



HAL
open science

Les systèmes de tenségrité déployables : application à l'accessibilité de la baignade en mer

Julien Averseng, Frédéric Jamin, Jérôme Quirant

► **To cite this version:**

Julien Averseng, Frédéric Jamin, Jérôme Quirant. Les systèmes de tenségrité déployables : application à l'accessibilité de la baignade en mer. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167613

HAL Id: hal-01167613

<https://hal.science/hal-01167613v1>

Submitted on 24 Jun 2015

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 déployables : application à l'accessibilité de la baignade en mer

Julien Averseng¹, Frédéric Jamin², Jérôme Quirant²

¹ Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508 UM2-CNRS, Université de Montpellier, 34095 Montpellier Cedex 5, julien.averseng@um2.fr

² Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508 UM2-CNRS, Université de Montpellier, 34095 Montpellier Cedex 5

RÉSUMÉ. Dans cet article, nous présentons une solution technique permettant l'accès et l'immersion en toute autonomie des personnes en situation de handicap. Il s'agit d'une structure légère déployable permettant de réaliser un ponton utilisable par une personne à mobilité réduite. La pliabilité du système est un atout qui a pour but de faciliter le stockage, le transport, l'installation sur site mais aussi sa libération en fin de concession à chaque saison. La structure est une grille de tensegrité développée au LMGC dans le cadre du projet Tensarch, qui permet de constituer un plancher rigide et stable au dessus de l'eau tout en minimisant le poids et, par sa transparence, l'effet des actions dues à la houle. Ce système modulaire permet par assemblage, de constituer des cheminements de grandes longueurs sur tout profil de terrain, donnant accès à des zones de baignade de profondeur suffisante. La cinématique du déploiement, qui part d'une forme de fagot pour arriver à la structure, est étudiée numériquement puis expérimentalement. Nous présentons dans cet article à la fois les verrous scientifiques et technologiques qui ont été levés depuis pour mener à bien la réalisation d'un module prototype métallique à grande échelle.

ABSTRACT. In this paper, we present a technical solution allowing the autonomous access to lake or sea shore for people in handicap situation. It is based on a lightweight foldable structure than can form a pier usable by people in reduced mobility. Foldability facilitate storage, transport, on site installation but also dismantle in the end of the season. The structure is a tensegrity grid developed at LMGC for the Tensarch project. It allows to materialize a plane, rigid and stable deck above the water while minimizing self weight and effect of waves or sea swell. This modular system can be assembled to form long pathways adapted to any ground profile in order to access bathing zones with sufficient water depth. The kinematic of the deployment is studied numerically then experimentally using physical models. We present in this paper the scientific and technological challenges that we addressed in order realize a first full-scale metallic prototype.

MOTS-CLÉS : accessibilité, tensegrité, structure déployable, prototypage.

KEY WORDS : accessibility, tensegrity, deployable structure, prototyping.

1. Introduction

L'adoption de la loi du 20 juin 1936 instituant le droit d'un congé payé annuel par le gouvernement a permis à de nombreux citoyens de partir en vacances et de découvrir les plages des côtes bretonnes et normandes. En 2014, les vacanciers choisissent à 72 % la France dont la destination préférée pour la période estivale reste le bord de mer (61 %) devant la campagne (16 %), la ville (13 %) et la montagne (10 %) selon une étude réalisée par le cabinet Protourisme. Pour les personnes en situation de handicap, 52% partent en vacances au moins une fois par an et le bord de mer est également leur destination favorite (43%). En France métropolitaine, selon une étude de l'INSEE en 2007, 5,8% de la population active de 15 à 64 ans déclarent avoir une ou plusieurs déficiences motrices et 18,4% de la population à 65 ans et plus. Selon certaines estimations, la proportion de personnes âgées serait de 30,6 % en 2035 et de 31,9 % en 2050. De fait, l'enjeu touristique vis-à-vis de la baignade en mer pour les personnes à mobilité réduite (incluant les personnes en situation de handicap physique et les personnes âgées ayant des difficultés à se mouvoir) est réel.

