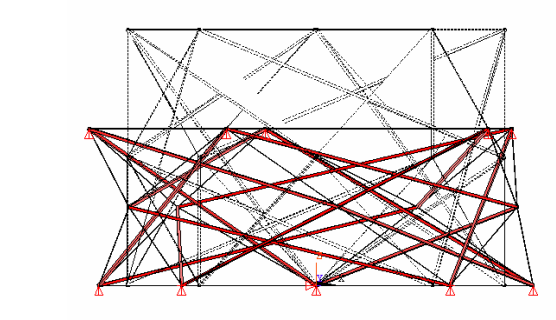

FIG. 9 – Vue de côté quand Δ = 60 cm

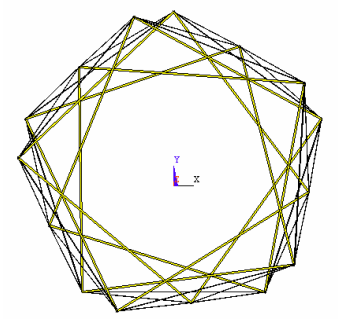

FIG. 10 – Vue de dessus quand Δ =60 cm

3.3 Expérimentation

La campagne de mesure menée a pour but de vérifier les résultats obtenus par les deux approches précédentes. Les figures 11, 12 et 13 montrent les dispositifs utilisés pour l'expérimentation.

FIG. 11 – Feuilles réfléchissantes

FIG. 12 – Patin en téflon sur le sol

FIG. 13 – Théodolite Leica

Le déploiement de l'anneau est généré par le biais de deux câbles continus remplaçant les câbles des nappes supérieure et inférieure. Pour chaque pas d'allongement de 20 cm de ces câbles continus, la structure est reconstruite à partir de la position des feuilles réfléchissantes collées sur les barres (figure 11). Le processus de détermination de l'axe des barres est automatisé numériquement selon le schéma décrit par la figure 14. A et B sont les feuilles réfléchissantes visées alors que I et J sont les positions théoriques des nœuds et P est la station de mesure.

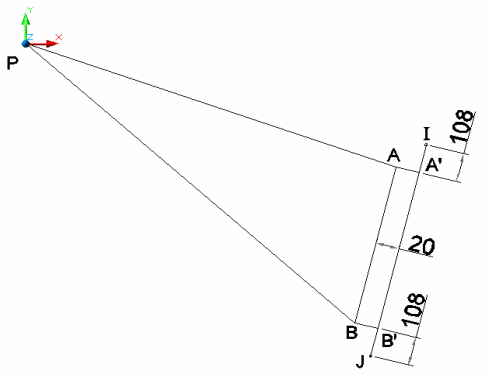

FIG. 14 – Schémas de reconstruction des axes

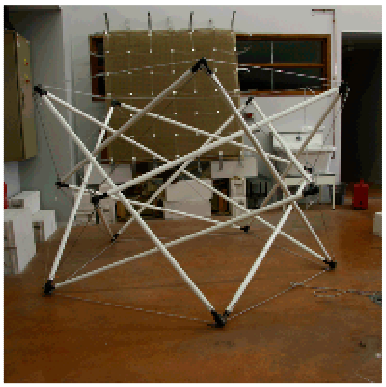

FIG. 15 – Etat en autocontrainte

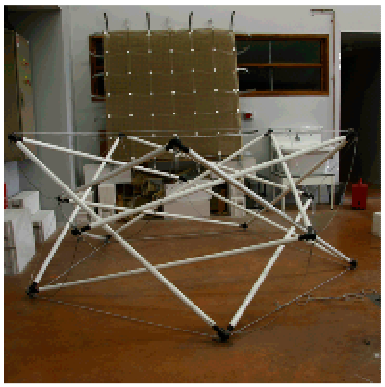

FIG. 16 – Etat intermédiaire

FIG. 17 – Structure pliée

Le déploiement est visualisé sur les figures 15, 16 et 17. La figure 18 présente la géométrie reconstruite du système au cours du pliage. Ce dernier s'arrête quand la hauteur est de 45 cm (environ).

