



HAL
open science

Identification et contrôle d'une grille de tenségrité

Sarah Badra Amouri, Julien Averseng, Jean-François Dubé

► **To cite this version:**

Sarah Badra Amouri, Julien Averseng, Jean-François Dubé. Identification et contrôle d'une grille de tenségrité. Actes des 31èmes Rencontres de l'AUGC, May 2013, Cachan, France. 10 p. hal-00869083

HAL Id: hal-00869083

<https://hal.science/hal-00869083>

Submitted on 2 Oct 2013

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.

Identification et contrôle d'une grille de tensegrité

Sarah Amouri¹, Julien Averseng¹, Jean-François Dubé¹

¹LMGC, UMR CNRS 5508, Université Montpellier 2, cc048, Place E. Bataillon, 34095 cedex5, France (badra.amouri@univ-montp2.fr)

RÉSUMÉ. Les systèmes de tensegrité sont une classe particulière dans la famille des systèmes réticulés. Ils se composent d'un ensemble de barres comprimées à l'intérieur d'un continuum de câbles tendus, l'ensemble étant maintenu dans un état d'autocontrainte introduit au montage. Par leur légèreté, ces structures sont sujettes à des problèmes de déformations et de vibrations lorsqu'elles sont soumises à des charges externes, d'origine climatique, humaine, ou sismique. On s'intéresse dans cet article au contrôle des vibrations d'une grille plane de tensegrité. L'objectif est l'amortissement actif des deux premiers modes propres, par commande d'actionneurs intégrés à la structure. Une synthèse de loi de commande robuste est développée afin de minimiser le niveau des vibrations tout en conservant la même efficacité lorsque la rigidité ou la masse varie.

ABSTRACT. Tensegrity systems are selfstressed reticulate space structure. They are defined as a set of elements maintained in compression inside a continuous set of tense components, which are generally cables. As lightweight frames, they are subject to deformation and vibration issues when faced to external loads, climate, human, or seismic. We are interested in this paper to the vibration control of a tensegrity plane grid. The objective is the active damping of the first two modes, by controlling actuators integrated into the structure. A robust control law is developed to minimize the vibration level while maintaining the same efficiency when the stiffness or mass varies.

MOTS-CLÉS : tensegrité, amortissement, contrôle actif

KEYWORDS: tensegrity, damping control, active control

1. Introduction

Les systèmes de tensegrités sont d'abord apparus sous forme de sculpture puis révélèrent leur potentiel en structures dans les années 50, notamment par les travaux de Snelson et Fuller [FUL 73][SNE 73]. Une définition récente et largement acceptée a été proposée en 2003 par Motro [MOT 05] : "Une structure de tensegrité est un système stable dans un état d'autocontrainte comprenant un ensemble discontinu de composants comprimés à l'intérieur d'un continuum de composants tendus." (Fig. 1).

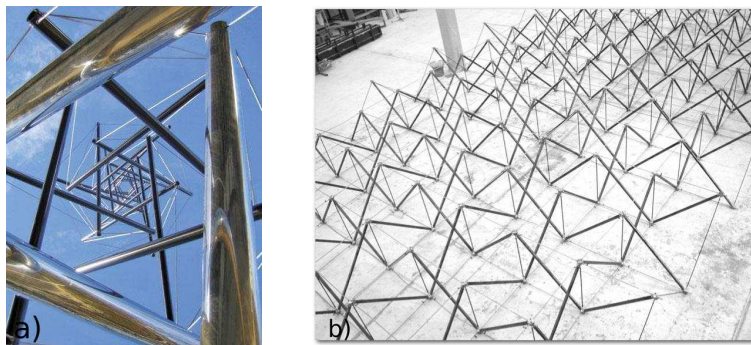


Figure 1. a) *Needle Towed* (Keneth Snelson, 1968), b) *Projet Tensarch* (LMGC/SLA, 2002.)

Par leur légèreté apparente, ces structures trouvent des applications dans des ouvrages de couverture, en couplage avec des composants vitrés, textiles, et comme ouvrages de franchissement tels que les passerelles [SAN 05]. Cependant, ces structures ont des propriétés d'amortissements faibles et peuvent donc présenter des niveaux de vibration importants quand elles sont excitées par des charges externes, d'origine climatique, humaine, ou sismique. Ceci peut engendrer un inconfort et des désordres dans les parties fragiles de la structure. C'est pourquoi il est important de bien connaître le comportement dynamique de ces systèmes afin de pouvoir les contrôler.

