

École polytechnique de Louvain

Conception et construction d'une passerelle de tenségrité déployable en bambous



Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

Auteurs : Nicolas **BOUCHAT**, Maxime **CAULIER**

Promoteur : **Pierre LATTEUR**

Lecteurs : **Igor BOUCKAERT**, **Jonas FERON**, **Sandra SOARES**

Année académique 2021–2022

Master [120] : ingénieur civil des constructions

*Conception et construction d'une passerelle de
tenségrité déployable en bambous*
Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux



Nicolas BOUCHAT et Maxime CAULIER

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, nous tenions à remercier les personnes qui nous ont soutenus pendant cette année et sans qui ce travail n'aurait pas été possible.

Nous tenons à remercier en premier lieu Pierre LATTEUR qui, par ses nombreuses idées et ses conseils avisés, nous a permis de réaliser ce travail. Son enthousiasme envers ce projet a été un véritable moteur dans ce travail, nous poussant toujours plus loin dans la réflexion.

Nous remercions également Jonas FERON, doctorant travaillant sur la tenségrité, pour tout ce temps qu'il nous a consacré. Sa bonne humeur, sa bienveillance lors de nos discussions et sa passion contagieuse pour la tenségrité nous ont grandement motivés dans notre travail. Nous lui souhaitons le meilleur pour la fin de son doctorat.

Nous remercions Alexis Bastien, Quentin GRAVY, Marc ELIARS, Jonas FERON, Lindy BOUCHER, Igor BOUCKAERT, Alexandre FLAMANT, Romain ANTOINE et Nicolas DANZIN pour leur recherches concernant la tenségrité qu'ils ont pu mener précédemment.

Nous remercions d'avance les membres de notre jury Igor BOUCKAERT, Jonas FERON, Pierre LATTEUR et Sandra SOARES pour le temps qu'ils consacreront à la lecture de notre mémoire.

Nous remercions Alex BERTHOLET pour son aide tout au long de l'année et pour sa bonne humeur, toujours au rendez-vous.

Nous tenons à remercier Vincent FORZEE vers qui nous pouvions nous tourner à la moindre question. Son aide pour les tests réalisés au laboratoire LEMSC nous a été très précieuse.

Merci à Marie VANDER MEULEN, assistante à la faculté LOCI, de nous avoir fait confiance en nous prêtant le Scanner Faro M70.

Nous remercions Vincent BOUCHAT de l'entreprise *Mécanelec Industries sa* pour l'excellent usinage des nœuds et des embouts. Son aide nous a été précieuse dans la conception et réalisation de ces éléments.

Nous remercions également Marc RAISON et son associé Pablo de l'entreprise *Green Steel Concept* pour la bonne préparation et fourniture des bambous utilisés.

Merci à Antoine BIETLOT pour avoir installé le logiciel d'acquisition *Contact Pro IV*, permettant de calibrer et d'utiliser les capteurs de force fait à partir de maillons de chaîne.

Merci à Pierre MERTENS pour la réalisation du bras de levier en acier, permettant d'augmenter la prétension appliquée aux sangles de la structure.

Enfin, nous tenions à remercier nos proches pour leur soutien constant et leurs encouragements. Leur intérêt pour ce projet, tant dans leur questionnement sur nos avancées que dans leur relecture, nous a grandement motivés à réaliser ce projet. Nous remercions particulièrement Christelle BOUTRY, Sophie CAULIER, Guy CAULIER, Elodie MOUYARD, Léo BOUCHAT et Vincent BOUCHAT.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES SYMBOLES.....	viii
INTRODUCTION.....	1
1 ETAT DE L'ART.....	3
1.1 Origines de la tenségrité	3
1.2 Définitions	5
1.3 Typologie des structures de tenségrité.....	6
1.3.1 Cellules élémentaires.....	6
1.3.2 Le simplex	7
1.3.3 Assemblage de cellules élémentaires	9
1.4 Réalisations.....	10
1.4.1 Monde artistique.....	10
1.4.2 Structurales.....	13
1.5 Déployabilité	15
2 CONCEPTION	17
2.1 Présentation de la passerelle	17
2.1.1 Les objectifs	17
2.1.2 Géométrie de la passerelle.....	17
2.1.3 Conditions d'appuis.....	18
2.1.4 Hypothèses de chargement.....	19
2.1.5 Câble additionnel.....	20
2.1.6 Précontrainte.....	20
2.1.7 Programme de calcul numérique.....	21
2.1.8 Résultats numériques.....	22
2.2 Description des éléments	27
2.2.1 Les nœuds.....	27
2.2.2 Les boutons	32
2.2.3 Les câbles	39
2.3 Poids de la structure.....	57
2.4 Appuis.....	58
2.5 Déploiement.....	61
2.5.1 Description générale des composants de la structure.....	63
2.5.2 Déploiement d'un module	65
2.5.3 Assemblage	65
2.5.4 Mise en prétension de la structure	66

3	INSTRUMENTATION	69
3.1	Mesure des efforts internes.....	69
3.1.1	Éléments contrôlés	69
3.1.2	Maillon capteur de tension	70
3.1.3	Programme d'acquisition	80
3.1.4	Capteur de force en compression	81
3.2	Mesure des coordonnées des nœuds	82
3.2.1	Scanner 3D	82
3.2.2	Logiciel SCENE	83
3.2.3	Calcul du centre des nœuds	87
3.2.4	Comparaison des coordonnées numériques et expérimentales	91
4	EXPÉRIENCES	94
4.1	Dispositif expérimental.....	97
4.2	Expériences menées.....	99
4.2.1	Mise en prétension de 2 modules	99
4.2.2	Chargement uniforme de 2 modules	109
4.2.3	Chargement unilatéral de 2 modules	115
4.2.4	Essai de relaxation de 2 modules	117
4.3	Conclusion des expériences.....	120
5	CONCLUSION	122
5.1	Pistes d'amélioration	122
5.2	Conclusion générale	124
	ANNEXE A : NOTE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT	126
	ANNEXE B : PROTOCOLE DE DÉPLOIEMENT	138
	ANNEXE C : PROTOCOLE DE RÉALISATION DES CORDES	176
	ANNEXE D : MANUEL D'UTILISATION SCANNER FARO M70	186
	ANNEXE E : STRUCTURE 5 MODULES	196
	ANNEXE F : CONCEPTION NUMÉRIQUE DES NŒUDS	200
	ANNEXE G : PHOTOS DE L'USINAGE DES NŒUDS	214
	TABLE DES FIGURES	216
	BIBLIOGRAPHIE	223

TABLE DES SYMBOLES

Symbole	Unité	Signification
α	[°]	Angle relatif entre bases
$\alpha_{0,3}$	[°]	Angle relatif entre les nœuds 0 et 3
$\alpha_{1,4}$	[°]	Angle relatif entre les nœuds 1 et 4
$\alpha_{2,5}$	[°]	Angle relatif entre les nœuds 2 et 5
$\alpha_{3,6}$	[°]	Angle relatif entre les nœuds 3 et 6
$\alpha_{4,7}$	[°]	Angle relatif entre les nœuds 4 et 7
$\alpha_{5,8}$	[°]	Angle relatif entre les nœuds 5 et 8
β_{0-1-2}	[°]	Angle d'inclinaison de la base des nœuds 0, 1 et 2
β_{3-4-5}	[°]	Angle d'inclinaison de la base des nœuds 3, 4 et 5
β_{6-7-8}	[°]	Angle d'inclinaison de la base des nœuds 6, 7 et 8
γ_{0-1-2}	[°]	Angle de rotation de la base des nœuds 0, 1 et 2
γ_{3-4-5}	[°]	Angle de rotation de la base des nœuds 3, 4 et 5
γ_{6-7-8}	[°]	Angle de rotation de la base des nœuds 6, 7 et 8
ΔZ_3	[mm]	Elévation du nœud 3
ΔZ_4	[mm]	Elévation du nœud 4
ΔZ_5	[mm]	Elévation du nœud 5
A	[mm ²]	Aire de la section
$A_{théo}$	[mm ²]	Aire théorique de la section
c	[mm]	Longueur de côté
D	[m]	Diamètre du cercle circonscrit aux bases
$D_{0,1,2}$	[mm]	Diamètre du cercle circonscrit à la base des nœuds 0, 1 et 2
$D_{3,4,5}$	[mm]	Diamètre du cercle circonscrit à la base des nœuds 3, 4 et 5
$D_{6,7,8}$	[mm]	Diamètre du cercle circonscrit à la base des nœuds 6, 7 et 8

d	[mm]	Diamètre d'un élément
$E_{0,mean}$	[GPa]	Module de Young moyen
$E_{0,k}$	[GPa]	Module de Young caractéristique
E	[GPa]	Module de Young utilisé
F	[kN]	Sollicitation appliquée
H	[m]	Hauteur
L	[m]	Portée d'une structure
ΔL	[mm]	Raccourcissement de l'élément
L_f	[mm]	Longueur de flambement
l_b	[mm]	Longueur de bouton
L_{corde}	[mm]	Longueur de corde
$L_{gousset}$	[mm]	Longueur de gousset
$L_{manille}$	[mm]	Longueur de manille
δ_0	[mm]	Excentricité initiale
k_{mod}	[-]	Coefficient d'influence de l'humidité
γ_M	[-]	Dispersion du matériau considérée pour le bois
t	[mm]	Epaisseur
f_{mk}	[MPa]	Résistance caractéristique en flexion
$f_{c,0,k}$	[MPa]	Résistance caractéristique à la compression axiale
T_u	[kN]	Charge de rupture des câbles
f_u	[MPa]	Résistance ultime en traction
ρ	[kg/m ³]	Densité
m_l	[kg/m]	Masse linéique
G	[kN/m ²]	Chargement permanent
Q	[kN/m ²]	Chargement variable
R_v	[kN]	Réaction verticale

R	[mm]	Rayon
n_m	[-]	Nombre de modules
$n_{c,a}$	[-]	Nombre de câbles additionnels
σ	[MPa]	Contrainte
σ_{adm}	[MPa]	Contrainte admissible
ε_e	[mm/m]	Déformation face externe
ε_i	[mm/m]	Déformation face interne
C_i	[MN]	Facteur de calibration jauge interne
ω	[1/V]	Facteur de transformation
β_i	[MN/V]	Facteur de calibration du maillon

INTRODUCTION

Le concept de la tenségrité est né il y a plusieurs dizaines d'années. Il a séduit de nombreux artistes et intrigué bon nombre de personnes. Cependant, jusqu'à présent, ce concept structurel visuellement léger n'a que très rarement les frontières du monde artistique. En effet, très peu de structures de tenségrité ont vu le jour étant donné leur complexité de calcul liée à leur comportement non-linéaire et leur grande flexibilité.

