
Des plateformes de tensegrité à double nappe, une solution d'accessibilité à la mer

HRAZMI Issam¹, AVERSENG Julien², QUIRANT Jérôme², JAMIN Frédéric²

¹ Laboratoire de Mécanique et Génie Civil – UMR 5508, Université de Montpellier, CC048, 163 rue Auguste Broussonnet, 34090 MONTPELLIER, issam.hrazmi@umontpellier.fr²

² Laboratoire de Mécanique et Génie Civil – UMR 5508, Université de Montpellier, CC048, 163 rue Auguste Broussonnet, 34090 MONTPELLIER

RÉSUMÉ. Les systèmes de tensegrité sont des structures spatiales formées de barres comprimées en équilibre dans un réseau de câbles tendus. Leur rigidité dépend à la fois des propriétés mécaniques des éléments et de leurs efforts internes introduits durant l'assemblage. Grâce à leurs propriétés structurales, nous répondons à la problématique de l'accessibilité à la mer en offrant une solution légère, permettant un montage/démontage aisé et respectant la loi littoral. Des plateformes de configurations variables et capables d'épouser d'une manière écologique le milieu marin sont désormais réalisables grâce à des structures de tensegrité à double nappe. Cette étude, aussi bien numérique qu'expérimentale, dévoile les différents aspects structurels et conceptuels de cette solution qui permettent de valider ses capacités mécaniques ainsi que sa faisabilité, notamment à travers la modulabilité, le pliage/déploiement et l'implantation. De l'optimisation structurale des éléments sous contrainte de légèreté et résistance, nous aborderons la conception des nœuds, composants complexes indispensables assurant la géométrie et le pliage de la structure mais aussi son interaction avec son environnement.

ABSTRACT. Tensegrity systems are a class of reticulated space structures composed of compressed bars maintained in equilibrium by a network of tensioned cables. Their stiffness depends both on the mechanical properties of the elements and their internal self-stress state. Taking advantage of their structural properties, we respond to the challenge of accessibility to the sea with modular lightweight and transparent platforms. Variable configurations are developed to fit ecologically into the marine environment thanks to double layer tensegrity structures. Moreover, allowing easy assembly/disassembly we respect also the coastal law. This study, both numerical and experimental, sheds light on the different structural and conceptual aspects of this solution, thus validating its mechanical capabilities as well as its feasibility, particularly through the aspects of modularity, folding/deployment and setup. After the structural and design optimization of elements constrained by weight and stiffness, we detail the design of the nodes, which are the key components to ensure the geometry and foldability of the structure but also the interaction with its supports.

MOTS-CLÉS : tensegrité, plateforme aquatique, accessibilité à la mer, pliage, conception de nœud

KEY WORDS: tensegrity, offshore platform, sea accessibility, foldability, node design

1. Contexte

Aujourd'hui, peu d'infrastructures répondent réellement aux besoins des personnes handicapées pour accéder en toute autonomie à la mer. Il existe des fauteuils amphibies et différents types de cheminement de plage, mais les personnes handicapées restent ensuite dépendantes d'un accompagnant pour évoluer dans l'eau, se retrouvant donc « parquées » au bord de l'eau, cantonnées à observer les « valides » profiter des plaisirs de la baignade sans avoir les moyens de les rejoindre. En lien avec un groupe d'architectes et les instances publiques concernées par cet enjeu, l'équipe SIGECO du LMGC s'est engagée à répondre au besoin de l'accessibilité à la mer en respectant les lois de protection du littoral, en proposant une nouvelle solution de plateformes modulables à base des structures de tenségrité, légères, transparentes et pliables.

Les structures de tenségrité [MOT 03] sont une famille de structures réticulées spatiales composées de barres en compression intégrées dans un réseau de câbles en traction. Leur rigidité et stabilité sont dépendantes de mécanismes et d'états d'autocontrainte déterminés dans un procédé dit de recherche de forme qui traduit un couplage entre leur forme et les efforts internes mis en jeu. Par ailleurs, l'assemblage de structures de tenségrité élémentaires régulières permet de générer des structures modulaires de configurations variables, notamment des grilles spatiales, telles celles développées dans le cadre du projet Tensarch [MOT 02] qui est la base de la présente étude. Il s'agit des grilles à double nappe constituées par l'assemblage de barres formant deux à deux des V imbriqués, reliées par des câbles verticaux « tendeurs ».

