



**HAL**  
open science

## Les systèmes de tenségrité : mise en œuvre et contrôle

Julien Averseng, Jean-François Dubé, Bernard Crosnier

► **To cite this version:**

Julien Averseng, Jean-François Dubé, Bernard Crosnier. Les systèmes de tenségrité : mise en œuvre et contrôle. 17e Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. 6p. hal-00559930

**HAL Id: hal-00559930**

**<https://hal.science/hal-00559930>**

Submitted on 26 Apr 2023

**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.

## Les systèmes de tensegrité : mise en oeuvre et contrôle

Julien Averseng, Jean-François Dubé & Bernard Crosnier

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil – Université Montpellier II  
cc. 048 Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier  
averseng@lmgc.univ-montp2.fr

### Résumé :

*Les systèmes de tensegrité sont des systèmes réticulés spatiaux autocontraints peu répandus. Le travail présenté propose dans un premier temps une méthodologie pour le réglage des contraintes initiales qui sont indispensables à l'existence et la stabilité de ces systèmes. Celle-ci consiste à identifier un état d'autocontrainte déjà présent afin de le corriger vers un état cible en suivant un schéma expérimental simulé et conçu en fonction de contraintes sur les états de contraintes intermédiaires. Dans un deuxième temps, on s'intéresse au contrôle de ces systèmes dans le domaine statique et dans le domaine dynamique. Une application est menée sur une grille plane à double nappe comprenant six états d'autocontrainte.*

### Abstract :

*Tensegrity systems are selfstressed space reticulate systems. In this paper, we proposes on the one hand a methodology for the adjustment of the initial set of normal forces which are essential for the existence and the stability of these systems. This step consists in identifying a selfstress state already present and then to correct it towards a target state while following an experimental scheme simulated and designed according to constraints on the intermediate states. In the second time, we introduce a mixed static and dynamic control of these systems. An application is carried out on a double layered plane grid comprising six selfstress states.*

### Mots-clefs :

**tensegrité ; réglage de l'autocontrainte ; contrôle actif ; robustesse**

## 1 Introduction

Les systèmes de tensegrité constituent aujourd'hui une classe à part parmi les structures spatiales [1]. Ce sont des systèmes réticulés autonomes stabilisés par un état de contraintes initiales. Inspirant les architectes, ils permettent de concevoir des structures légères et visuellement transparentes. Malgré leurs atouts, les projets réels basés sur ce principe sont encore rares. En effet, les quelques réalisations existantes sont peu documentées sur l'étape cruciale du réglage des contraintes initiales et il n'existe pas de règlement qui puisse encadrer ce type de construction. Par ailleurs, ces systèmes ont encore à prouver leurs avantages face à des systèmes réticulés traditionnels dont la mise en oeuvre est maîtrisée.

Cet article expose un bilan de nos travaux visant à contribuer à l'essor de ces systèmes dans le Génie Civil en proposant de contrôler leur état en phases de mise en oeuvre et d'exploitation. Un des aspects critiques pour ces systèmes réside dans le besoin d'être en constant état d'autocontrainte. À l'image de la pression à l'intérieur d'une enveloppe gonflable, cet état conditionne rigidité et stabilité. Le respect des règles de construction impose donc de maîtriser le niveau et la répartition des efforts pendant l'exploitation de l'ouvrage. On présente en première partie une méthodologie permettant la correction d'un état vers un état cible, conçu en fonction des besoins de rigidité et de la résistance des composants [2]. Par ailleurs, ces systèmes légers, comme toute structure, sont sensibles aux forces extérieures d'exploitation et d'environnement.

La deuxième partie propose de contrôler activement les déplacements autour d'une géométrie de référence pour en maîtriser l'amplitude dans le domaine statique et dynamique [3]. L'ensemble de ce travail est exploité expérimentalement sur une grille plane comprenant six états d'autocontrainte.