Il semblerait aussi que leur légèreté ne soit que visuelle, l'avantage de telle structure est donc ailleurs. Outre les aspects esthétique et architectural, la composition et l'agencement des éléments des structures de tenségrité permettent d'envisager une nouvelle caractéristique : leur déployabilité.

Ce mémoire repose sur les recherches effectuées au sein de l'*UCLouvain* depuis plusieurs années. Il a pour objectif de démontrer la faisabilité des structures de tenségrité et permettre à ces dernières de faire un nouveau pas dans le monde structurel. En 8 ans, une série de travaux a été effectuée afin de permettre l'accomplissement de ce projet.

Durant l'année académique 2013-2014, **Alexis BASTIEN** et **Quentin GRAVY** ont démarré les recherches en proposant le mémoire « Etude d'une passerelle de tenségrité composée de simplex ». Dans celui-ci, ils se sont intéressés à différentes typologies de modules en tenségrité afin d'imaginer une passerelle. Le type de module les ayant le plus intéressés par sa simplicité et son esthétisme est la cellule prismatique, et plus particulièrement le simplex. Ces cellules permettent d'être assemblées les unes aux autres afin de créer une structure.

Lors de l'étude de cette structure, ils font rapidement face à un problème intrinsèque aux structures de tenségrité : leur instabilité au premier ordre et par conséquent, l'incapacité de les calculer au moyen d'un calcul linéaire classique. Malgré cela, ils ont développé une méthode linéaire d'éléments finis permettant une première approximation du comportement des structures. Leurs résultats peuvent être remis en doute.

Durant l'année académique 2014-2015, **Marc ELIARS** modélise le comportement des structures de tenségrité par une méthode non-linéaire d'éléments finis implémentée sur MATLAB.

Durant l'année académique 2015-2016, **Jonas FERON** reprend le programme et développe à partir de celui-ci un outil numérique complet en Python intégrant le calcul non-linéaire et les méthodes d'optimisation basées sur la théorie des indicateurs morphologiques, développée par Pierre LATTEUR, adaptée aux structures tridimensionnelles. A l'issue de son mémoire, il prouve la faisabilité de la passerelle imaginée deux ans plus auparavant pour une charge uniformément répartie le long du tablier.

Durant l'année académique 2016-2017, **Lindy BOUCHER** a amélioré l'outil de calcul numérique en y intégrant le poids propre des structures. Ensuite, il explore différentes variantes de la passerelle composée de simplex en étudiant d'autres types de cellules élémentaires comme le quadruplex, le pentaplex, etc. En comparant ces différentes options, il confirme le choix du simplex par son efficacité, notamment en termes de volume de matière.

Durant l'année académique 2018-2019, **Igor BOUCKAERT** a abordé la question de l'optimisation des structures de tenségrité soumises à des charges aléatoires, poursuivant ainsi le travail de Jonas Feron et permettant de prouver la faisabilité de ces structures pour les cas de charges les plus défavorables. Il démontre également que, dans la plupart des cas, le critère dimensionnant n'est pas aux états limites de services, des déformations, mais aux états limites ultimes.

Durant l'année académique 2019-2020, **Alexandre FLAMANT** a développé un outil numérique sous la forme d'un plug-in *Grasshopper* permettant d'étudier la tensegrité sous forme paramétrique et donc, d'étendre les travaux des années précédentes à de nouvelles géométries. Il conclut son mémoire face à certaines limitations du logiciel développé, il propose donc certaines pistes pour redévelopper complètement le logiciel afin de s'affranchir de ces limitations. Afin de régler cela, un nouveau plug-in pour *Grasshopper* nommé « MUSCLE » fut mis au point par Jonas FERON lors de l'année académique 2020-2021.

Durant l'année académique 2020-2021, **Romain ANTOINE** et **Nicolas DANZIN** ont étudié le comportement d'un seul simplex en aluminium de 2 mètres de haut dans des conditions de laboratoires parfaites et avec une acquisition de données expérimentales très précise afin de le comparer aux résultats numériques. Ils concluent leur mémoire en pointant des différences entre l'expérimental et le modèle numérique, ce qui indique un manque de fiabilité du programme de calcul. Une nouvelle version a donc été développée par Jonas FERON lors de l'année académique 2021-2022, utilisant la méthode de relaxation dynamique. Cette nouvelle version est utilisée dans le cadre de ce mémoire.

Notre objectif est de concrétiser le travail de ces 7 précédents mémoires en concevant et réalisant une structure composée de plusieurs modules à échelle presque réelle. De plus, un nouvel avantage des structures de tensegrité est exploré : leur déployabilité.

Pour cela, une passerelle de tensegrité composée de 5 modules ayant une portée totale de 14,7 mètres est conçue et étudiée. Au terme de ce mémoire, la réalisation d'un premier prototype composé de 2 modules mettra en évidence différentes difficultés et y proposera certaines solutions. Les difficultés de construction d'une telle structure sont notamment : sa réalisation pratique, les comportements réels des différents matériaux, la conception des nœuds permettant la connexion de plusieurs câbles et barres, la mise en place d'une telle structure due aux lourds boutons « flottant » entre les câbles ou encore l'introduction des efforts conséquents lors de la mise en précontrainte de la structure.

Ce mémoire se divise en 5 chapitres :

Le **chapitre 1** a pour objectif d'expliquer le concept de tensegrité, de le définir et d'en établir les origines. Il montre également quelques réalisations faites autour du globe, que ce soit dans le domaine artistique ou structurel. Il met également en avant les nouvelles recherches faites autour de la déployabilité des structures de tensegrité.

Le **chapitre 2** entre dans les détails de la conception de la passerelle. Il présente les caractéristiques de la passerelle réalisée, décrit les éléments qui la composent et résume son déploiement.

Le **chapitre 3** présente les différents instruments utilisés pour la mesure des efforts internes présents dans la structure et de sa géométrie. Ces instruments seront utilisés lors des essais sur la structure.

Le **chapitre 4** détaille et analyse certaines expériences réalisées. Le comportement de la structure lors de sa mise en précontrainte et lors de son chargement permet de prouver, ou non, la faisabilité des structures de tensegrité composées de plusieurs modules.

Le **chapitre 5** conclue ce mémoire en résumant les résultats et en proposant des pistes d'amélioration pour la structure.

1 ETAT DE L'ART

Cette section a pour but d'introduire la tensegrité. Elle commence par retracer les origines de la tensegrité et de la définir. Ensuite, elle présente différentes typologies de structure de tensegrité qui existent. Plus tard, elle s'attarde sur différentes réalisations dans le domaine artistique et structural. Enfin, elle propose un aperçu de la déployabilité dans le domaine de la tensegrité.

Elle est inspirée des mémoires des dernières années sur la tensegrité à l'Ecole Polytechnique de Louvain.

1.1 Origines de la tensegrité

Le terme tensegrité vient de la traduction du mot anglais « tensegrity » qui est la contraction des termes **tensional** et **integrity**. Ce mot exprime le fait que l'intégrité de la structure est assurée par les éléments en tension. La paternité de ce néologisme revient à l'architecte américain Richard Buckminster Fuller actif dans les années 1950.

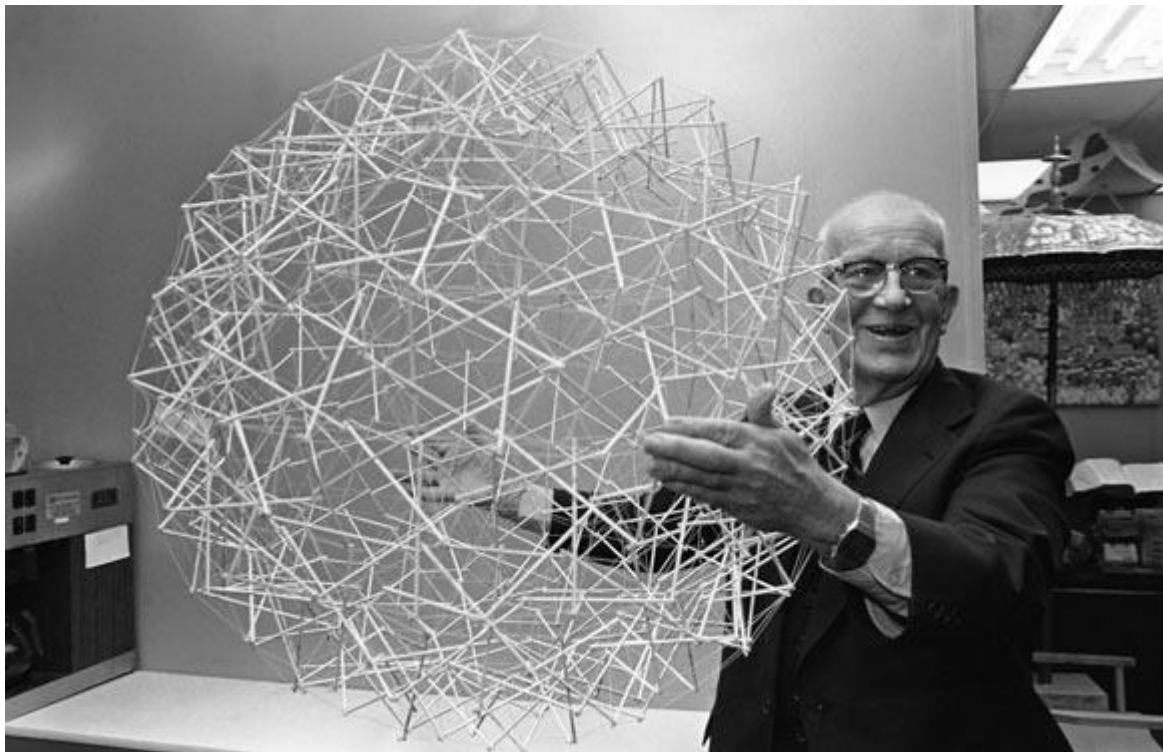


FIGURE 1.1 – Richard Buckminster Fuller [1]