Pour répondre à l'enjeu de l'accessibilité à la mer tout en respectant la loi littoral, une solution dérivée du projet Tensarch est développée [AVE 15]. Il s'agit d'une plateforme modulaire (Fig. 1) constituée d'une grille à double nappe, la structure porteuse, et d'éléments surfaciques de type panneau, qui reprennent les charges d'exploitation et les transmettent à la structure directement ou via des « béquilles » supplémentaires, mais qui permettent aussi de bloquer les mécanismes intrinsèques de la structure [JAM 17]. L'ensemble des charges est transmis aux fondations via un certain nombre de nœuds de la nappe inférieure. Grâce à leur configuration relationnelle, les grilles peuvent être générées par duplication de modules indépendants permettant ainsi plus de maniabilité aussi bien sur le plan logistique, la mise en service ou encore le pliage et le déploiement. Ainsi, cette étude est principalement focalisée sur des plateformes composées d'un ou plusieurs modules de 3x3 cellules cubiques de 1 m de côté.

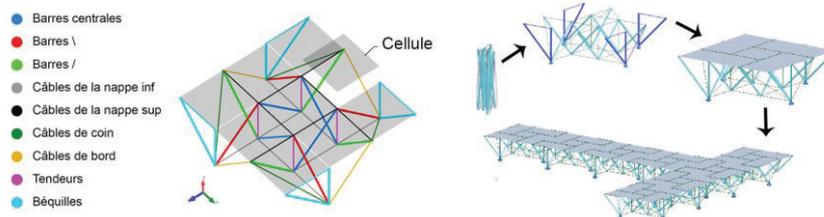


Figure 1. Illustration des différentes étapes de la mise en place d'une plateforme Tensarch.

2. Etude structurelle

La mise en service d'un module d'une plateforme se fait par l'introduction de l'état d'autocontrainte [QUI 03] par raccourcissement des tendeurs qui génère en conséquence la diffusion des efforts internes dans le reste des éléments. Sans chargement extérieur, les efforts internes dans les éléments varient linéairement en fonction du raccourcissement (Fig. 2).

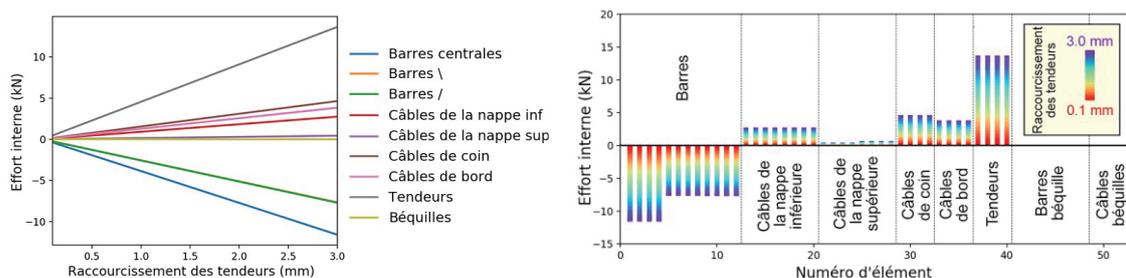


Figure 2. Variation des efforts internes des éléments de la plateforme en fonction du raccourcissement.

Par ailleurs, afin de garantir une stabilité et une rigidité optimales, plusieurs configurations (Fig. 3) d'appuis ont été étudiées et comparées selon un certain nombre de critères, notamment les déplacements relatifs et la distribution des efforts internes dans les éléments, mais aussi la superficie se trouvant en porte-à-faux. Pour les différents cas de chargements et raccourcissement des tendeurs, la configuration d'appuis « A », pour ce module 3x3, est la plus pertinente.