Malgré les lois du 30 juin 1975, 13 juillet 1991 et du 11 février 2005, force est de constater que la mer reste toujours inaccessible aux personnes à mobilité réduite puisqu'aucun site touristique sur le littoral français ne propose pour ce public de structure permettant l'accès en toute autonomie à la baignade. En effet, les dispositifs existants d'accès à la plage et à la baignade se limitent à des tapis de plage et des fauteuils spécifiquement étudiés (tiralò©, amphiby© ou hippocampe©) pour amener les personnes en situation de handicap physique dans l'eau. Cependant, il s'agit de solutions n'apportant pas d'autonomie et qui sont souvent perçues comme des équipements médicaux puisque cela nécessite l'assistance d'au moins une personne valide qualifiée. Quelques initiatives ont été proposées pour donner pleinement accès à cet espace public dans le respect de l'environnement comme, par exemple, le projet « un fauteuil à la mer » dans la commune de Hyères mais dans le concept s'ajoute la problématique du respect de la loi du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral. Une des conditions majeures à respecter est que les équipements ou installations doivent être démontables et transportables, ne comportant aucun élément de nature à les ancrer durablement au sol et doivent être conçus de manière à permettre un retour du site à l'état initial en fin de concession.

Pour ces raisons, l'association Atelier Habitat Handicap (A2H) a publié un recueil [CHAU 01] de bonnes pratiques apportant des solutions pour permettre à toute personne en situation de handicap un accès libre et en toute autonomie à la plage et à la mer, y compris à la baignade, et ce sans aucune stigmatisation. L'objectif est de développer un nouveau concept combinant accessibilité, design et revalorisation des bords de mer en répondant à plusieurs problématiques sociétales : le tourisme et le handicap, la mobilité et le vieillissement de la population, l'insertion des sportifs handicapés et l'égalité de tous face aux plaisirs de l'eau. Ainsi, la qualité des espaces créés répondra aux attentes des vacanciers dans une approche sociale et innovante (Figure 1).

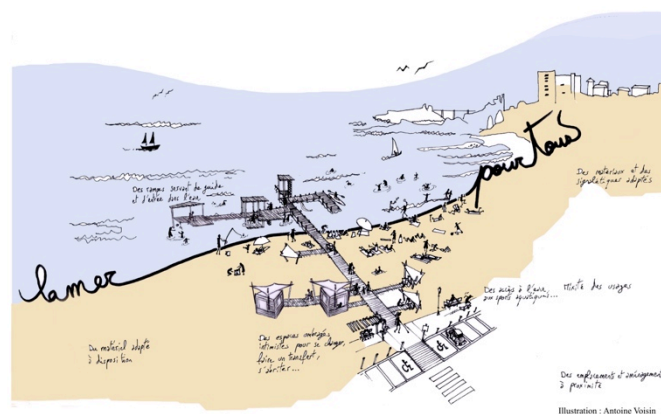


Figure 1. *Projet « La mer pour Tous »*

Dans cet objectif, nous présentons dans cet article une solution technique répondant à chaque obligation formulée dans les textes législatifs et réglementaires tant au niveau des règles nécessaires à l'immersion en toute autonomie des personnes en situation de handicap que des règles relatives à la protection du littoral. Cette solution réside sur l'optimisation d'une structure légère déployable permettant de créer un ponton accessible en toute autonomie pour une personne à mobilité réduite.

2. Le concept

La solution proposée repose sur une structure « pliable/dépliable ». L'intérêt est de pouvoir passer d'une configuration plus ou moins compacte, occupant un volume réduit (configuration pliée) à une configuration d'utilisation occupant un grand volume (configuration dépliée), et vice-versa. Le pliage a essentiellement pour but de faciliter le transport et le stockage du système plié ; le dépliage quant à lui permet d'accélérer la mise en place du système dans sa configuration d'utilisation.

A l'état plié, le système se présente comme un fagot de volume et de poids limités, à 30 kg pour rester dans les limites acceptable de port de charge occasionnel, conformément aux articles R. 4541-1 à R. 4541-9 du code du travail, à la norme AFNOR X35-109 et au décret n° 92-958 du 3 septembre 1992. Dépliée, la structure prend la forme d'une grille spatiale sur laquelle un platelage peut être installé, ainsi que les équipements de sécurité (garde corps) et ceux facilitant l'accès à l'eau (Figure 2). Parmi ces équipements, un ascenseur situé au dessus de la zone de baignade en bout de ponton permettra à une personne à mobilité réduite de s'immerger en fauteuil en toute autonomie.