Chronologiquement, il est important de citer l'œuvre “*Gleichgewichtkonstruktion*” (“Construction équilibrée”) réalisée par le soviétique Karl Johansson et présentée en 1921 lors d'une exposition des constructivistes russes à Moscou. Il s'agit d'un assemblage composé de 3 barres et 7 câbles qui était manipulable à l'aide d'un huitième câble détendu. L'objectif de Johansson est de montrer la façon dont les structures tendues peuvent se déformer. Ainsi, cette liberté de mouvement empêche de qualifier cette structure de tensegrité. Néanmoins, les caractéristiques communes de cette œuvre avec la tensegrité pourrait la qualifier de proto-tensegrité.

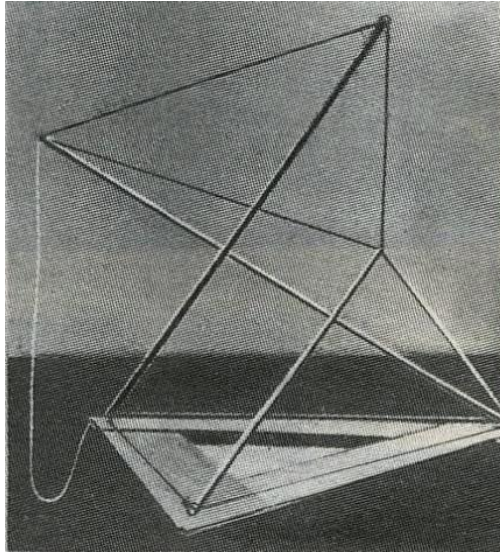


FIGURE 1.2 – Gleichgewichtskonstruktion [2]

Les trois acteurs principaux à l'origine de la tensegrité sont : R.B. Fuller, K.D. Snelson et D.G. Emmerich. Fuller énonce le principe de la tensegrité. C'est d'ailleurs ce dernier qui obtint les premiers brevets. L'artiste Snelson, un de ses élèves, réalise plusieurs sculptures et maquettes innovantes permettant de concrétiser cette idée, notamment l'œuvre semblant flotter dans les airs : "X-Piece".



FIGURE 1.3 – X-Piece [3]

La question de la paternité de l'idée initiale reste sujet à controverse, Snelson déclarant depuis toujours son droit d'invention.

Au même moment et d'une façon indépendante, en France, l'architecte-ingénieur David-Georges Emmerich développe des systèmes reposants sur les mêmes principes qu'il qualifie de système « tendus et autotendants ». Il conçoit de nombreuses typologies complexes, comme son tore hélicoïdal, qui ne verront jamais le jour. Son travail est donc resté purement théorique.

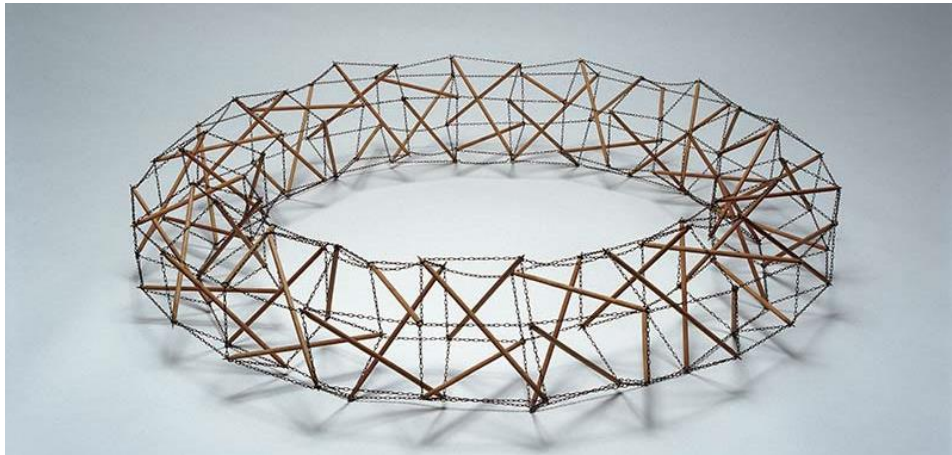


FIGURE 1.4 – Tore hélicoïdal [4]

1.2 Définitions

Au cours des dernières décennies, plusieurs chercheurs ont proposé différentes définitions de ce passionnant concept qu'est la tensegrité. En voici deux très intéressantes.

Dans un premier temps, Fuller décrit la tensegrité comme

« Des ilots de compression au sein d'un océan de tension ».

Des années plus tard, il donne une description plus approfondie dans son livre intitulé « Synergetics » [5] :

« La tensegrité décrit un principe de relation structurelle où la forme structurale est garantie par le comportement complètement fermé, continu et tendu du système et non par le comportement des membres discontinus et localement comprimés ».

Motro, ingénieur en génie civil français, définit la tensegrité comme :

« Un système de tensegrité est un système dans un état d'auto-équilibre stable, qui comprend un ensemble discontinu de composants comprimés à l'intérieur d'un continuum de composants tendus ».

Cette définition insiste sur l'état d'auto-équilibre signifiant que la stabilité et la rigidité de la structure sont assurés par les efforts internes présents dans les composants de la structure sans l'intervention d'un chargement extérieur. Deux hypothèses importantes doivent être considérées :

- Les nœuds sont considérés comme rotulés.
- Les charges externes sont appliquées uniquement aux nœuds.

Les caractéristiques des structures de tensegrité sont identiques à celles des treillis. Les éléments sont uniquement soumis à des efforts normaux. La différence des structures de tensegrité par rapport aux treillis est qu'elles sont notamment composées de câbles ne permettant pas de reprendre de la compression, mais uniquement de la traction.

1.3 Typologie des structures de tensegrité

De nombreux critères permettent de définir les typologies des structures de tensegrité. Il existe donc un grand nombre de possibilités de structures de tensegrité. Ces dernières peuvent soit être une cellule élémentaire, soit être un assemblage de cellules élémentaires.

1.3.1 Cellules élémentaires

L'une des typologies les plus simples des modules de tensegrité existants est le module prismatique. Ce module est caractérisé par deux bases polygonales. En choisissant une base triangulaire, le module obtenu est le simplexe qui est composé de 3 barres et 9 câbles.

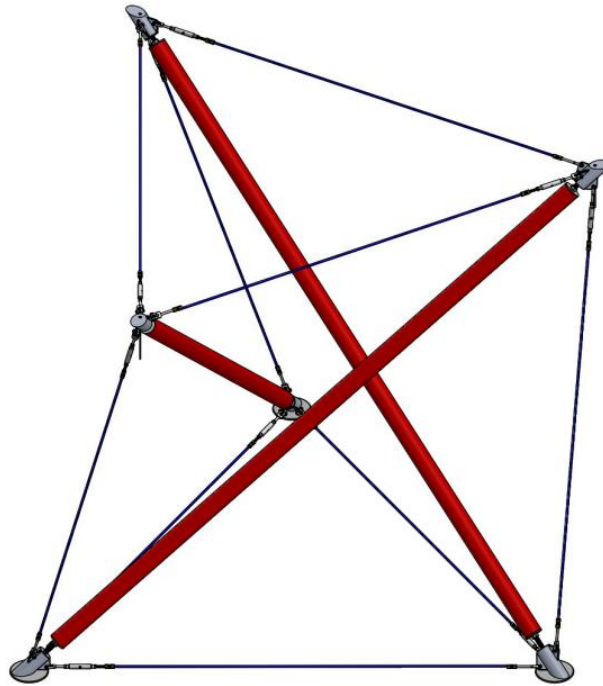


FIGURE 1.5 – Simplex étudié lors du mémoire 2020-2021 [6]

En augmentant le nombre de côtés des bases du module, on obtient notamment le quadruplex pour 4 côtés, le pentaplex pour 5 côtés, l'hexaplex pour 6 côtés, visibles à la FIGURE 1.6.