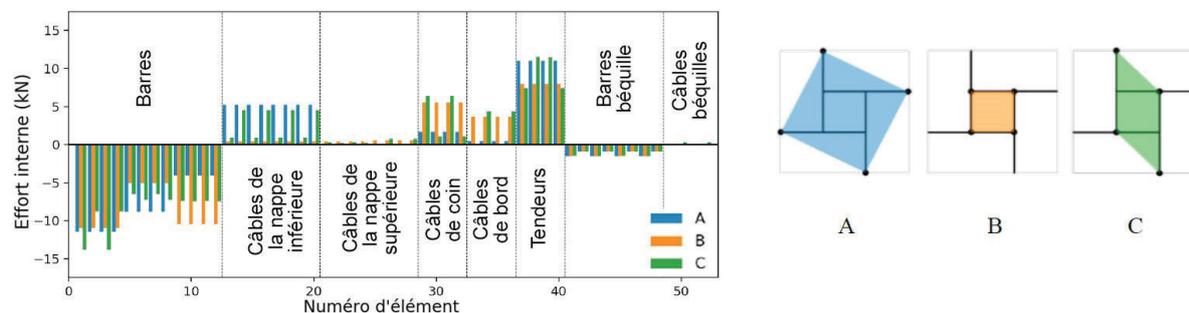


Figure 3. Diagramme des efforts internes en fonction des conditions d'appuis (A, B et C) d'une plateforme à un seul module ($Q=3\text{kN/m}^2$, $\delta l=2\text{mm}$).

D'un point de vue structurel, la génération de plateformes à plusieurs modules impose la suppression de certains éléments béquilles et éventuellement la substitution d'autres en fonction de leur rôle et des conditions d'appui de l'ensemble. En effet, il peut être plus pertinent de placer un tendeur à la place d'une béquille au droit d'un appui supprimé si cet élément est amené à rester en tension. Plusieurs schémas de conditions d'appui sont étudiés (Fig. 4) afin d'optimiser le nombre d'appuis de plateforme multi-modules tout en garantissant rigidité et stabilité.

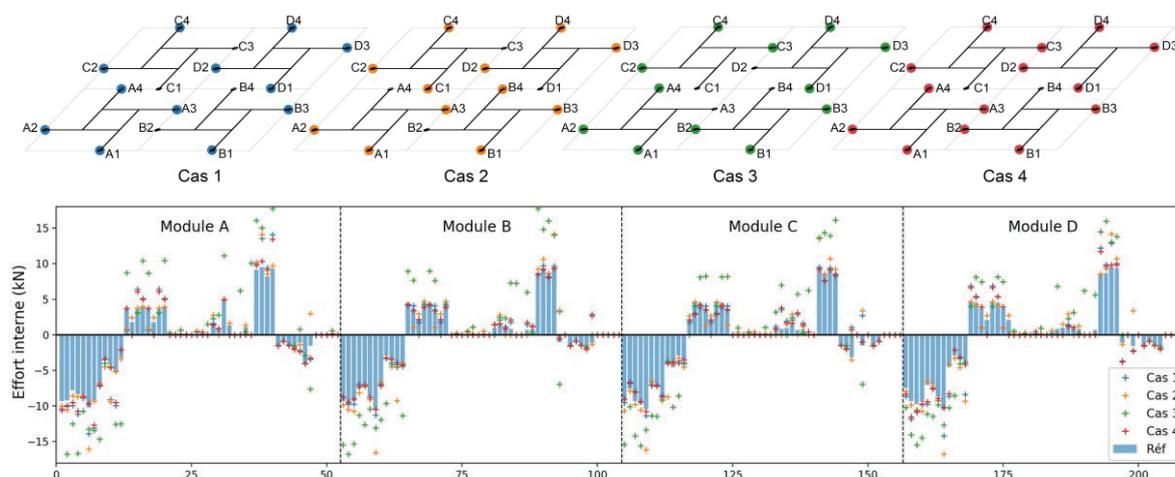


Figure 4. Schémas du réseau d'appuis de la nappe inférieure pour une plateforme de 4 modules - Diagrammes des efforts internes pour différentes conditions d'appuis ($Q=3\text{kN/m}^2$, $\delta l=2\text{mm}$).

Ainsi, dans ce compromis, la suppression de certains appuis peut induire des efforts internes très importants notamment dans le cas 3 où un appui au droit du nœud central, commun à tous les modules, n'est pas considéré.