Le contrôle des vibrations consiste à diminuer l'amplitude des vibrations d'une structure. Plusieurs études ont été menées sur le contrôle actif des systèmes de tensegrité. S Djouadi et R Motro [DJO 98], ont proposé une méthode basée sur une combinaison de l'algorithme de contrôle instantané, les méthodes de Newton-Raphson et de Newmark. Les résultats obtenus ont montré que la méthode est bien adaptée à ce genre de problème.

Tuanjie et Yujuan [TUA 13] ont utilisé la D-K itération pour concevoir un contrôleur actif des vibrations de la structure de tensegrité à partir de la μ synthèse .

Averseng et Dubé [AVE 05] ont proposé une autre stratégie de contrôle actif en utilisant la synthèse de contrôle robuste. Ils ont divisé la loi de commande en deux parties. La première dédiée au contrôle statique. La deuxième partie concerne le contrôle

dynamique. La technique de commande robuste a été utilisée pour minimiser le transfert entre les perturbations extérieures et la sortie en prenant en considération des incertitudes sur le modèle et les signaux perturbateurs sur le système.

Dans cette étude, on s'intéresse au contrôle dynamique des vibrations d'une grille plane de tenségrité. L'objectif est l'amortissement actif des deux premiers modes propres, en flexion et en torsion, par commande d'actionneurs intégrés à la structure.

2. La structure d'étude

La structure servant de support aux expérimentations est une grille plane de tenségrité à double nappe. Elle est une sous-partie de la grille, appelée Projet Tensarch (Fig. 1). Elle est formée d'un tissage de barres en compression maintenues en équilibre à l'intérieur d'un réseau de câbles tendus. Elle occupe ainsi une surface de $3,2 \text{ m} \times 6,4 \text{ m}$ soit environ 20 m^2 . Elle se compose : de deux nappes horizontales, en partie supérieure et inférieure, constituées d'un réseau de câbles continus munis tous les 80 cm de manchons qui permettent la transmission des efforts aux noeuds ; de tirants verticaux et périphériques, réglables par vissage dans les noeuds et de barres de longueur fixe.

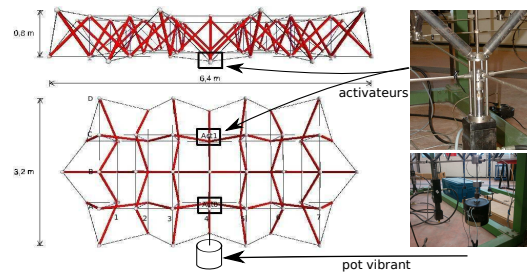


Figure 2. Grille de tenségrité et détail des activateurs

Cette structure est équipée de deux activateurs. Leur positionnement permet de provoquer une augmentation de la tension locale de la nappe inférieure de manière à induire une courbure globale vers le haut (Fig 2). Les activateurs sont verticaux afin d'éloigner le noeud de la nappe inférieure, ce qui augmente la tension dans les quatre câbles adjacents. Nous utilisons deux servo-vérins hydrauliques à double effet équipés d'un capteur de position intégré, et pilotés chacun par une carte d'axe. Cette solution a de bonnes performances dynamiques jusqu'à 30 Hz, un domaine qui couvre la partie la plus significative du comportement dynamique de la structure.

3. Etude du comportement dynamique de la structure

Nous avons étudié deux types de comportements : le comportement passif (sans usage des vérins) et le comportement actif.

3.1. Le comportement passif

Pour caractériser la réponse passive de la structure, on réalise un essai de type balayage sinus à l'aide d'un pot vibrant (Fig. 2) situé en un point décalé par rapport à l'axe longitudinal de la structure afin d'en exciter les modes de flexion et torsion. Les signaux mesurés sont la force introduite par le pot en entrée et l'accélération verticale en nappe supérieure de la structure. Le comportement est ensuite déterminé sous la forme de la fonction de transfert accélération sur force (Fig. 3a). Sur ce graphe, on voit apparaître les pics de résonance des modes de torsion (13,4 Hz) et de flexion (17,4 Hz). L'objectif du contrôle actif sera de les atténuer.