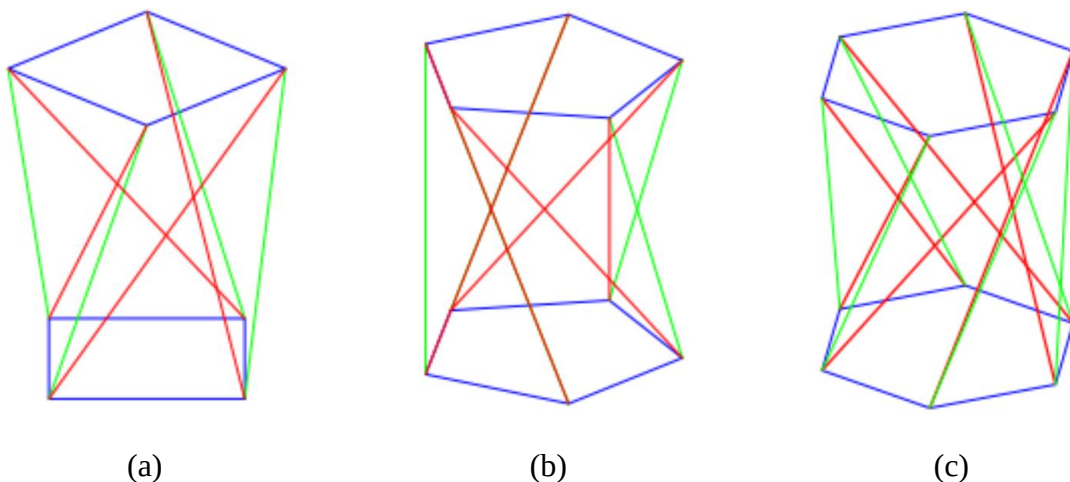


FIGURE 1.6 – Cellules élémentaires : (a) quadruplex [7] (b) pentaplex [7] (c) hexaplex [7]

Les cellules sont composées de trois types d'éléments :

- Les barres en rouge.
- Les câbles transversaux, formant les bases, en bleu.
- Les câbles longitudinaux, reliant les bases, en vert.

Le nombre de ces éléments nécessaires à la réalisation de différentes cellules élémentaires est détaillé au TABLEAU 1.1.

Type de cellule	Nombre barres	Nombre câbles transversaux	Nombre câbles longitudinaux
Simplex	3	6	3
Quadruplex	4	8	4
Pentaplex	5	10	5
Hexaplex	6	12	6

TABLEAU 1.1 – Nombre d'éléments par type de cellule élémentaire

Le quadruplex, le pentaplex et l'hexaplex auraient pu être utilisés pour la réalisation de la passerelle mais, du au nombre plus important d'éléments (nœuds, câbles, barres) nécessaires à la construction de ces modules, ils ont été écartés au profit du simplex. Nous nous concentrerons donc, dans ce mémoire, uniquement sur le simplex. Les analyses des autres types de cellule élémentaire sont disponibles dans les mémoires des années précédentes.

1.3.2 Le simplex

Le simplex a donc été choisi comme type de cellule élémentaire composant la passerelle. Après des années d'études théoriques et numériques, ce type de cellule a été étudié expérimentalement lors du mémoire de l'année 2020-2021. Il s'agit de la cellule prismatique la plus simple, composée de 3 barres et 9 câbles. Cette cellule possède un angle de rotation relatif α entre ses deux bases qui lui est spécifique (voir FIGURE 1.7).

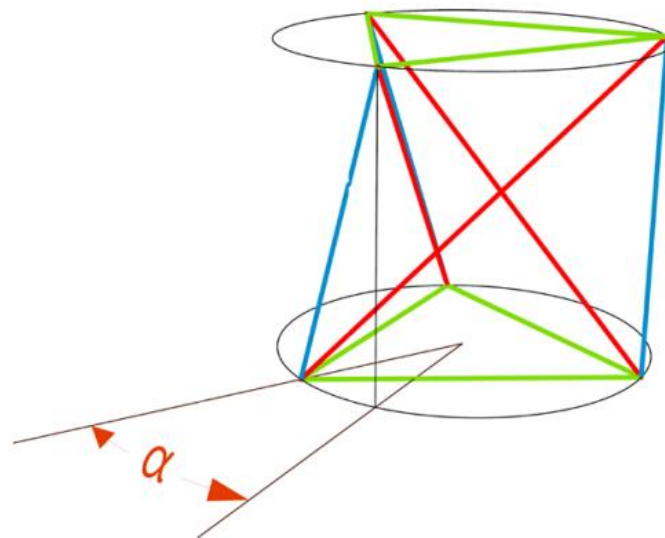
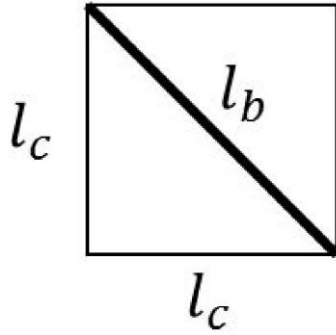


FIGURE 1.7 – Schéma angle relatif α [8]

Le module étudié est le simplex régulier, c'est-à-dire toutes les barres sont de même longueur l_b et tous les câbles aussi l_c . L'angle de rotation α est directement lié à la géométrie de la structure. Pour ce module, il existe une relation géométrique liant la longueur des barres l_b , la longueur des câbles l_c et l'angle de rotation α . Le rapport entre l_b et l_c est le suivant :



$$r \triangleq \frac{l_b}{l_c} = \sqrt{1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\alpha + 60^\circ)}$$

FIGURE 1.8 – Vue d'une face d'un simplex régulier [8]

Cette relation géométrique est :

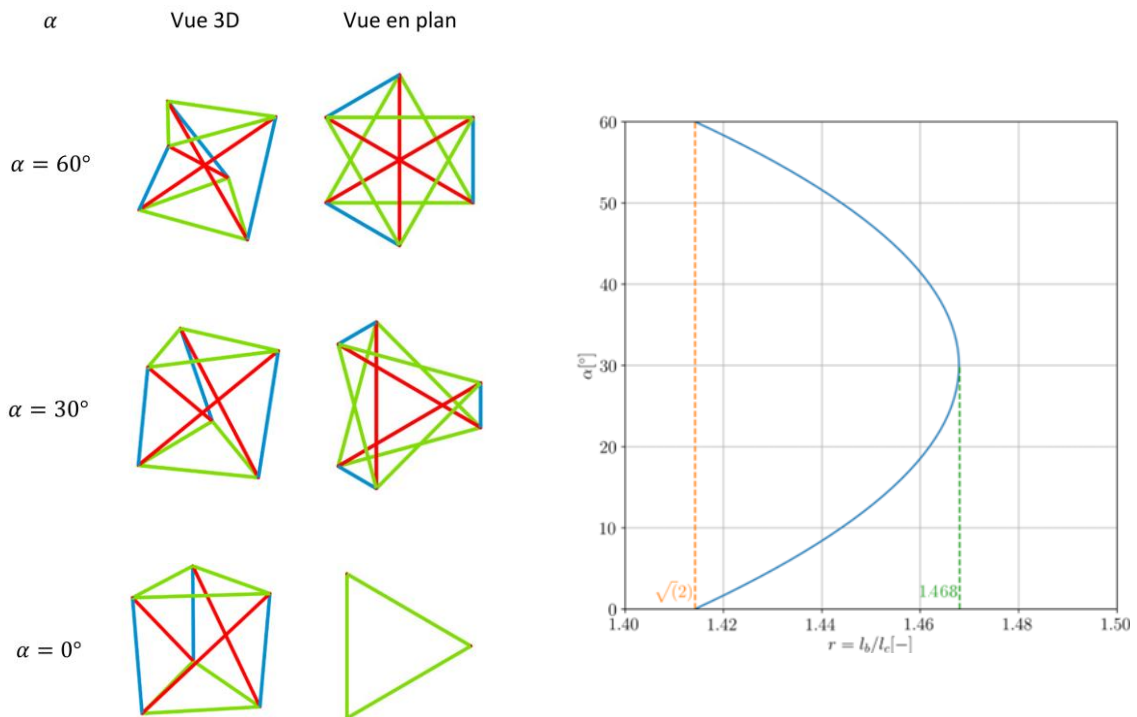


Figure 1.9 – Variation de l'angle de rotation d'un simplex régulier [8]

Caractéristiques du simplex régulier provenant de cette relation :

- Si les longueurs sont telles que l'on obtient $r < \sqrt{2}$, la géométrie n'est pas définie.
- Si les longueurs sont telles que $r = \sqrt{2}$, l'angle α est soit 0° , soit 60° . Dans le deuxième cas, la géométrie est telle que les barres se rejoignent en un point en leur milieu.
- Si les longueurs sont telles que $\sqrt{2} < r < 1,468$, l'angle α a deux solutions et donc deux géométries sont possibles.
- Si les longueurs sont telles que $r = 1,468$, l'unique solution de l'angle α est de 30° . La géométrie est fixée. La cellule ne possède aucune rigidité, la moindre perturbation modifie le rapport r ce qui induit une torsion dans la structure pour atteindre un équilibre à un angle $\alpha = 30^\circ + \epsilon$.
- En utilisant des câbles dont la longueur l_b est trop petite ou des barres dont la longueur l_b est trop grande, les câbles s'allongent dû à la traction et les barres se raccourcissent

dû à la compression amenant le simplex à $r = 1,468$ et donc $\alpha = 30^\circ$. La structure devient en état d'auto-contrainte, ce qui lui confère une certaine rigidité et stabilité.

1.3.3 Assemblage de cellules élémentaires

On distingue deux types d'assemblage de cellules élémentaires :

- L'assemblage nœud sur nœud : assemblage où plusieurs barres de différentes cellules élémentaires se rejoignent en un nœud.
- L'assemblage nœud sur câble : assemblage où chaque nœud ne reçoit qu'une seule barre.

1.3.3.1 Assemblage unidimensionnel

L'assemblage unidimensionnel de cellules élémentaires est caractérisé par une direction principale. La géométrie de cette typologie est idéale pour la conception d'une passerelle de tensegrité.

Il existe également deux types d'empilement de modules :

- En spirale : la rotation relative entre deux modules assemblés est toujours dans le même sens, horlogique ou anti-horlogique.
- En alterné : la rotation relative entre deux modules assemblés est alternée, une fois horlogique, une fois anti-horlogique.