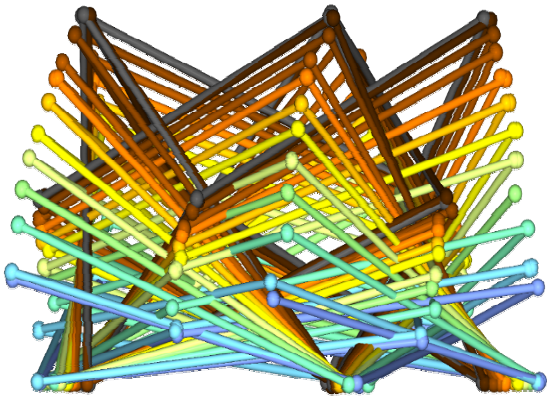

FIG. 18 – Pliage de l'anneau

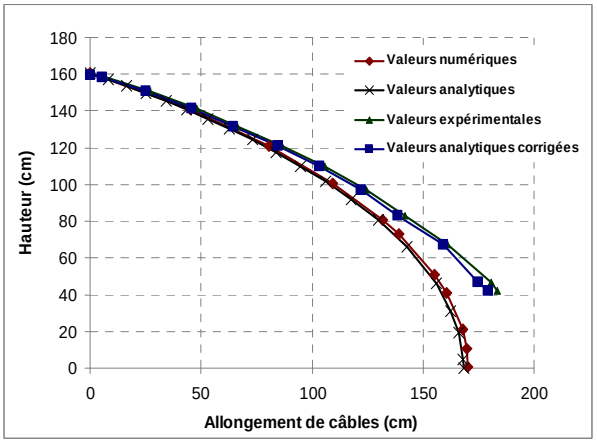

FIG. 19 – Confrontation des résultats

4 Comparaison

Dans la figure 19, la confrontation des résultats est synthétisée. La simulation numérique donne des valeurs très proches de celles qui sont obtenues par l'approche analytique. Par contre, l'écart entre ces deux résultats avec l'expérimentation est important vers la fin du déploiement. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que certains nœuds se rapprochent en raison du déport des câbles par rapport au centre des nœuds alors qu'en théorie, cette distance devrait rester constante. En effet, dans la pratique, la longueur de ces câbles (le trait en noir sur les figures 20 et 21) n'évolue pas mais avec la réorientation des dispositifs de connexion, la distances entre les centres des nœuds diminuent : $L_2<L_1$.

Après avoir quantifié ce raccourcissement, nous avons pu à nouveau résoudre analytiquement le pliage en tenant compte de ces nouveaux paramètres. La concordance entre l'expérience et analytique a été alors très satisfaisante (courbe ***valeurs analytiques corrigées*** sur la figure 19).

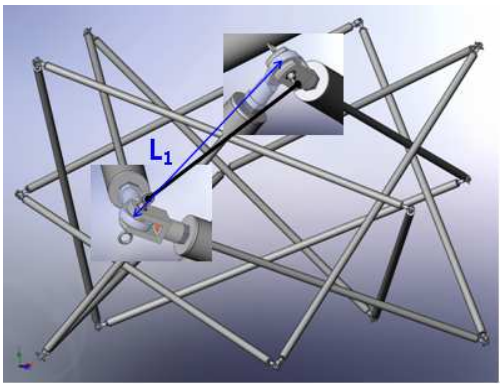

FIG. 20 – Pliage de l'anneau Zoom sur les bouts du câble

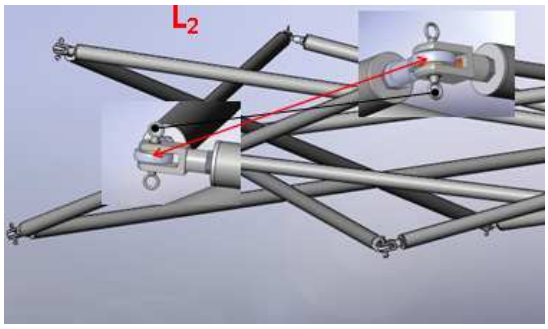

FIG. 21 – Pliage de l'anneau Zoom sur les bouts du câble

5 Conclusion et perspectives

L'étude menée sur un anneau de tenségrité selon des plans théoriques et expérimentaux nous confirme la faisabilité d'une structure légère, résistante et déployable. Cependant, pour arriver à une meilleure précision et compacité, l'amélioration des nœuds est indispensable. Les champs d'application font actuellement l'objet de recherche au LMGC est la construction d'une passerelle piétonne et d'une antenne spatiale par l'assemblage modulaire d'anneaux de tenségrité.

References

[1] Fuller R.B Tensile – Integrity structure – U.S. patent 3,063,521, 1962
[2] Motro R. (2003), Tensegrity, Kogan Page Science, ISBN : 1903996376.
[3] Pugh A. (1976), "An introduction to tensegrity", University of California Press.
[4] Motro R., Maurin B., Silvestri C. (2006), "Tensegrity rings and the hollow rope", IASS Symposium, Beijing, China, pp. 470-471 extended abstract. CDrom complete text.
[5] Nguyen A.D., Quirant J., Cévaër F., Dubé J-F. (2007), IASS Symposium, Venice, Italy, pp. 79-80 extended abstract. CDrom complete text.
[6] Quirant J., Kazi Aoual N., Laporte R. (2003), "Tensegrity systems: the application of linear programmation in search of compatible selfstress states", Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, vol. 44 (1), p.33-55.