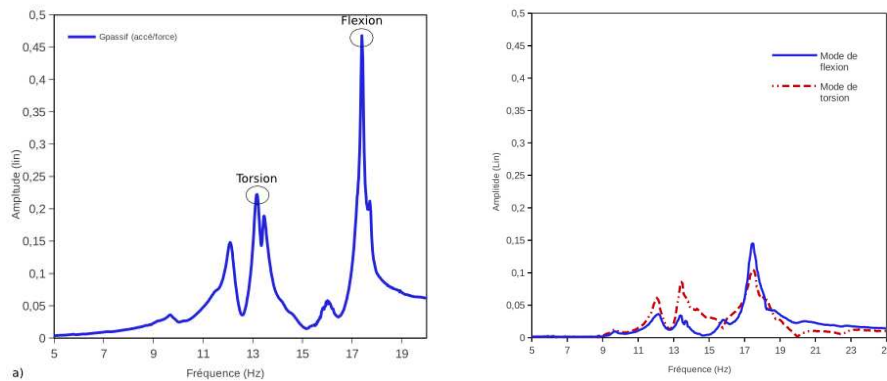


Figure 3. a) Réponse fréquentielle de la structure passive, b) Réponse fréquentielle de la structure active

3.2. Le comportement actif

Afin d'optimiser l'impact des activateurs sur chacun des régimes de vibration de la structure, leur commande est couplée : il sont pilotés en phase lorsqu'il s'agit d'agir sur le mode de flexion et en opposition de phase pour le mode de torsion. Le comportement actif est cette fois déterminé par l'intermédiaire de la réponse fréquentielle (Fig. 3) entre la commande en entrée et l'accélération mesurée en sortie.

4. Identification du comportement

Le comportement dynamique de la structure étudiée est décomposé et identifié par similitude avec un modèle rhéologique simple. Trois paramètres M , C , K représentent successivement la masse, l'amortissement et la raideur de la structure. En effet, pour chaque mode, la grille est considérée comme un système masse-ressort à 1 degré de liberté (Fig. 4) de type Kelvin-Voigt. Les activateurs sont matérialisés par un élément de longueur variable $u(t)$.

4.1. Modèle rhéologique équivalent

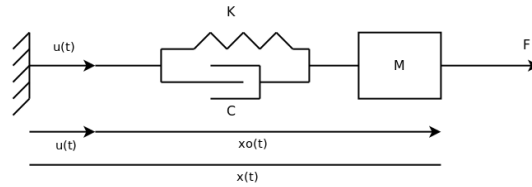


Figure 4. *Modèle rhéologique*

L'équation d'équilibre s'écrit comme suit :

$$Mx'' = F - K(x - u) - C(x' - u') \quad [1]$$

Soit :

$$Mx'' + Cx' + Kx = F + Ku + Cu' \quad [2]$$

La matrice de transfert est la transformée de Laplace de l'équation 2

$$\mathcal{L}[Mx'' + Cx' + Kx] = \mathcal{L}[F + Ku + Cu'] \quad [3]$$

$$Ms^2x(s) + Csx(s) + Kx(s) = F(s) + Ku(s) + Csu(s) \quad [4]$$

Dans notre cas, la structure d'étude est représentée par deux transferts (Fig. 5).

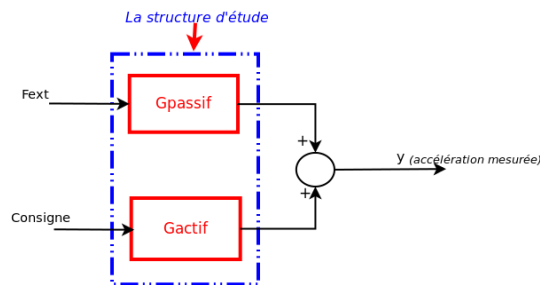


Figure 5. *La structure d'étude*

La partie passive G_{passif} exprime la relation entre les excitations extérieures du pot vibrant (F_{ext}) et la mesure en sortie y . Le transfert G_{actif} représente l'effet de la consigne u reçue en entrée des activateurs sur la sortie.