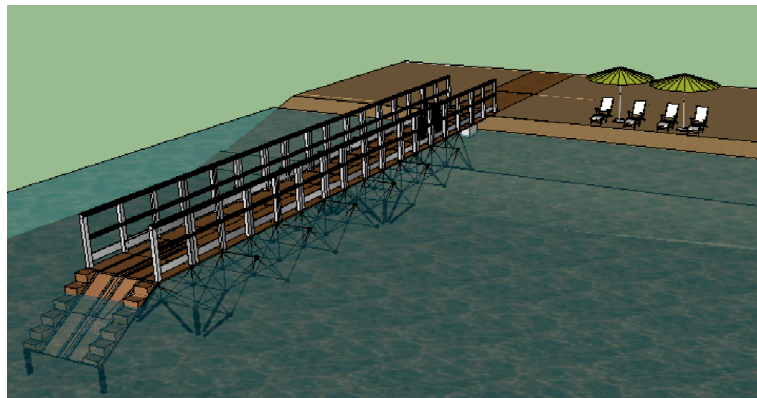


Figure 2. *Vue d'ensemble du projet*

La structure principale, plane et d'épaisseur uniforme, est posée sur des appuis ponctuels de hauteur réglable afin de s'adapter au relief du terrain, qui est supposé à faible profondeur comme c'est le cas sur le rivage Languedocien. Ces appuis, qui ne sont pas encore définis, pourraient prendre la forme de tubes fichés verticalement en butée sur une semelle réglable en hauteur. Par ailleurs, la surface couverte par une grille est limitée par son poids. Or, les zones de baignade de profondeur suffisante, de l'ordre du mètre, sont souvent assez éloignées du rivage, nécessitant une plus grande surface utile pour les atteindre. Le système est donc modulaire et se bâtit par la juxtaposition de structures élémentaires de masse et dimensions réduites, pour couvrir les distances nécessaires.

Le système à la base de cette solution à géométrie variable est une grille de tenségrité développée au LMGC dans le cadre du projet Tensarch [MOT 02] en 2000 (Figure 3). Le principe de tenségrité, qui fut développé dans les années 50, repose sur l'auto équilibre stable d'un réseau discontinu de composants linéaires comprimés, généralement des barres, à l'intérieur d'un réseau continu tendu, formé de câbles [MOT 03].



Figure 3. *La grille de Tenségrité Tensarch à nœuds fixes [MOT 02]*

Ce principe est tout à fait analogue aux systèmes gonflables, formés d'un milieu comprimé (air ou autre fluide) à l'intérieur d'une enveloppe étanche tendue. La topologie du système Tensarch s'inspire du tissage : le réseau comprimé est formé de sous-ensembles continus de barres reliant alternativement des nœuds d'une nappe

à l'autre, à l'image des fils de chaîne et de trame qui forment les tissus. Ces ensembles comprimés sont maintenus à l'intérieur d'un réseau tendu de câbles constitué de deux nappes horizontales et d'éléments, dit tendeurs, traversant entre les nœuds de chaque nappe (Figure 3). Ce système est modulaire car des grilles de toutes dimensions peuvent être formées en juxtaposant le nombre suffisant de modules de base dans les deux directions du plan [QUI 03].

Ce type de système a été choisi car il apparaît tout à fait adapté au contexte d'utilisation. Il permet d'abord de constituer une surface d'utilisation rigide et stable. De plus, par l'usage de câbles en tant qu'éléments tendus, la structure en semi-immersion offre naturellement une certaine transparence vis-à-vis des actions dues à la houle. La topologie est extensible et autorise, par assemblage de modules, la constitution des cheminements de toute longueur. Enfin, la présence de câbles rend surtout le système léger et, avec des nœuds adaptés, aisément pliable (Figure 4), permettant de construire des modules compacts portables.

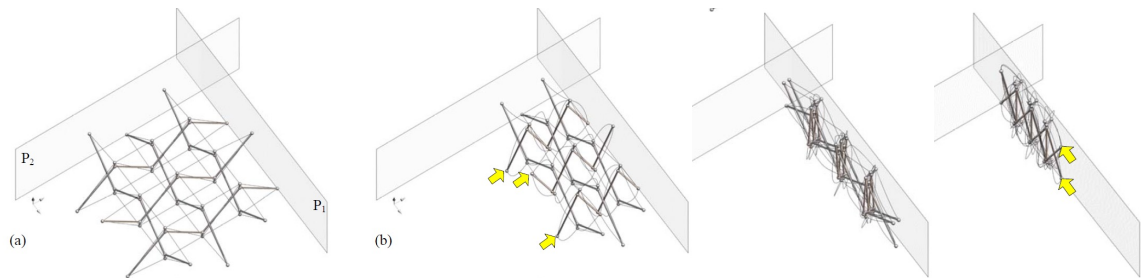


Figure 4. Principe de pliage de grille Tensarch [SMA 07]

3. Modélisation et conception

En amont de la réalisation de tout prototype et pour étudier la faisabilité du projet, une étude numérique de la mise en œuvre de la structure fut menée. Le cas d'étude est une grille plane occupant 6x4 unités cubiques de 80 cm de côté, permettant de couvrir une surface d'environ 15 m².