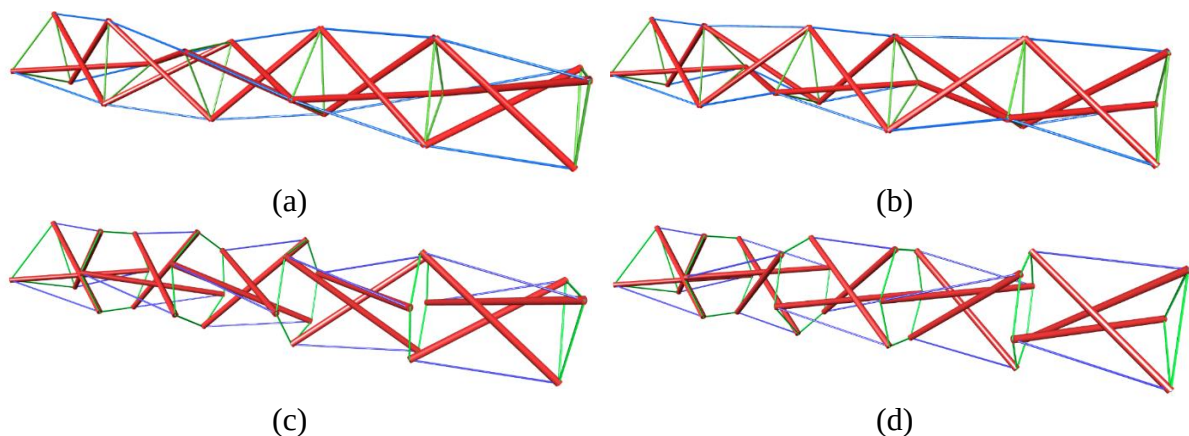


FIGURE 1.10 – Assemblages unidimensionnels : (a) buton sur buton en spirale (b) buton sur buton alterné (c) buton sur câble en spirale (d) buton sur câble alterné [illustration de l'auteur]

La direction principale ne doit pas nécessaire être rectiligne. Il est possible d'ajouter une courbure à la structure en utilisant une courbe comme direction principale (voir FIGURE 1.11) comme l'a fait Emmerich pour son tore hélicoïdal (voir FIGURE 1.4). Les câbles n'ont alors plus les mêmes longueurs.

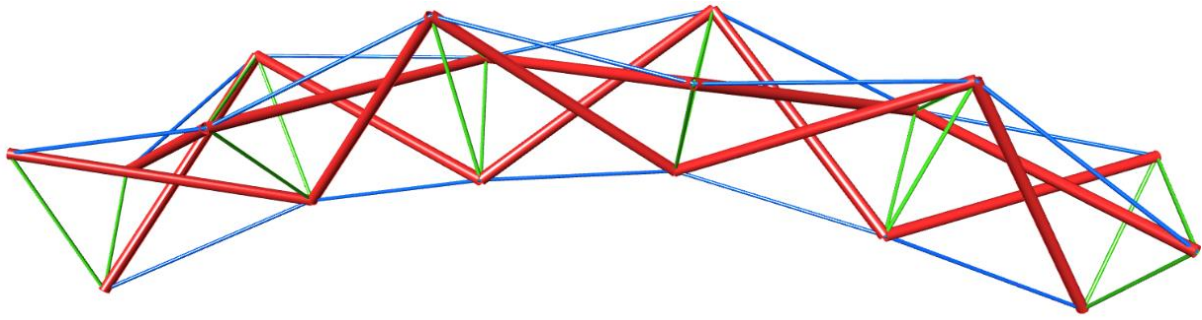


FIGURE 1.11 – Assemblage unidimensionnel avec courbure [illustration de l'auteur]

1.3.3.2 Assemblage bidimensionnel

L'assemblage bidimensionnel est composé par juxtaposition de cellules élémentaires les unes à côté des autres. Ce type de structure peut être à simple ou double courbure et/ou à plusieurs nappes, c'est-à-dire un empilement d'assemblage bidimensionnel.

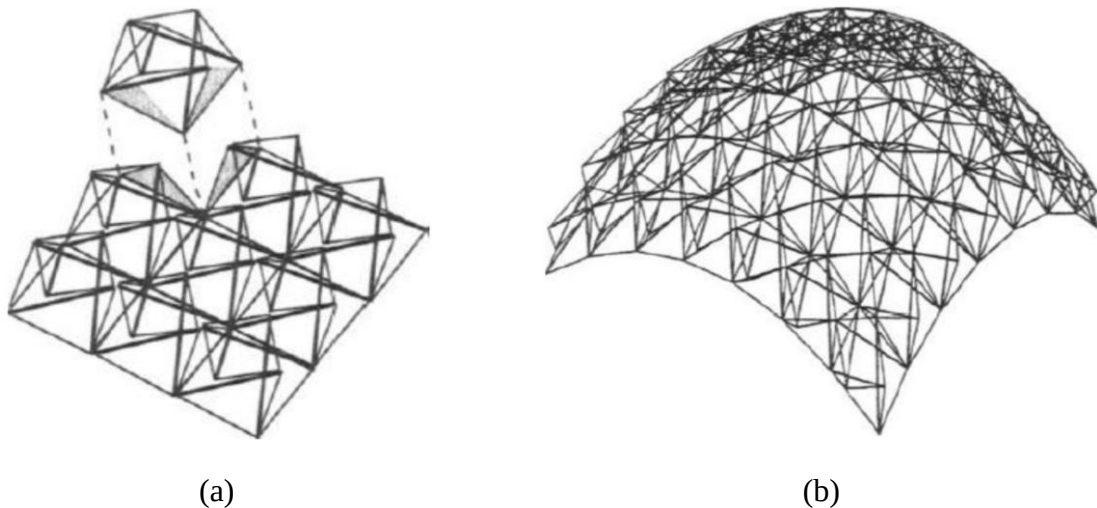


FIGURE 1.12 – Assemblages bidimensionnels : (a) Grille plane [9] (b) Grille à double courbure [9]

1.4 Réalisations

En plus de 70 ans d'existence, la tensegrité a permis la réalisation de nombreuses créations. Il importe de distinguer les sculptures en tensegrité, prolifiques dans le monde artistique, des structures, ayant un véritable usage porteur.

1.4.1 Monde artistique

Depuis les premières créations en tensegrité dans les années 1950, les sculptures en tensegrité ont fasciné de nombreux artistes.

Kenneth Snelson, considéré comme le père de la tensegrité, est sans nul doute le fer de lance des sculptures en tensegrité. Depuis sa première création en tensegrité, le X-Piece, visible à la FIGURE 1.3, il en a élaboré et construit plusieurs dizaines toutes plus impressionnantes les unes que les autres. Parmi celles-ci, on peut citer la Needle Tower II construite en 1969 et culminant à 30 mètres de hauteur (voir FIGURE 1.13), ainsi que la Sleeping Dragon, construite en 2002 et faisant plus de 22 mètres de longueur (voir FIGURE 1.14).



FIGURE 1.13 – Needle Tower II [10]



FIGURE 1.14 – Sleeping Dragon [11]

En 2003, à l'occasion de l'Exposition Mondiale d'Horticulture (IGA 2003) organisée dans la ville de Rostock en Allemagne, fut construite la plus haute tour en tensegrité au monde (voir FIGURE 1.15). L'idée originale de cette tour de plus de 49 mètres vient des architectes Gerkan, Marg & Partner mais elle fut réellement désignée par Mike Schailch et ses associés.



FIGURE 1.15 – The 2003 Warnowturn [12]

En 2014, les étudiants en architecture de l'Université d'État de Ball ont entrepris, avec leur professeur Gernot Riether et Andrew Wit, la construction de l'Underwood Pavillon, visible à la FIGURE 1.16. Il s'agit d'une sculpture en tensegrité permettant aux visiteurs de se protéger du soleil.

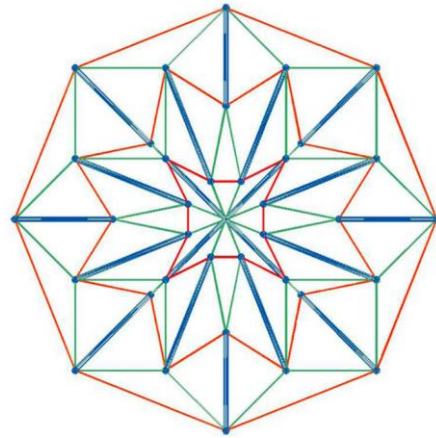


FIGURE 1.16 – Parametric Tensegrity Structure for Local Art Fair by students of Ball State University in Muncie, Indiana [13]

En juillet 2015, pour le cinquantième anniversaire de l'Université de Kent et le dixième anniversaire de la fondation de la Kent School of Architecture, un mémorial nommé « Tensegritree » a été érigé. L'objectif de cette sculpture était de créer un design en tensegrité innovant.



(a)



(b)

FIGURE 1.17 – Tensegritree : (a) réalisation (b) schéma [14]

1.4.2 Structurales

La tensegrité, bien que très présente dans le monde artistique, n'est que peu, voire pas, utilisée dans le monde du génie civil.

Le Kurpula Bridge (voir FIGURE 1.18), ouvert en septembre 2009, est une passerelle cycliste et piétonne d'une longueur de 470 mètres, d'une portée principale de 128 mètres, traversant la rivière Brisbane en Australie. Elle est le résultat d'un partenariat entre les bureaux Cox Rayner Architects, Baulderstone et Arup. Bien qu'ayant un aspect de structure de tensegrité, son fonctionnement ne permet pas de la qualifier comme tel. En effet, la tensegrité est combinée à un tablier portant fonctionnant en flexion. Néanmoins, il s'agit d'un ouvrage dont le rendu visuel est original grâce à la tensegrité.