$$G_{actif} = \frac{s^2(Cs + K)}{Ms^2 + Cs + K} \quad [5]$$

$$G_{passif} = \frac{s^2}{Ms^2 + Cs + K} \quad [6]$$

4.2. Calage des paramètres

La pulsation propre de la structure passive ω_0 est définie par

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad [7]$$

Ainsi, en fixant la masse M , on en déduit d'abord la rigidité K au niveau du pic de résonance. On peut alors ajuster l'amortissement et le niveau global par un coefficient multiplicateur α qui représente le gain de la chaîne de commande et de mesure. Le jeu de paramètres obtenu est présenté dans le tableau 1.

| Fréquence (Hz) | Mode | M | K | C | α |
|----------------|---------|--------|-------------|-----------|----------|
| 13,42 | Torsion | 100 Kg | 712000 N/m | 280 N.s/m | 4,00E-07 |
| 17,42 | Flexion | 100 Kg | 1200000 N/m | 300 N.s/m | 3,40E-07 |

Tableau 1. Paramètres mécaniques des modèles équivalents pour chaque mode

5. Contrôle actif robuste

Il existe différentes méthodes modernes de contrôle [ALZ 99], et notamment les algorithmes de synthèse robustes (LQG, P RLQG, H_∞ , μ) qui prennent en considération les incertitudes et les perturbations extérieures qui affectent le système afin de concevoir un contrôleur robuste. La commande robuste permet de garantir la stabilité de la structure par rapport aux nombreuses incertitudes existantes, découlants de paramètres non maîtrisés sur les liaisons, l'autocontrainte, les matériaux et le chargement au cours du temps (la neige par exemple, qui change la masse de la structure).

L'approche H_∞ prend en compte explicitement les incertitudes qui règnent sur le modèle du système ou sur les signaux [TUA 13]. Elle consiste à minimiser la norme de H_∞ du transfert entre des perturbations en entrée et des sorties de critère. Une boucle d'asservissement typique est représentée en Fig. 6.

Sur ce schéma, le système à commander est noté G , le contrôleur K , r est l'entrée de consigne, y la sortie mesurée et u est la commande générée. Les diverses incertitudes interviennent additivement sous la forme de signaux extérieurs w_i , w_0 . La relation entre la sortie y et les différentes grandeurs s'exprime par la relation suivante :

$$y = (1 + GK)^{-1}w_0 + (1 + GK)^{-1}Gw_i + (1 + GK)^{-1}GK(r - n) \quad [8]$$

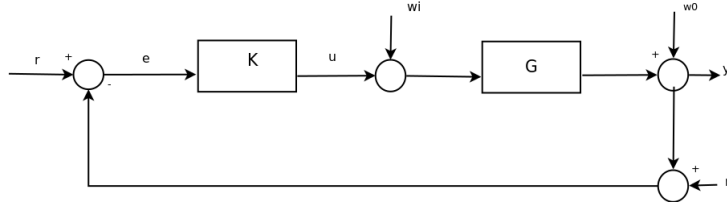


Figure 6. Boucle d'asservissement typique

On introduit les notations suivantes : $S = (1 + GK)^{-1}$ et $T = (1 + GK)^{-1}$. S est la sensibilité en sortie, transfert entre les perturbations en sortie w_0 et y . T est la sensibilité complémentaire en sortie du système, entre r et n (consigne et bruit de mesure) et la sortie y . Le transfert entre w_i et y est SG . Ces fonctions servent à construire des spécifications sur le contrôleur. Dans notre cas, afin d'avoir de bonnes performances, T doit être grand dans la bande passante du système et au-delà faibles afin d'éliminer le bruit de mesure. Pour atténuer les actions extérieures, il nous faut une faible sensibilité S . Enfin, les incertitudes du système peuvent être considérées comme une perturbation w_i en entrée, donc la robustesse nécessite une fonction de transfert KS faible. En utilisant la formulation de la méthode H_∞ , on écrit cette série de conditions sous une forme pratique dite "standard" (Fig. 7), centrée sur le contrôleur K . La matrice P décrit les connections entre les signaux en lien avec l'extérieur (w_{ext} et

