

**Zeitschrift:** Tracés : bulletin technique de la Suisse romande  
**Herausgeber:** Société suisse des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 131 (2005)  
**Heft:** 04: Air structurel

**Artikel:** La structure Tensairity, calculs par éléments finis  
**Autor:** Steingruber, Patrick / Pedretti, Andrea / Pedretti, Mauro  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-99366>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# La structure *Tensairity*, calculs par **éléments finis**

STRUCTURE

Le calcul statique de la couverture du parking de Montreux a été effectué avec le programme d'éléments finis ANSYS 7.1, en particulier pour ce qui concerne les poutres porteuses *Tensairity*® et les toiles qui les recouvrent. Ce type de structure nécessite des calculs avancés par ordinateurs en raison de leur caractère doublement non-linéaire : géométrique - avec des déformations importantes - et du point de vue des matériaux.

Le calcul des poutres *Tensairity* doit s'effectuer par étape. La première consiste à ne considérer que la charge induite par la pression intérieure du tube pneumatique. Les efforts et les déformations qui en résultent sont alors utilisés comme conditions initiales pour la seconde étape, où les charges extérieures sont appliquées par paliers à la structure.

Deux phénomènes bien distincts servent de critère pour la résistance ultime de la structure : soit un des matériaux atteint

sa limite d'élasticité, soit un des éléments en compression flambe. Dans le premier cas, il suffit de vérifier que les contraintes agissant dans les différents éléments restent limitées à des valeurs acceptables. Le recours à des critères de rupture ou à des lois constitutives élasto-plastique pour les matériaux est inutile, puisque les poutres *Tensairity* n'autorisent pas une redistribution des contraintes sur d'autres parties de la structure : étant statiquement déterminées comme poutres simples, des lois élastiques anisotropes non-linéaires sont suffisantes.

Le calcul de la charge maximale admissible de flambage est plus difficile. Il peut se faire par la méthode de la bissection, basée sur l'algorithme de Newton-Raphson. Le logiciel applique la charge par étapes jusqu'à s'approcher de la charge critique. La dernière charge conduisant à une convergence du système correspond approximativement à la solution. Il est aussi possible de calculer la solution exacte en utilisant l'algorithme de la longueur d'arc (avec lequel la convergence n'est pas garantie), mais la différence est généralement insignifiante en terme de dimensionnement et engendre un accroissement de la sécurité.

La forme des poutres *Tensairity* a été modélisée avec le programme *Mathcad*. Les deux courbes de la section longitudinale des *Tensairity* sont des arcs de cercle de rayons différents qui se coupent sur les appuis (fig. 1). Les sections transversales sont toujours des cercles afin d'assurer l'équilibre statique de la membrane. Le diamètre de la section située au milieu de la portée définit la hauteur statique de la poutre. Les diamètres vont en rétrécissant en direction des appuis, pour se terminer par un point. Cette géométrie permet une définition purement analytique de la surface.

L'optimisation formelle des poutres *Tensairity* et des toiles de la couverture a été établie en considérant deux cas de charge extérieure : la charge de la neige et la composante verticale du vent. Ces deux éléments agissent selon une même direction verticale, mais leur sens est opposé. Compte tenu de la double courbure des toiles (fig. 2), l'effet de ces deux cas de charge se traduit de façon très différente sur les poutres.

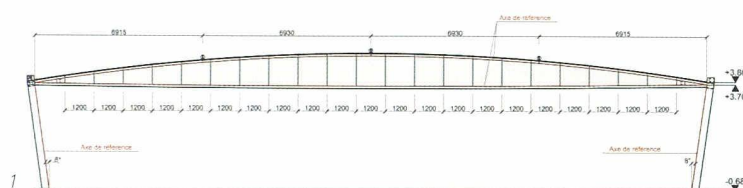




Fig. 1 : Elévation d'une poutre Tensairity

Fig. 2 : Double courbure des toiles entre les poutres

Fig. 3 et 4 : Maillage des éléments de toiture

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

En raison de la courbure négative de la membrane entre les poutres, la charge de la neige est transmise de la toile aux poutres de *Tensairity* selon une direction perpendiculaire à ces dernières. Ce cas de charge conduit donc à une sollicitation en flexion des poutres.