FIGURE 1.18 – Kurpula bridge [15]

En 2013, à l'occasion du concours Salford Meadows Bridge, le bureau Atelier Architecture 64 imagine une passerelle de tenségrité (voir FIGURE 1.19) permettant de traverser la rivière Irwell à Manchester, au Royaume-Uni. Malheureusement, elle ne resta qu'un projet qui ne vit jamais le jour.



FIGURE 1.19 – Projet de passerelle de tenségrité Meadows bridge [16]

Enfin, la tenségrité n'est pas uniquement utilisée dans la conception de passerelles. White Rhino (voir FIGURE 1.20), un bâtiment couvert de toits en membrane supportés par une structure de tenségrité, a été construit en 2001 à Chiba au Japon. Son nom, dont la traduction est Rhinocéros blanc, vient de l'aspect extérieur de l'ouvrage caractérisé par la couleur blanche et de deux cornes, l'une culminant à 10 mètres de haut et l'autre à 7 mètres.



FIGURE 1.20 – White Rhino [17]

1.5 Déployabilité

Un autre aspect que la tensegrité peut apporter au domaine structurel est la déployabilité.

Les systèmes déployables sont des structures capables de varier leur géométrie d'une configuration compacte à une configuration déployée, sans rupture des éléments constructifs. La transformation d'un état à l'autre est appelée le déploiement. Les structures de tensegrité ont un véritable potentiel de déployabilité car leur géométrie varie en changeant les longueurs des éléments.

Dans les années 1990, H. Furuya et A. Hanor sont les premiers à étudier la déployabilité des structures de tensegrité. Le premier propose le pliage d'un mât composé de trois modules à trois barres sur un plan (voir FIGURE 1.21). Le second étudie le pliage d'une grille plane en un fagot (voir FIGURE 1.22).

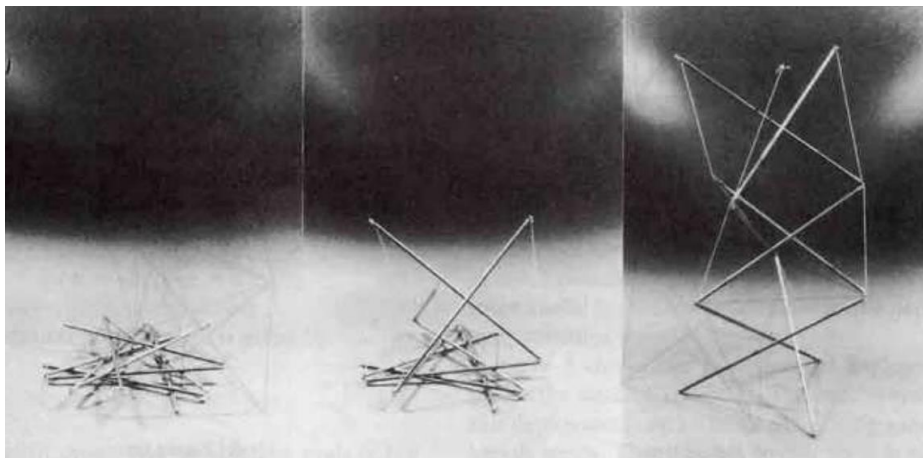


FIGURE 1.21 – Pliage de Furuya [18]

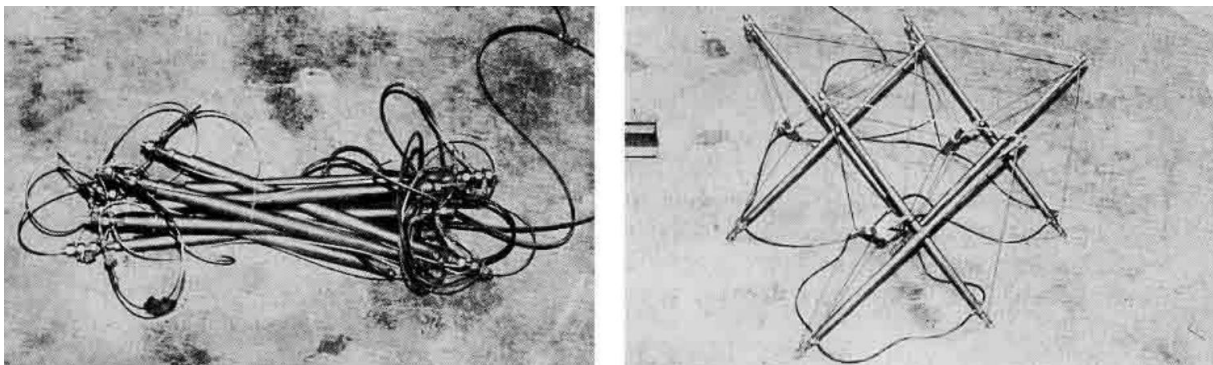


FIGURE 1.22 – Hanaor [18]

L'accessibilité aux personnes à mobilité réduite reste à ce jour un problème dans de nombreux sites. Afin de répondre à cela, Julien Averseng, Frédéric Jamin et Jérôme Quirant de l'Université de Montpellier ont présenté en 2017 une solution de plateforme temporaire composée de plusieurs modules en tensegrité assemblés bord à bord (voir FIGURE 1.23). Cette plateforme permettrait l'accessibilité de sites d'usage saisonnier, comme sur le littoral par exemple.

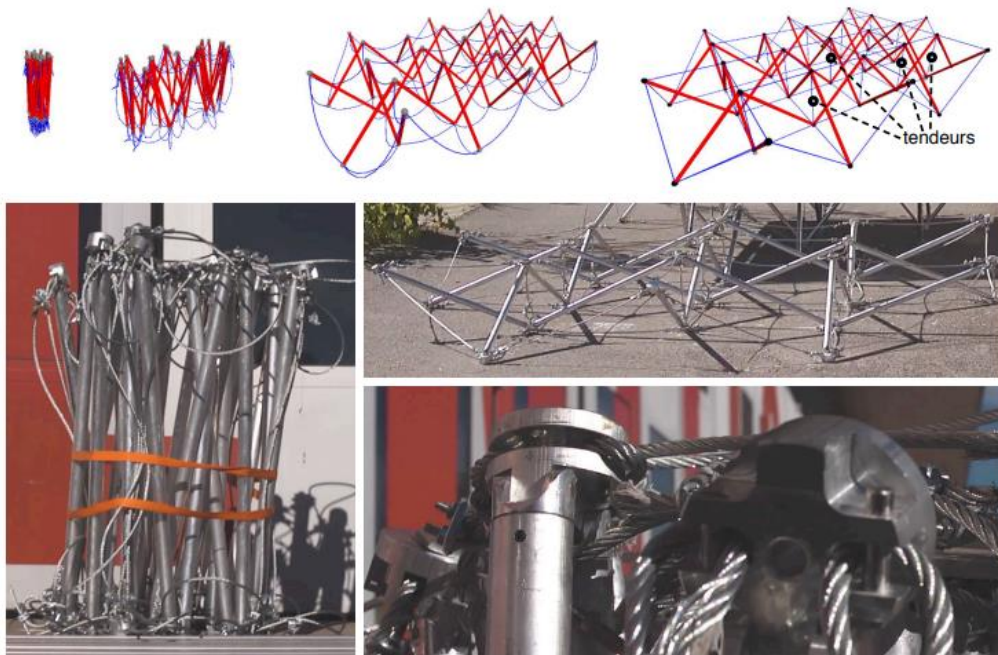


FIGURE 1.23 – Plateforme de tensegrité déployable [19]

Enfin, un concept de passerelle déployable d'une portée de 16 mètres a été présentée par Rhode-Barbarigos, Bel Hadj Ali, Morto et Smith. Un modèle à échelle 1:4 a été réalisé et testé expérimentalement par Sychterz (voir FIGURE 1.24). Les deux parties de la structure se déploient à partir des culées et s'assemblent à mi-portée.

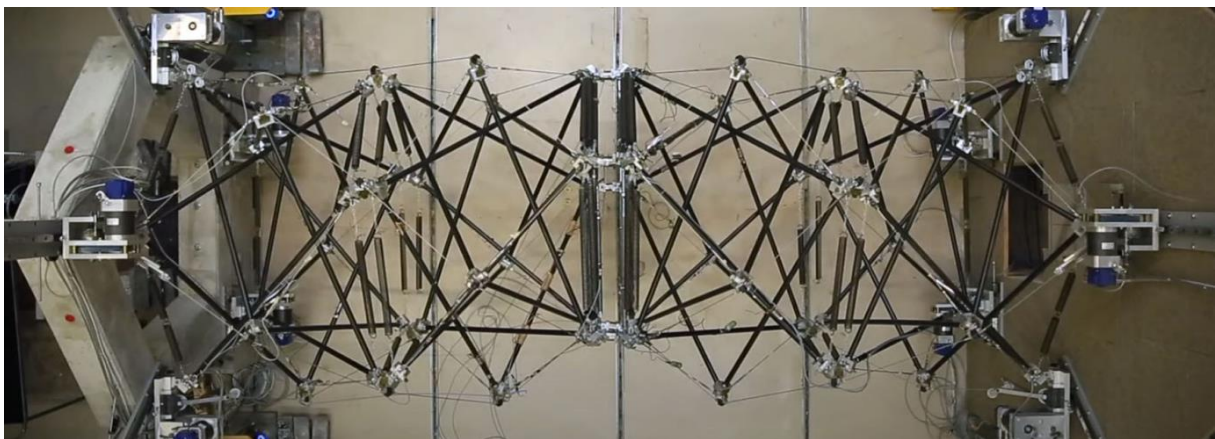


FIGURE 1.24 – Modèle réduit d'une passerelle de tensegrité déployable [14]

2 CONCEPTION

L'objectif de ce chapitre est de présenter la passerelle ainsi que la conception des éléments qui la composent.