3. Conception et assemblage

En complément de la structure, l'autre principale contribution dans cette solution est dans les nœuds, de par leurs multiples fonctions, notamment assurer d'une part les liaisons entre les éléments, et donc la géométrie de la structure, et d'autre part les interfaces avec les appuis et les panneaux. De plus, les nœuds doivent permettre un montage à la fois pratique et rapide par un mécanisme de pliage/dépliage. Pour cela, 3 familles de nœuds sont distinguées : les nœuds « de bord » NB, les nœuds d'angle NA et les nœuds courant NC. Chaque type de nœud est conçu en CAO paramétrique, afin de pouvoir adapter les angles d'incidence des éléments aux dimensions des mailles élémentaires. Le prototypage fait ensuite appel aux moyens techniques du LMGC, notamment un centre d'usinage 3 axes (Fig 5).

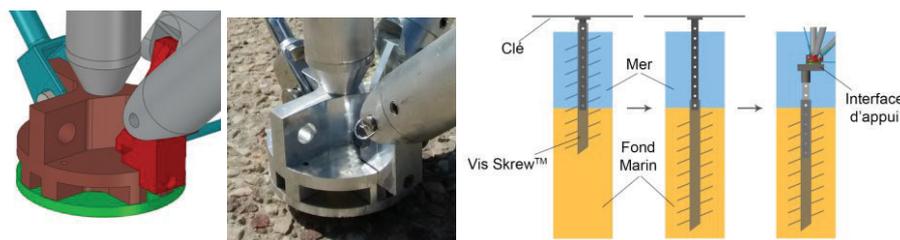


Figure 5. *Nœud de coin en conception (gauche) et assemblé (centre) – Dispositif d'implantation (droite)*

4. Aspects expérimentaux

Un des enjeux de cette solution de plateforme est sa mise en place dans le milieu marin. Pour les fondations, la solution envisagée est sous forme d'appuis vissés dérivé d'une ancre Skrew™ ou vis à sable. L'implantation de cette dernière est assurée par rotation à l'aide d'une clé dédiée qui s'adapte à la profondeur de l'ancrage (Fig. 4). Les quatre appuis d'un module sont implantés successivement au coin d'un système simple conçu à partir d'un triangle isocèle, droit et de côtés variables dont les coins sont démontables et conçus de sorte à épouser le contour du tube intermédiaire entre la vis Skrew™ et la clé. Un premier essai sur site a pu être mené en juin 2018 à Port Camargue (Fig. 6), dans le cadre de projet de fin d'études en DUT au département Génie Civil de l'IUT de Nîmes. Le retour de cette première expérience a permis de consolider la conception des liaisons au sol, pour une deuxième campagne de tests au printemps 2019.



Figure 6. *Vue sur un prototype (échelle 1:1) testé en mer à Port Camargue (Gard).*

5. Conclusion

Les systèmes de tensegrité, par leur propriété de légèreté, modularité et pliability, se présentent comme une solution au problème de l'accessibilité en milieu isolé, et plus généralement, pour la création de plateformes aisément montables avec peu d'impact. Des défis en conception, notamment sur le calepinage de modules mais aussi la réalisation des nœuds, sont abordés, par une démarche liant études structurelles et prototypage. Cette approche expérimentale et la construction de démonstrateurs, en lien avec le public handicapé, est capitale pour convaincre tous les acteurs potentiellement impliqués dans la réalisation de solutions concrètes sur le littoral (mairies, métropoles, département...). Les auteurs remercient la SATT AxLR, le département Génie Civil de l'IUT de Nîmes et la Région Occitanie pour leur soutien dans ce projet.

6. Bibliographie

[MOT 02] MOTRO R., « *Tensarch Project* », Fifth International Conference on Space Structures, 2002.

[MOT 03] MOTRO R., *Tensegrity, Structural systems for the future*, Hermès Pinton Sciences, 2003

[AVE 15] AVERSENG J., JAMIN F., QUIRANT J., *Les systèmes de tensegrité déployables : application à l'accessibilité de la baignade en mer*, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27-29 mai 2015

[QUI 03] QUIRANT J., KAZI-AOUAL M.N. and MOTRO R., *Designing tensegrity systems: the case of a double layer grid*. Elsevier Science Lt, 2003.

[JAM 17] JAMIN F., QUIRANT J., AVERSENG J. and DEVIC S., *Assembly of foldable tensegrity modules*. Patent N° EP2017/061533. 15 mai 2017. Available at <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017194775>.