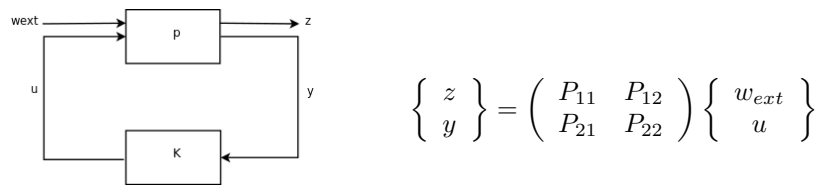


Figure 7. La forme standard et la représentation matricielle du système P

z) et les signaux internes à la boucle (y et u). P admet ainsi, en entrée un vecteur de commandes u et une perturbation w_i , en sortie y et z_i (signaux qui caractérisent la commande et que l'on cherche à minimiser). y et z_i sont pondérés par des fonctions W_i qui influent sur S et T [eq 9] (Fig. 8)

Le respect des conditions de performance mises en forme par les fonctions de pondération implique finalement :

$$[W_1 S]_\infty < 1 // [W_3 T]_\infty < 1 \tag{9}$$

z est composé de z_1 et z_3 , la fonction de transfert P s'écrit :

$$P = \begin{pmatrix} -W_1 G p & -G a W_1 \\ W_3 G p & G a W_1 \\ -G p & -G a \end{pmatrix}$$

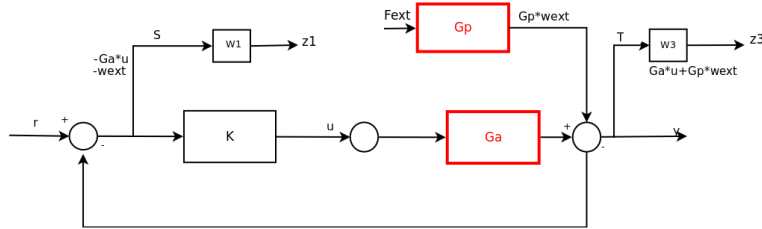


Figure 8. Boucle de contrôle de la synthèse H_∞

Le problème de synthèse consiste à trouver le contrôleur K , qui à partir de la mesure y , génère la commande u permettant d'assurer les critères de robustesse et de stabilité requis. Cette dernière correspond à la stabilité des fonctions de transfert caractéristiques S , T , K_S , qui doivent avoir leurs pôles de partie réelle négative.

6. Résultats expérimentaux

6.1. Structure nominale

Nous avons développé deux contrôleurs adaptés à chacun des modes propres, en flexion et en torsion. Le contrôleur est un filtre en z , implémenté dans une boucle de contrôle programmée sous LabView. La fréquence dominante du signal d'accélération est mesurée et utilisée pour basculer le système dans un des deux régimes. Ainsi, lorsqu'elle est supérieure à 15 Hz, les deux vérins sont pilotés en phase pour s'opposer au mode de flexion. La figure (9b) représente une comparaison entre le système passif (transfert entre l'accélération en sortie et la force extérieure, sans activation) et le système actif contrôlé en flexion. Nous remarquons une atténuation significative d'environ 70% sur ce mode.

On bascule sur le contrôle du mode de torsion quand la fréquence devient inférieure à 15 Hz, les deux vérins étant alors pilotés en opposition de phase. Nous remarquons sur la Fig. 9a, une atténuation d'environ 36% du pic de torsion. La réponse bruitée de la structure est due au fonctionnement des activateurs. Ces derniers ont des capacités limitées et une réponse non-linéaire en raison des frottements internes et des performances du circuit hydraulique. Les signaux de consigne sont échantillonnés afin de protéger les actionneurs. C'est pour ces raisons qu'un contrôle dit robuste a été choisi.

6.2. Cas perturbé

Afin de tester la robustesse du contrôleur développé, on analyse la réponse de la structure dans un cas où celle-ci est perturbée par un ajout de masses représentant environ 15 % de sa masse initiale.

La figure 10, représente une comparaison de la réponse du système modifié sur le mode de flexion, avec et sans contrôle. On vérifie que le pic est décalé vers les basses fréquences ce qui est conforme à la perturbation appliquée. On constate surtout que le contrôle actif reste efficace et permet d'obtenir une atténuation importante d'environ 90%.