2.1 Présentation de la passerelle

2.1.1 Les objectifs

Les objectifs fixés pour cette passerelle sont :

- Une portée de 14,7 mètres,
- Être composée de plusieurs modules appelés simplex,
- Pouvoir supporter une charge de 3kN/m^2 à l'ELU sur un tablier ayant une largeur de 1m,
- Être déployable par maximum 3 hommes,
- Ne pas avoir de dédoublement de câbles, notamment pour les câbles transversaux lors du déploiement de la passerelle,
- Les nœuds doivent être rotulés,
- Introduction simple de précontrainte dans la structure,
- La présence de 1 ou 2 câbles additionnels par module.

2.1.2 Géométrie de la passerelle

La géométrie de la passerelle est caractérisée par :

- Portée : $L = 14,7 \text{ m}$,
- Diamètre du cercle circonscrit aux bases : $D = 2,647 \text{ m}$,
- Hauteur : $H = 2,254 \text{ m}$,
- Rotation relative entre les bases : $\alpha = 39^\circ$,
- Empilement des modules : alterné.

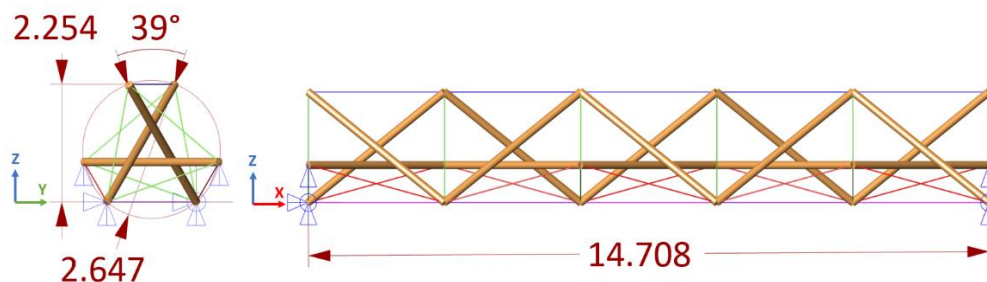


FIGURE 2.1 – Dimensions de la passerelle [illustration de l'auteur]

Les types d'éléments sont représentés à la FIGURE 2.1 : les boutons en brun, les câbles transversaux en vert, les câbles longitudinaux en bleu et rouge et les câbles additionnels en mauve. Les longueurs de chaque type d'élément sont visibles au TABLEAU 2.1.

Élément	Longueur [mm]
Buton	3931
Câble transversal	2294
Câble longitudinal	3074
Câble additionnel	3409

TABLEAU 2.1 – Longueurs des éléments

Les éléments considérés pour le calcul de la structure sont caractérisés par :

Butons :

- Diamètre : $d = 160 \text{ mm}$,
- Épaisseur : $t = 20 \text{ mm}$,
- Module de Young : $E = 8666 \text{ MPa}$,
- Résistance caractéristique en flexion : $f_{mk} = 85 \text{ MPa}$,
- Résistance caractéristique à la compression axiale : $f_{c,o,k} = 57 \text{ MPa}$,
- Densité : $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$.

Câbles :

- Diamètre : $d = 20 \text{ mm}$,
- Module de Young : $E = 16000 \text{ MPa}$,
- Charge de rupture : $T_u = 420 \text{ kN}$,
- Résistance ultime en traction : $f_u = 1337 \text{ MPa}$,
- Densité : $\rho = 764 \text{ kg/m}^3$.

La valeur du module de Young des cordes ne correspond pas à la réalité et devra être modifiée pour l'étude du comportement de la passerelle. La valeur utilisée pour le dimensionnement est une valeur atteignable pour ce matériau, permettant d'utiliser tout le potentiel de la structure, mais pas atteinte lors de la réalisation pratique.

2.1.3 Conditions d'appuis

La structure est isostatique sur ses appuis. Une compression/dilatation est autorisée dans les directions X et Y sans permettre le pivotement. Il est vérifié que la structure sous poids propre exerce une force verticale de compression sur les 4 appuis. C'est pourquoi les 4 déplacements verticaux sont bloqués. Les conditions d'appuis sont :

- Déplacement dans la direction X bloqué au nœud 1,
- Déplacements dans la direction Y bloqués aux nœuds 2 et 15,
- Déplacements dans la direction Z bloqués aux nœuds 0, 2, 15 et 17.

Ces conditions pour les 6 nœuds aux extrémités de la structure sont reprises dans le TABLEAU 2.2.

Nœud	Direction		
	X	Y	Z
0	Libre	Libre	Bloquée
1	Libre	Libre	Libre
2	Bloqué	Bloqué	Bloqué
15	Libre	Bloqué	Bloqué
16	Libre	Libre	Libre
17	Libre	Libre	Bloqué

TABLEAU 2.2 – État des déplacements des nœuds aux extrémités

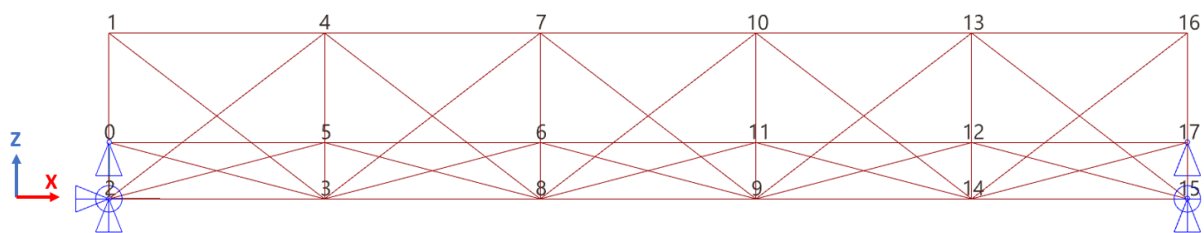


FIGURE 2.2 – Structure en vue latérale, conditions d'appuis en bleu [illustration de l'auteur]

2.1.4 Hypothèses de chargement

Le dimensionnement de la passerelle est réalisé en considérant le chargement d'un tablier de 1 mètre de large. Les charges à considérer sont :

- Charges variables : $Q = 1,5 \text{ kN/m}^2$
- Charges permanentes : $G = 0,5 \text{ kN/m}^2$

Les combinaisons :

- État limite de service : $ELS = 1 \times Q + 1 \times G = 2 \text{ kN/m}^2$, total de 3000kg
- État limite ultime : $ELU = 1,5 \times Q + 1,35 \times G = 3 \text{ kN/m}^2$, total de 4500kg

Les nœuds chargés sont les nœuds inférieurs. Ils sont 2 par base et l'espacement entre chaque base dans la direction de la structure est de 3 mètres. En considérant la répartition équitable entre les deux nœuds d'une même base, les différents cas de charges sont repris dans le tableau TABLEAU 2.3.

Chargement	Nœuds chargés	Charge par nœud [kg]
ELS	3-5-6-8-9-11-12-14	300
ELU	3-5-6-8-9-11-12-14	450

TABLEAU 2.3 – Cas de chargements de la structure

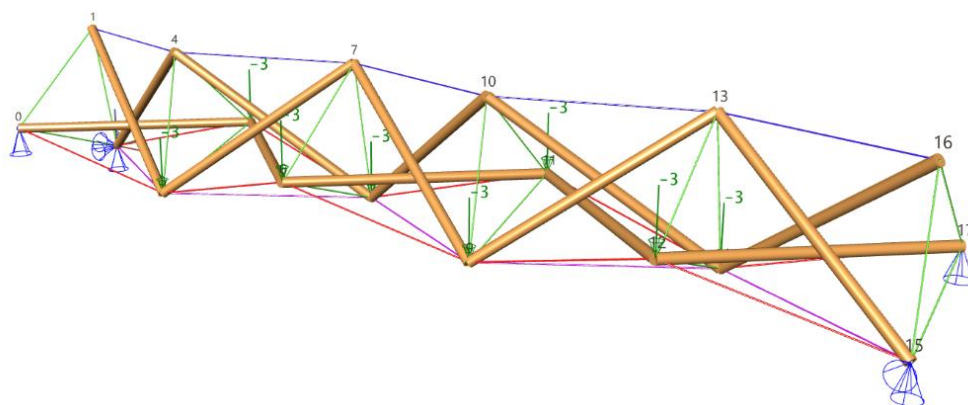


FIGURE 2.3 – ELS [illustration de l'auteur]

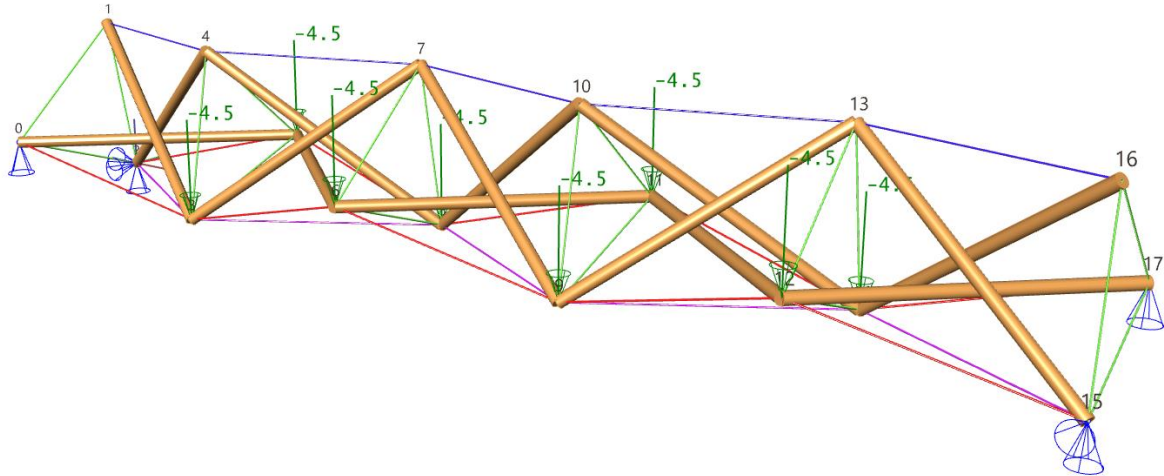


FIGURE 2.4 – ELU [illustration de l'auteur]

2.1.5 Câble additionnel

L'ajout d'un câble additionnel sur chaque module permet de diminuer la déformation de la structure et de rendre sa déformation linéaire selon le chargement appliqué. En ajoutant ce câble, la structure est rigidifiée. Afin d'avoir ce câble tendu, il est nécessaire que l'angle relatif des modules soit plus grand que 30°.