## 2 Réglage de l'autocontrainte

### 2.1 Identification

Le principe général repose en deux étapes : une identification de l'état actuel puis une correction vers l'état cible. À partir d'une série de mesures locales d'effort normal, on cherche à reconstruire l'état d'autocontrainte actuel. On prend comme hypothèse que la structure se trouve au voisinage d'une géométrie de référence connue. Dans ce cas, on sait que l'état d'autocontrainte est généré par un ensemble d'états fondamentaux qui constituent une base d'autocontrainte  $[T_0^b]$ . On établit cette base en calculant le noyau de la matrice d'équilibre du système d'origine purement géométrique. Ainsi, identifier un état revient à trouver l'état généré par la base d'autocontrainte qui est le plus représentatif des mesures actuelles  $\{T^a\}$  en calant une combinaison  $\{\alpha^a\}$  sur  $[T_0^b]$ . On trouve une solution simple et unique à ce problème par l'intermédiaire du pseudo-inverse  $[T_0^b]^\dagger$  de Moore-Penrose :

$$[T_0^b] \{\alpha^a\} \approx \{T^m\} \Rightarrow \{\alpha^a\} = \left( [T_0^b]^t [T_0^b] \right)^{-1} [T_0^b]^t \{T^m\} = [T_0^b]^\dagger \{T^m\} \quad (1)$$

### 2.2 Correction

Connaissant l'état d'autocontrainte actuel, on cherche à le faire converger vers un état d'autocontrainte cible prédéfini en modifiant la longueur d'un certain nombre de composants. Le problème se pose donc sur le choix de ces composants "actifs" parmi l'ensemble des éléments qui permettent un réglage et sur la détermination des variations de longueurs réelles à leur apporter. Par ailleurs, il est important de maîtriser au cours de cette correction le niveau des efforts ainsi que la distorsion de la géométrie. Agissant sur un système hautement hyperstatique, le problème ne peut donc se considérer que globalement.

En supposant que les variations géométriques restent faibles et que le comportement est élastique linéaire, le passage de l'état actuel à l'état cible est assimilable à une combinaison linéaire d'influences élémentaires  $\{dT_i\}$ , définies comme la variation d'état faisant suite à une modification unitaire de longueur libre  $l_i^{lib}$ . Comme en (1), on exprime cette variation de longueurs sous une forme matricielle. On extrait de manière analogue une solution par l'inverse généralisé. Il s'agit cette fois du calage d'une combinaison linéaire des influences sur la variation d'état d'autocontrainte.  $\{T_c\} - \{T_a\}$ .

$$\{T_c\} - \{T_a\} \approx \sum_i \beta_i^{corr.} \{dT_i\} = [dT^b] \{\beta^{corr.}\} \quad (2)$$

$$\{\beta^{corr.}\} = [dT^b]^\dagger (\{T_c\} - \{T_a\}) \quad (3)$$

À partir de la solution  $\beta^{corr.}$  issue de (3) et en employant une famille constituée des influences de tous les composants réglables, on sélectionne les composants dont le facteur d'influence  $\beta_i$  dépasse une amplitude significative. La solution est ensuite recalculée à partir de cette base d'influence réduite. La valeur seuil doit être supérieure à la tolérance sur les mesures d'efforts.

Pour maîtriser le chemin parcouru entre l'état actuel et l'état cible, on détermine un ordre d'implémentation des corrections par un schéma itératif. À chaque étape la correction reste au plus proche du chemin linéaire entre l'état actuel et cible. De plus, il faut que chaque correction reste inférieure à une amplitude seuil au-delà de laquelle la variation des efforts est trop importante. La correction est alors divisée en sous-étapes ce qui conduit au final à intervenir plusieurs fois sur le composant actif correspondant.

Les longueurs libres n'étant pas mesurables, les corrections ne peuvent être faites que sur les longueurs en place. La méthode s'appuie donc sur une simulation du processus en non-linéaire (Newton-Raphson) par méthode des déplacements pour en obtenir la succession des variations de longueur en place. Celles-ci sont ensuite appliquées à la structure en utilisant un outil de mesure de longueurs différentiel. Le logiciel de calcul *Tenségrité 2000* développé spécifiquement [4] se base sur un modèle état du système qui mêle la géométrie et les longueurs libres.