3.1. Déploiement

La procédure de déploiement, qui permet de passer d'une forme de « fagot » à la géométrie finale, est inspirée des études cinématiques menées par Smali et al. [SMA 07] sur le pliage de différentes topologies de grilles planes de tenségrité, notamment Tensarch. Dans cette proposition, le fagot initial est constitué de tous les éléments à l'exception des tendeurs verticaux qui servent à la mise en tension et au réglage de l'autocontrainte. En effet, le pliage n'est possible que sous contraintes nulles, dans un état de forme non déterminée.

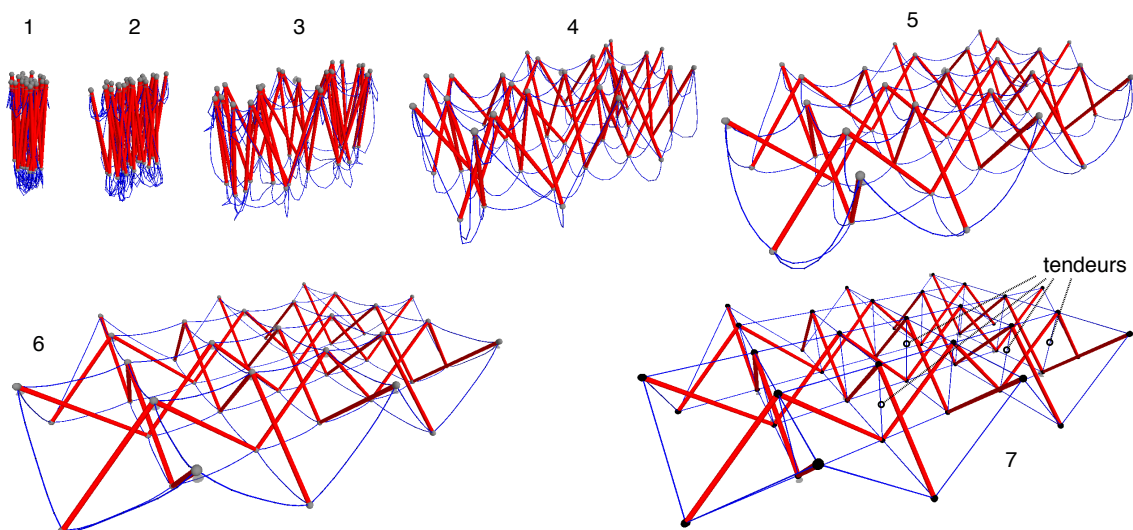


Figure 5. Etapes du déploiement (1 à 6) et état géométrique final atteint par ajout de tendeurs verticaux (7).

Le montage de cette structure se déroule en trois étapes. Le fagot, de forme compacte, est d'abord déployé de manière approchée dans le plan. Ensuite, les tendeurs verticaux sont mis en place entre les nœuds en vis-à-vis, ce

qui permet d'atteindre la géométrie finale. Enfin, la structure est mise en tension et rigidifiée par action sur les éléments tendeurs. On présente en Figure 5 différents états du mode de déploiement proposé. Ces vues sont issues d'une simulation numérique du pliage d'une grille, réalisée de l'état déployé (6) vers l'état de fagot (1). Dans le modèle utilisé [AVE 12], tous les nœuds de la nappe supérieure sont bloqués verticalement, suspendus à une altitude fixe afin que le moteur du mouvement soit le poids propre seul. Le calcul est mené en dynamique explicite sur un modèle simple, de type dynamique moléculaire à 3 degrés de liberté par nœud et dans lequel les câbles sont modélisés comme une chaîne de 8 éléments de type barre. Cette simulation permet de montrer que le pliage ou le déploiement sont, dans cette première approche avec un modèle simple où tous les éléments sont parfaitement articulés entre eux, des processus ne demandant qu'un minimum d'effort et menant à une configuration compacte. En réalité, les liaisons des barres aux nœuds sont semi-rigides voire articulées mais souvent selon un seul axe. De plus, la rigidité flexionnelle des câbles n'est pas totalement négligeable, particulièrement en état plié. En considérant cela, il semble toutefois envisageable d'aboutir à une configuration similaire à l'étape 2 (Figure 5).