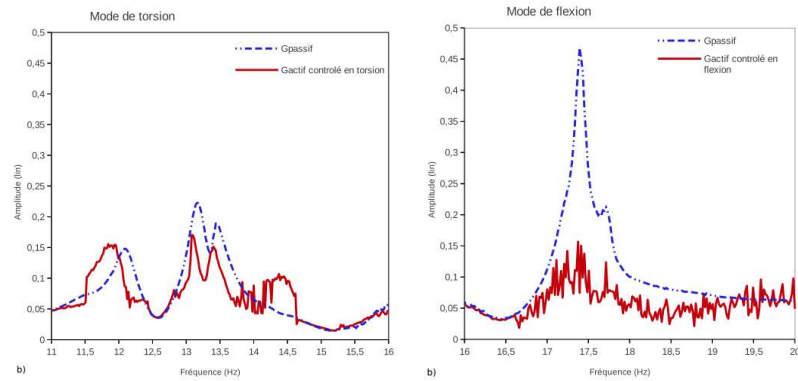


Figure 9. Comparaison passif-actif autour du pic. a) de torsion, b) de flexion

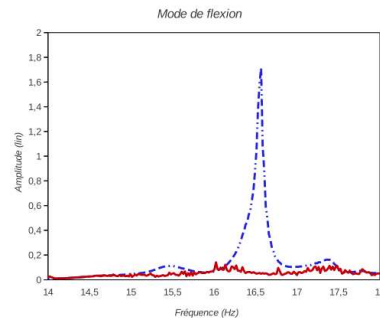


Figure 10. Contrôle actif avec la variation de la masse

7. Conclusion

Après l'étude des caractéristiques modales de notre structure de tensegrité plane à double nappe, nous avons développé une stratégie de contrôle actif liée aux modes rencontrés. Le contrôleur est construit sur des concepts robustes couplés à une modélisation simple de la structure. Celle-ci est caractérisée par morceaux par un comportement à 1 degré de liberté. Les paramètres du contrôleur sont définis en conséquence pour chaque plage de fonctionnement. La démarche originale permet d'obtenir des résultats très performants sur l'atténuation des modes propres. De plus, une légère mo-

dification des caractéristiques de la structure a montré que le système restait stable et efficace. La démarche doit être généralisée dans un premier temps sur d'autres modes en étudiant d'autres perturbations pour vérifier sa pertinence. La fréquence de basculement pourra aussi faire l'objet d'une adaptation aux caractéristiques de la structure identifiée à partir de signaux naturels. Enfin, nous nous intéresserons, par la modélisation, à la conception de nouvelles structures actives.

8. Bibliographie

- [ALZ 99] ALAZARD D., *Robustesse et commande optimale*, Editions Cépaduès, Toulouse, 1999.
- [AVE 05] AVERSENG J., DUBÉ JF., « Active control of a tensegrity plane grid », *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, Seville, 12-15 décembre 2005, p. 6830-6834.
- [DJO 98] DJOUADI S., MOTRO R., « Active control of tensegrity systems », *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 11, n° 2, 1998, p. 37-44.
- [DOY 82] DOYLE JC., « Analysis feedback systems with structured uncertainties », *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, vol. 129, n° 6, 1982, p. 242-250.
- [FEZ 08] FEZANS N., ALAZARD D., « H_∞ control design for generalized second order systems based on acceleration sensitivity function », *IEEE 16th Mediterranean conference on Control and Automation*, Ajaccio, 25-27 juin 2008.
- [FUL 73] FULLER R., *The dymaxion world of Buckminster Fuller*, Anchor Books, New York, 1973.
- [MOT 02] MOTRO R., « Tensarch : A tensegrity double layer grid prototype », *Fifth international conference on space structure*, University of Surrey, Guildford, UK, 19-21 août 2002, Thomas Telford, USA, p. 57-66.
- [MOT 05] MOTRO R., *Tenségrité*, Editions Hermès Lavoisier, Paris, 2005.
- [SAN 05] SANCHEZ L.R., « Contribution à l'étude mécanique des systèmes de tenségrité », Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, 2005.
- [SNE 73] SNELSON K., *Tensegrity Mast*, Shelter Publication, Bolinas, Californie, 1973.
- [TUA 13] TUANEJIE LI., « Robust vibration control of flexible tensegrity structure via μ synthesis », *Structural control and health monitoring*, vol. 20, n° 20, 2013, p. 173-186.