En revanche, les charges dues au vent induisent des efforts de compression dans les poutres. Entre ces dernières, la toile présente en effet une courbure positive selon une direction parallèle aux poutres. En présence de forces verticales de succion dues au vent, la membrane exerce un effort sur les poteaux servant d'appui aux *Tensairity*. La composante horizontale de cet effort se traduit par une compression des poutres *Tensairity*.

Les formes des divers éléments ont été optimisées sur la base de ces deux cas de charge, en considérant l'effet de la forme de la toile de couverture sur les efforts et le comportement non-linéaire de la structure. Cette optimisation n'a donc pas été le résultat d'un processus direct, mais a été obtenue par des itérations au cours desquelles les efforts résultant de diverses géométries ont dû être calculés.

Les fichiers d'« input » pour le programme d'éléments finis ont été créés à partir des équations décrivant la surface des *Tensairity*, en utilisant le langage ADPL (ANSYS Parametric Design Language). Ces fichiers génèrent automatiquement les nœuds et les éléments du modèle selon un maillage qui dépend de plusieurs paramètres tels que la longueur, le rayon de courbure, le diamètre maximal du tube, etc. (fig. 3 et 4). Ils contiennent également les degrés de liberté des nœuds, les caractéristiques des éléments, les charges et les options générales pour les calculs non-linéaires.

Les différentes parties de la structure ont été modélisées avec des éléments *SHELL181*. Ce type d'élément est particulièrement approprié pour des calculs non linéaires (géométrie et matériaux).

Les parties supérieures et inférieures de la poutre *Tensairity* ont des sections identiques (TPS 200/100/5), dont les parois ont été modélisées avec des éléments *SHELL181* d'une épaisseur de 5 mm, et on admet que l'acier qui les compose est élastique linéaire.

La modélisation des membranes des *Tensairity* et de la toile de couverture a été beaucoup plus laborieuse, puisque les tissus qui les composent ont un comportement anisotrope, à savoir que leurs propriétés dans le sens de la trame diffèrent de celles en direction de la chaîne. Le programme d'éléments finis peut prendre en considération cette différence en définissant un matériel orthotrope. Pour les tissus, l'idéal serait évidemment un élément de type membrane, résistant uniquement à la traction.

Les éléments *SHELL181* offrent la possibilité de simuler des membranes. Pour le faire, il faut limiter à un seul le nombre de points d'intégration selon l'épaisseur de l'élément. Toutefois, ce genre d'élément pose des problèmes de convergence lorsque les charges agissent perpendiculairement à la surface de l'élément - ce qui est le cas avec la pression intérieure qui sert de premier cas de charge. Ces problèmes sont dus au fait que la membrane doit légèrement se déformer pour pouvoir porter les charges extérieures. Il existe cependant une astuce pour éviter ce problème : il s'agit de placer des ressorts de faible rigidité sous chacun des nœuds. Une fois la convergence du calcul de la première étape atteinte, les ressorts peuvent être éliminés.

Les outils informatiques actuellement à disposition permettent une analyse complète de structures extrêmement complexes (forte non-linéarité). Les ingénieurs ont l'avantage de pouvoir combiner différents types de sollicitations (d'origine thermique, dynamique des fluides ou charges statiques). Les calculs par éléments finis assurent non seulement un dimensionnement optimal des structures, mais ils contribuent également à une meilleure compréhension de leur fonctionnement.

Patrick Steingruber, ing. civil EPFZ  
Andrea Pedretti, ing. civil EPFZ  
Mauro Pedretti, dr sc. tech., ing. civil EPFL

Airlight Ltd, via Croce 1, CH - 6710 Biasca