3.2. Réglage de l'autocontrainte et comportement mécanique

La troisième étape du montage consiste à instaurer un état d'autocontrainte dans la structure. Ceci est réalisé par action sur les tendeurs, des éléments verticaux rajoutés au système après son déploiement. Sur la topologie Tensarch, il a déjà été montré ([QUI 03] et [AVE 04]) que l'autocontrainte se structure en plusieurs états locaux et un état global. Les états locaux font intervenir des éléments sur une région localisée autour d'un tendeur « intérieur » qui, dans le plan de la grille, est entouré de tous côtés par 8 autres éléments tendeurs (Figure 6). Par définition, pour contrôler chacun de ces états, il suffit d'agir sur le tendeur correspondant, par raccourcissement ou allongement pour, respectivement, augmenter ou diminuer le niveau de force. L'état global peut, lui, être contrôlé par tout tendeur « de rive ».

La simulation numérique peut être utilisée pour prévoir les niveaux de contraintes dans les éléments, non seulement consécutivement à un chargement mais aussi à la suite du réglage de la longueur d'un élément, permettant ainsi d'étudier numériquement et de proposer un processus de réglage de l'autocontrainte. On présente ainsi en figure 6 l'impact du réglage de tendeurs intérieurs (b et c) et l'état final proposé, obtenu par raccourcissement de tous les tendeurs simultanément. On retrouve bien les profils d'états locaux ce qui confirme que cette structure comporte au total 3+1 états d'autocontrainte.

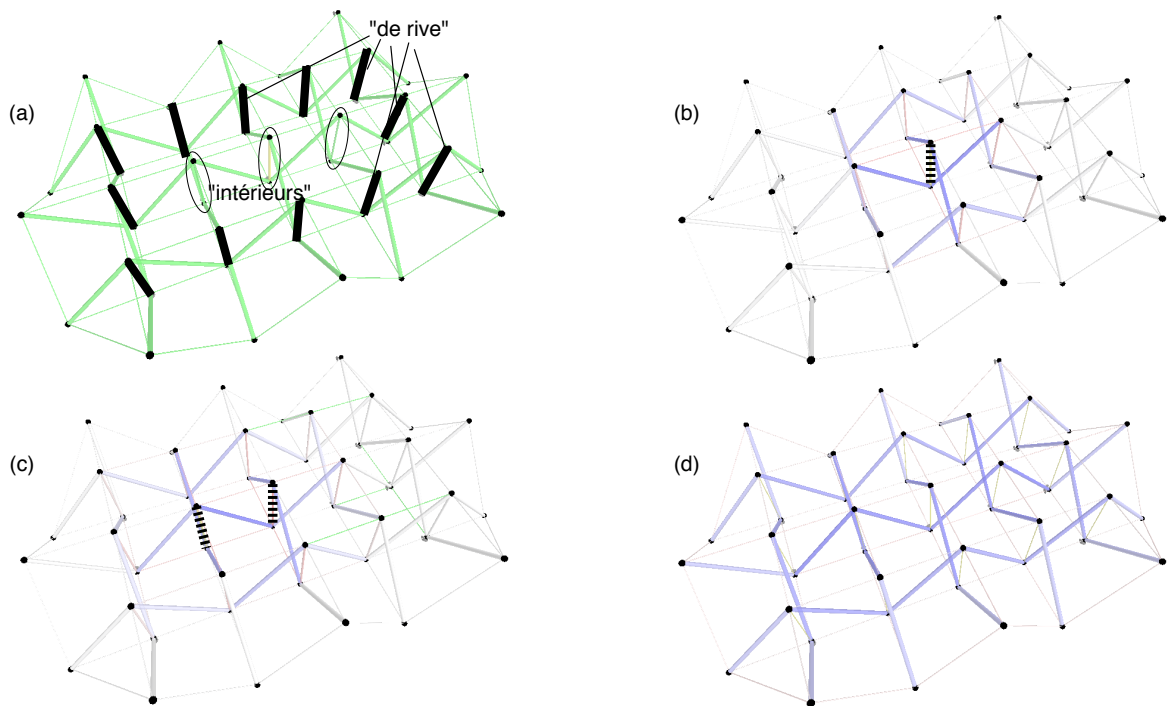


Figure 6. Etat local activé par le tendeur central (a), puis après action sur un deuxième tendeur (b). Etat final régulier après raccourcissement de tous les tendeurs (c)

Pour ces simulations, les caractéristiques des éléments sont celles du prototype envisagé. Les barres sont considérées être en aluminium, avec un module d'Young de 70 GPa, et de section tubulaires de diamètre extérieur 40 mm pour une épaisseur de 2 mm ($A = 2,4 \text{ cm}^2$). Les câbles sont supposés avoir une section de diamètre 8 mm et un module apparent de 160 GPa. Dans ces conditions et à l'état final, après raccourcissement de tous les tendeurs, les efforts extrêmes restent inférieurs à 9 kN en traction, et à 6,4 kN en compression.