### 2.3 Exemple

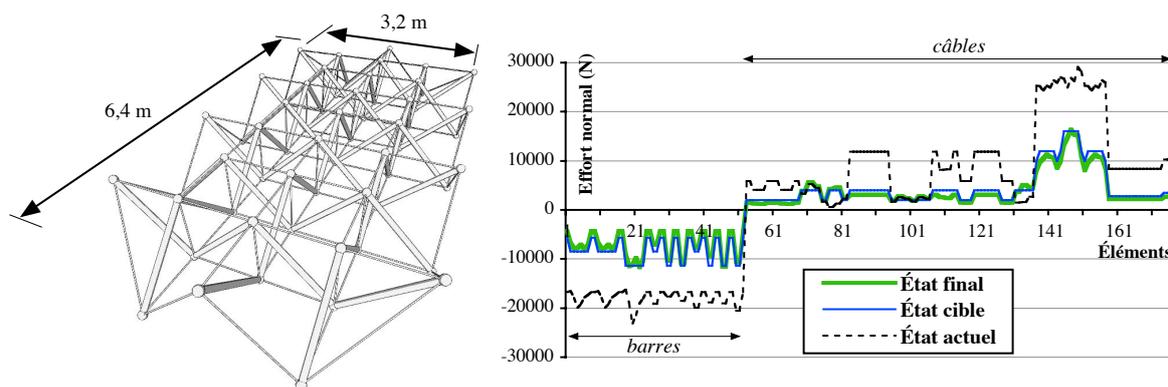


FIG. 1 – Mise en tension d'une grille plane

Notre terrain d'expérimentation est une grille plane de  $3,2 \times 6,4 \text{ m}^2$ , comprenant 177 composants et 6 états d'autocontrainte (figure 1). Plusieurs expériences de mise en tension ont été effectuées et montrent que la méthode proposée permet de converger rapidement vers un état cible prédéterminé. La figure 1 montre le résultat du passage d'un état actuel de niveau élevé à un état cible régulier et de niveau plus faible. Les mesures sont faites sur un ensemble limité aux câbles tendus verticaux par une méthode dynamique indirecte [5]. L'état final dans cet essai est obtenu en 38 étapes de réglage faisant intervenir 19 composants actifs. Les variations de longueurs atteignent au total 8 mm pour certains composants mais sont limitées à 3 mm par étape.

### 3 Contrôle actif

Les systèmes de tenségrité ont un grand potentiel d'applications. En tant que structures légères, ils sont employés pour des ouvrages de couvertures, en couplage avec des composants vitrés ou textiles, ou pour des ouvrages de franchissement comme les passerelles pour piétons.

Leurs caractéristiques uniques de légèreté et d'autocontrainte est un avantage qui permet d'envisager de les utiliser comme structures actives [6] et de contrôler leur comportement. Cette section expose les étapes de conception et de mise en œuvre d'une grille plane active à partir d'un système réel. Ce travail vise avant tout à démontrer l'intérêt et la faisabilité d'un contrôle des déplacements dans le domaine statique et dynamique avec ce type de structure.

### 3.1 Mode d'activation

Les activateurs ont pour mission d'induire des déplacements qui doivent s'opposer à ceux qui sont induits par les chargements extérieurs, d'exploitation ou climatiques. Ces déplacements correspondent également à différents modes propres de torsion et flexion de la structure. Le schéma d'intégration proposé consiste à produire localement en surface du système autocontraint une variation des efforts, à l'image des composants piézo-électriques que l'on trouve sur les structures continues [7]. La différence est que l'on agit sur un système réticulé et plus précisément au niveau de nappes de câbles en tension.

Le dispositif proposé consiste en un activateur linéaire venant écarter un point de la surface relié à plusieurs câbles tendus, créant ainsi localement une surtension. Ce dispositif reproductible en plusieurs endroits permet d'agir globalement, en induisant de la flexion ou de la torsion par exemple, et suit un principe qui est généralisable à d'autres structures du même type.

### 3.2 Schéma général

Le système est contrôlé dans deux domaines : en statique pour contrer les effets de chargements longs et en dynamique pour atténuer les vibrations propres. Ces deux objectifs sont confiés à un seul dispositif d'activation dont la commande est générée par deux boucles de régulation en parallèle : l'une dédiée au contrôle des déplacements en statique, l'autre en dynamique dédiée à l'atténuation des accélérations.