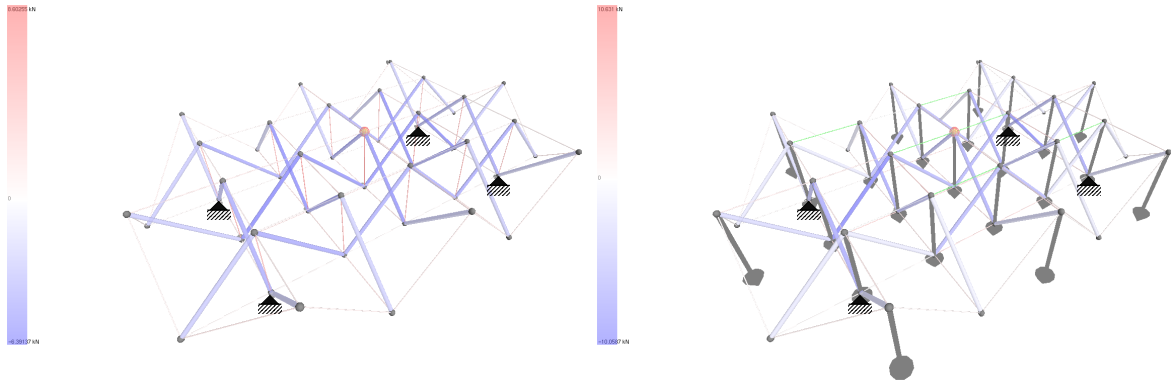


Figure 7. Analyse structurale : état d'autocontrainte initial et forces internes sous chargement

Sous un chargement de 1 kN sur chaque nœud de la nappe supérieure (Figure 7), les efforts internes augmentent légèrement jusqu'à un niveau d'environ 10 kN en traction. Dans cet état, le nœud central supérieur se déplace vers le bas de 3,3 mm. Lorsque l'on introduit un état d'autocontrainte de niveau moitié moins élevé et sous le même chargement, la flèche au centre de la nappe supérieure atteint alors 7 mm, avec des efforts de traction passant de 4,5 kN à 10 kN. Dans ce dernier cas, le nombre de câbles détendus est plus important ce qui explique cette perte de rigidité. Ce grand impact de l'état d'autocontrainte sur la rigidité de la grille implique que son réglage est nécessaire et très important. Pour ce type de structure, destinée à être montée rapidement dans un environnement naturel, il paraît difficile d'envisager une procédure de contrôle instrumentée comme cela peut être le cas sur un ouvrage fixe de grande ampleur. Il reste donc à développer une solution technique permettant d'introduire un effort contrôlé dans les tendeurs verticaux lors de leur mise en place. Ceci pourrait être fait, par exemple, par un serrage contrôlé au couple ou à l'aide d'un assemblage précontraint limité en glissement.

3.3. Conception des nœuds

Afin de pouvoir former un fagot à l'état plié, il a été nécessaire d'adapter le nœud développé pour la grille Tensarch. Deux barres concurrentes en un même point devaient pouvoir être repliées côte à côte. Pour cela, un nouveau nœud a été conçu de telle sorte qu'une des deux barres soit encastrée et l'autre articulée (Figure 8). La liaison des câbles concurrent au nœud reste inchangée, leur souplesse permettant naturellement le pliage à l'état de fagot. Ce travail de conception fut l'objet d'un stage de Master au LMGC. Le résultat, un modèle SolidWorks du nœud et des pièces d'assemblage avec les barres, fut utilisé directement pour construire une maquette.

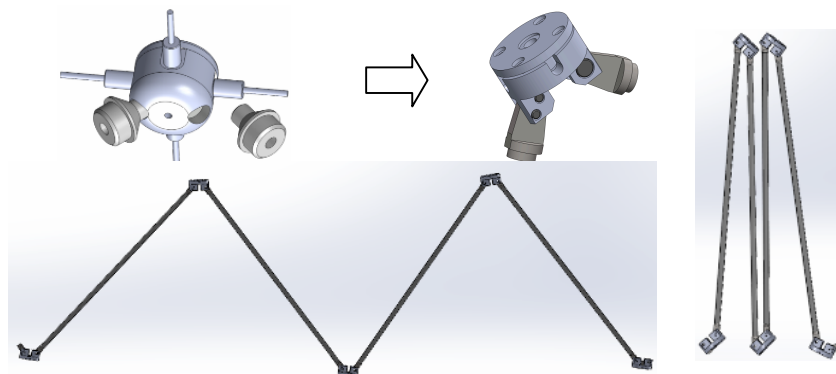


Figure 8. Adaptation du nœud de la grille Tensarch pour le pliage-dépliage de la structure

4. Maquettage 3D

Afin de présenter un modèle physique sur lequel valider le concept et le mode de montage proposé, nous avons réalisé une maquette à échelle $\frac{1}{2}$ en utilisant la technique de prototypage 3D. Ceci a été mené dans le cadre d'un projet de fin d'étude au printemps 2014 au Département Génie Civil de l'IUT de Nîmes.

4.1. Réalisation en PVC

Le modèle de nœud, constitué du corps et des embouts de barres, a été directement produit en ABS par la technique d'impression 3D par ajout de matière (Figure 9). Les barres sont constituées de tubes PVC de diamètre 10 mm et les tendeurs verticaux sont des tiges filetées. Les autres composants tendus sont fait à partir de fil de tendeur élastique, très souple axialement afin de limiter les forces dans les barres et surtout les liaisons.

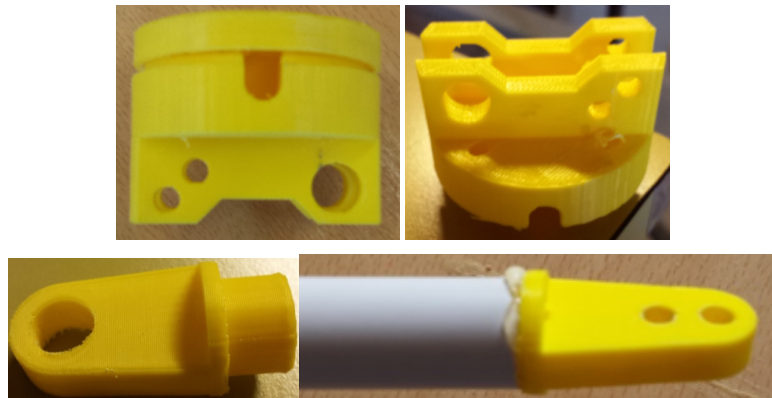


Figure 9. Nœuds et embouts de barres réalisés par prototypage 3D

Lors du premier montage, un dispositif de maintien a été mis en œuvre pour un assemblage dans la géométrie déployée et la mise en tension du système (Figure 10). Cela a été rendu nécessaire par la fragilité des nœuds, car malgré une très bonne reproduction des formes, le processus d'impression par couches successives ne permet pas de reconstituer un matériau au comportement isotrope. Néanmoins, la géométrie finale a pu être assemblée en prenant quelques précautions.

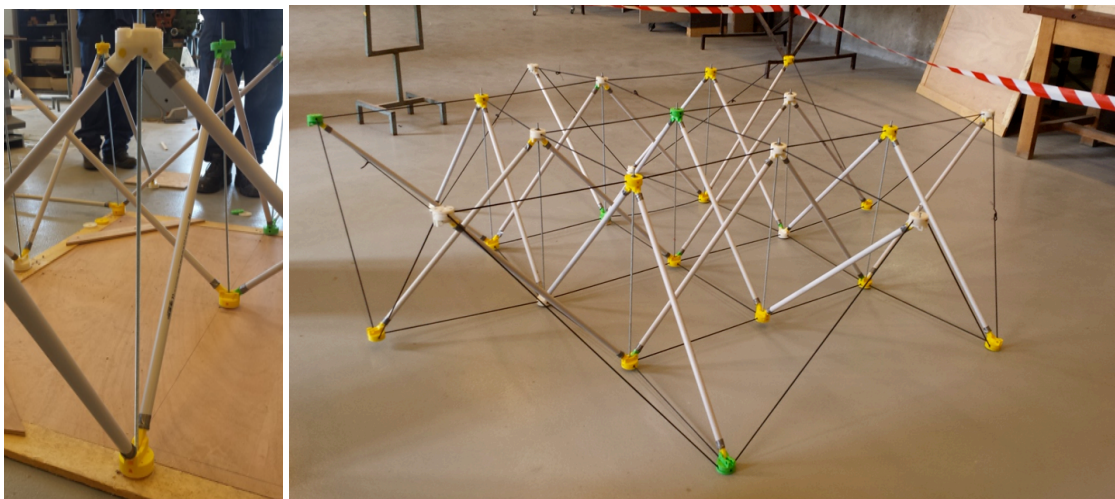


Figure 10. Maquette réalisée par prototypage 3D : détail sur un tendeur (gauche) et vue d'ensemble