### 3.3 Lois de contrôle

En statique, la loi de contrôle est une boucle PI, stable et robuste dans ce domaine. En revanche, une commande de ce type n'est pas recommandée en dynamique car les incertitudes et les perturbations sur le comportement du système (relaxation, gradients thermiques, masses additionnelles) entraînent des instabilités. Il est donc nécessaire de porter attention sur la robustesse de la loi de contrôle à synthétiser. Ainsi, nous avons employé une méthode de type  $H_\infty$  dans laquelle les incertitudes et variations paramétriques du comportement sont prises en compte dès le départ [8]. Son principe est de minimiser la norme infinie du transfert entre des perturbations en entrée et des sorties de critères, pondérées en fonction du cahier des charges imposé aux signaux de la boucle fermée.

## 4 Résultats expérimentaux

L'expérience est menée sur la grille présentée en figure 1. Le dispositif d'activation est composé de vérins hydrauliques V1 et V2 intégrés en deux points de la nappe inférieure (figure 2). Cette solution est la mieux adaptée pour agir sur les premiers modes, en torsion (9 Hz) et en flexion (15 Hz). Les activateurs sont alimentés en énergie par un groupe hydraulique extérieur et sont pilotés par une carte d'axe qui contrôle, à bas niveau, leur allongement. Celle-ci reçoit

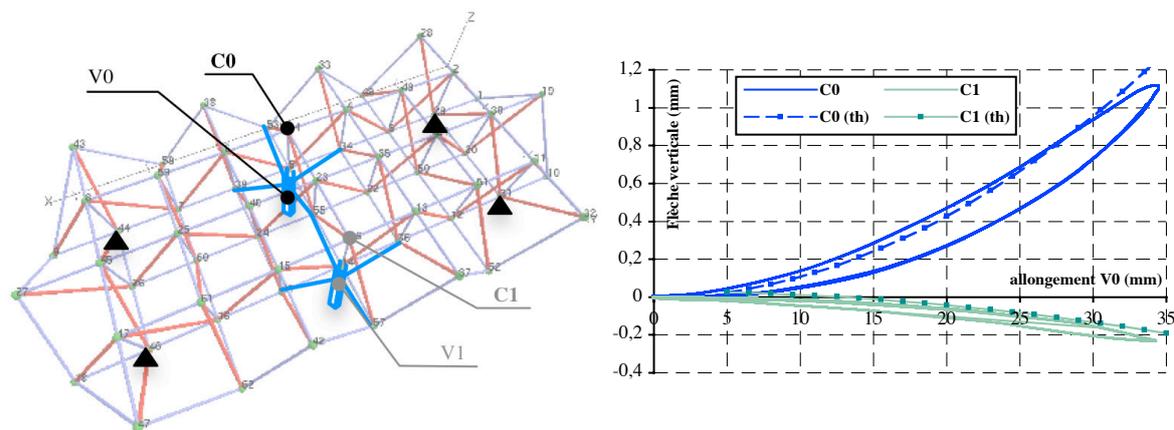


FIG. 2 – Schéma du dispositif – Effet sur la flèche en C0 et C1 de l'allongement de l'activateur V0 en comparaison avec les valeurs théoriques

une consigne mixte générée par un poste superviseur sous LabView<sup>TM</sup> à partir des signaux de déplacement et d'accélération mesurés en deux points C0 et C1 (voir figure 2) à un taux de 200 échantillons/s. En figure 2, on montre la variation de flèche en ces deux points suite à l'allongement de l'activateur V0 montrant une torsion de l'ensemble de la grille. Ce résultat se superpose bien aux valeurs issues du modèle numérique.

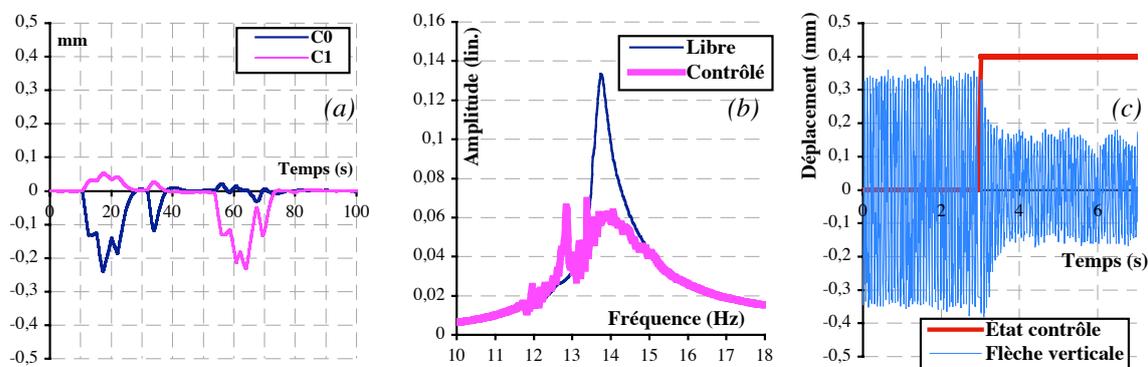


FIG. 3 – Contrôle en statique (a) – Amortissement actif du premier mode de flexion (b et c)

La figure 3 rapporte les résultats du contrôle dans les deux domaines. On y voit que le système actif conserve une flèche imposée en présence de perturbations (a), introduites ici sous la forme d'un chargement statique. Sur le plan dynamique, le pic de résonance en flexion est sensiblement atténué (b et c), même lorsque l'on vient, comme dans le cas présenté, décaler le comportement dynamique de la structure en augmentant sa masse. Le contrôleur synthétisé se montre robuste à une variation paramétrique modérée du comportement.

## 5 Conclusion

L'autocontrainte est une donnée essentielle pour les systèmes de tensegrité. Rarement considéré, cet état est pourtant capital lorsque l'objectif est de développer de telles structures dans le domaine du Génie Civil. La méthodologie de réglage présentée en première partie, par des moyens usuels, contribue au contrôle de cet état en permettant de l'identifier pour le corriger. La démarche choisie apporte une solution globale au problème en une série ordonnée de corrections.

Le deuxième objectif de ce travail est d'explorer la pertinence d'un contrôle actif des déplacements. Les systèmes de tensegrité, en tant que structures légères et flexibles, se prêtent potentiellement bien au contrôle actif. Leur nature analogue aux structures gonflables nous a mené à proposer un mode d'action en surface emprunté aux dispositifs actifs en milieux continus. Ce principe est appliqué ici sur une grille plane pour agir sur les modes de torsion et de flexion. La commande est traitée séparément dans deux domaines, statique et dynamique, avec une exigence de robustesse. Les résultats montrent qu'il est possible d'annuler les effets d'un chargement statique et de diminuer les résonances propres d'une structure au comportement variant. Il semble donc permis de d'envisager la concrétisation de structures légères originales qui soient aussi rigides et sûres.

## Références

- [1] R. Motro. *Tensegrity*. Kogan Page Science, août 2003.
- [2] J. Averseng and B. Crosnier. Prestressing tensegrity systems – application to multiple self-stress systems. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 4(4) :543–557, December 2004.
- [3] J. Averseng and B. Crosnier. Static and dynamic robust control of tensegrity systems. In R. Motro, editor, *Shell and Spatial Structures, from Models to realization*, pages p.p. 114–115. Editions de l'Espérou, 20-24 septembre 2004.
- [4] J. Quirant. *Systèmes de tensegrité et autocontrainte : qualification, sensibilité et incidence sur le comportement*. PhD thesis, Université Montpellier II, 2000.
- [5] B. Crosnier and F. Cevaer. Stratégies de mise en prétension dans les systèmes de tensegrité et contrôles. In *Colloque Lagrange, Tensegrité : analyse et projets*, Rome, 2001.
- [6] K. Shea, E. Fest, and I. Smith. Developing intelligent tensegrity structures with stochastic search. *Advanced Engineering Informatics*, 16 :21–40, 2002.
- [7] H. Irschik. A review on static and dynamic shape control of structures by piezoelectric actuation. *Engineering Structures*, 24 :5–11, 2002.
- [8] K. Zhou, J.C. Doyle, and K. Glover. *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall, NJ, 1996.