4.2. Démonstration du mode de pliage

L'expérimentation du pliage de la maquette selon le mode proposé était le second objectif d'importance dans ce projet (voir <http://transfert.lmgc.univ-montp2.fr/~quirant/Ponton.mp4>). Malgré quelques ruptures dans des éléments d'assemblage, la grille a pu être repliée sous la forme d'un fagot (Figure 11) sans grandes difficultés.

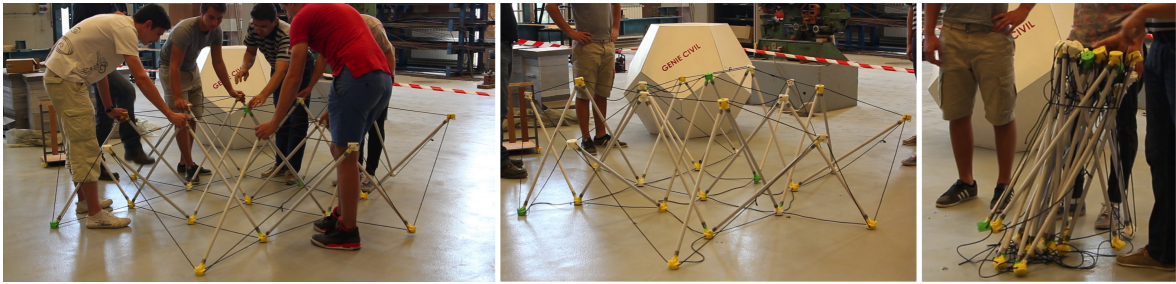


Figure 11. *Pliage de la maquette*

4.3. Prototype métallique

Le concept étant considéré validé, l'étape suivante consiste à réaliser un prototype en matériau métallique. Celui-ci est en cours de fabrication et doit être monté au cours du printemps 2015. Les éléments qui le composent sont ceux définis dans l'étude mécanique (cf. §3.2) : barres en aluminium de diamètre 40 mm et 2 mm d'épaisseur et câbles en acier de diamètre 8 mm. Les nœuds ont été revus et sont en cours de fabrication à l'aide d'une fraiseuse numérique afin d'optimiser leur poids. Le prototype, d'une masse prévue de 30 kg pour une surface de 10 m², sera un démonstrateur robuste qui subira une série de tests mécaniques afin de valider le modèle.

5. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une application concrète pour un système de tensegrité permettant de répondre au problème peu traité de l'accessibilité des personnes à mobilité réduite aux zones de baignade. La solution retenue est une structure légère, montable et démontable rapidement afin de respecter le littoral. Le mode de mise en œuvre a été imaginé numériquement et validé expérimentalement sur une maquette légère en matière plastique. Pour se rapprocher d'une solution industrialisable, un prototype en aluminium est en cours de fabrication et sera mis en œuvre pour des essais de validation en conditions réelles.

6. Bibliographie

- [AVE 04] AVERSENG J., CROSNIER B., Prestressing tensegrity systems- application to multiple selfstress state structures, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 4(4), 2004, p. 543-557.
- [AVE 12] J. AVERSENG, J. QUIRANT, J.-F. DUBE, Interactive dynamic design and analysis of tensegrity systems, *International Journal of Space Structures*, vol. 27 (2), 2012, p. 97-105.
- [CHA 01] CHAUTARD N., *La mer ouverte à tous*, Montpellier, Editions de l'Espérou, 2001.
- [MOT 02] MOTRO, R. Tensarch Project, *Fifth International Conference on Space Structures*, Guilford (U.K.), 2002.
- [MOT 03] MOTRO R., *Tensegrity, Structural systems for the future*, Hermès Pinton Sciences, 250 pp, 2003.
- [QUI 03] QUIRANT, J., KAZI-AOUAL, M. N., MOTRO, R. (2003). Designing tensegrity systems: the case of a double layer grid. *Engineering Structures*, 25(9), 2003, p. 1121-1130.
- [SMA 07] SMAILI, A., & MOTRO, R., Foldable/unfoldable curved tensegrity systems by finite mechanism activation, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 47 (155), 2007.