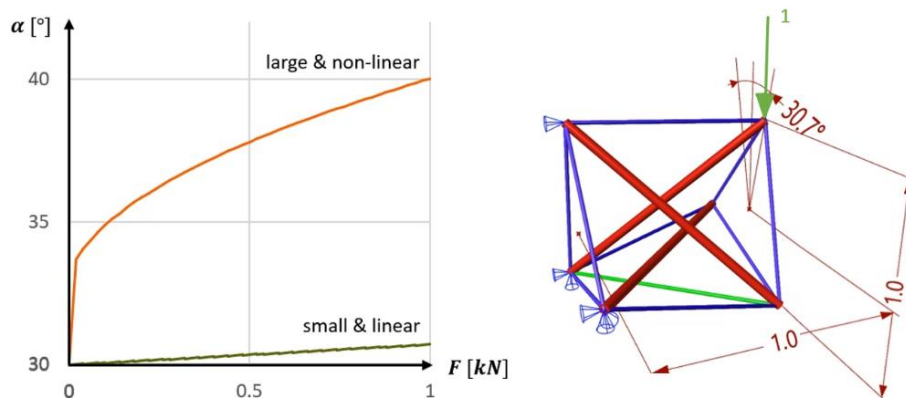


FIGURE 2.5 – Exemple de déformation d'un simplex sans câble additionnel en orange, avec câble additionnel en vert [20]

2.1.6 Précontrainte

Le critère à vérifier est que chaque câble composant la passerelle de tensegrité travaille en traction après application des charges externes. En effet, les câbles ne permettent pas de reprendre d'effort de compression.

$$\text{Tension sous poids-propre} + \text{Prétension} - \text{Perte de tension dû au chargement} > 0$$

Pour cela, la précontrainte est introduite dans la passerelle par raccourcissement des sangles à cliquet placées aux emplacements de 2 câbles longitudinaux inférieurs par module (voir FIGURE 2.6). L'effort de précontrainte appliqué par raccourcissement ΔL de l'élément dépend de ses caractéristiques et est donné par la formule :

$$\Delta F = \frac{\Delta L * E * A}{L}$$

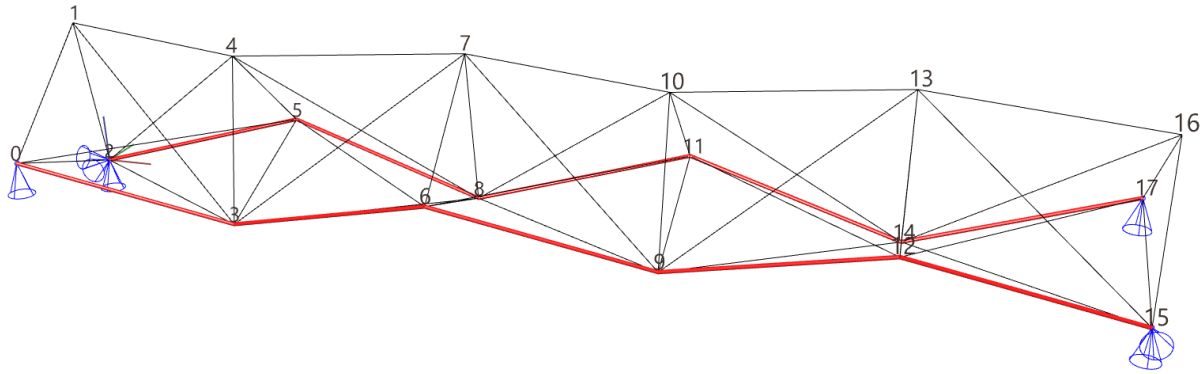


FIGURE 2.6 – Emplacement des sangles à cliquet sur la passerelle [illustration de l'auteur]

Pour précontraindre symétriquement la structure, 3 paramètres de raccourcissement d'élément sont utilisés (les noms des sangles sont visibles à la FIGURE 2.7) :

- R_1 dans les sangles SAC2-5, SAC0-3, SAC14-17 et SAC12-15,
- R_2 dans les sangles SAC5-8, SAC3-6, SAC11-14 et SAC9-12,
- R_3 dans les sangles SAC8-11 et SAC6-9.

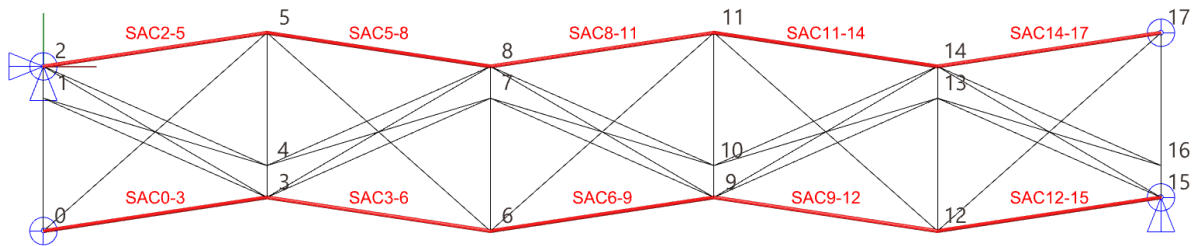


FIGURE 2.7 – Appellation des sangles à cliquet [illustration de l'auteur]

Ces sangles à cliquet permettent d'introduire jusqu'à 15 kN de précontrainte dans la structure. Pour le dimensionnement de la passerelle, une introduction maximale de 40 kN est utilisée.

2.1.7 Programme de calcul numérique

Le calcul de la passerelle de tenségrité est réalisé dans l'environnement paramétrique *Grasshopper*. Celui-ci permet de générer une géométrie de la passerelle avec des paramètres définis en entrée.

- Portée : $L = 14,708$ m
- Nombre de modules : $n_m = 5$
- Nombre de câbles additionnels : $n_{c,a} = 1$
- Empilement des modules : par alternance
- Caractéristique des éléments
- Conditions d'appuis

Le plug-in *MUSCLE* développé par Jonas FERON permet le calcul structurel d'une structure de tenségrité. Il prend en compte le poids propre, l'introduction de précontrainte dans les éléments et l'application de charges extérieures sur les nœuds. Les efforts internes sont obtenus via la méthode de la relaxation dynamique. Cette méthode numérique discrétise la structure et répartit la masse du système aux nœuds. Un processus itératif simule le comportement pseudo-dynamique du système oscillant autour de points d'équilibres.

Le solveur évolutionnaire *Galapagos* (intégré dans *Grasshopper*) permet d'optimiser la géométrie et la prétension à introduire pour répondre aux objectifs énoncés dans la partie 2.1.1 (voir FIGURE 2.8). Ce solveur économise la matière tout en gardant une structure suffisamment précontrainte pour respecter le principe de tenségrité.

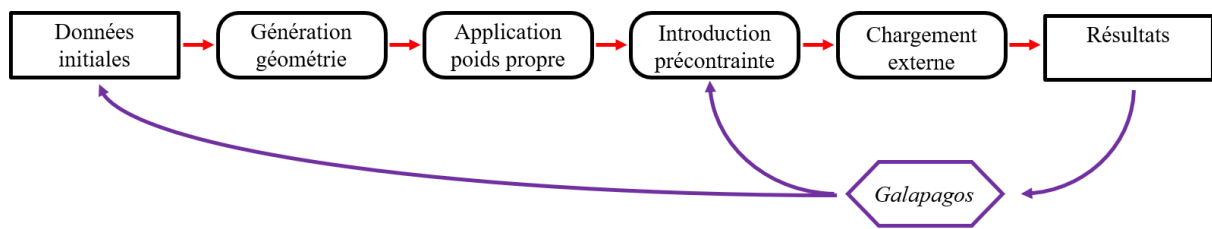


FIGURE 2.8 – Schéma outil d'optimisation Galapagos [illustration de l'auteur]

2.1.8 Résultats numériques

La passerelle est calculée selon 2 modèles :

- La passerelle dimensionnante à 5 modules permet de dimensionner les éléments qui la composent, afin ne pas subir de rupture. Cette structure répond aux objectifs fixés à la section 2.1.1.
- La structure expérimentale à 2 modules sont les résultats attendus du premier prototype construit. Les propriétés des matériaux sont adaptées afin de correspondre à la réalité.

Les résultats de la passerelle dimensionnante sont détaillés en 3 états : l'état de précontrainte, l'état limite de service (ELS) et l'état limite ultime (ELU). Les résultats de la structure expérimentale 2 modules sont détaillés en seulement 2 états : l'état de précontrainte et l'état de chargement maximal.

2.1.8.1 Résultats passerelle dimensionnante

Précontrainte de la passerelle :

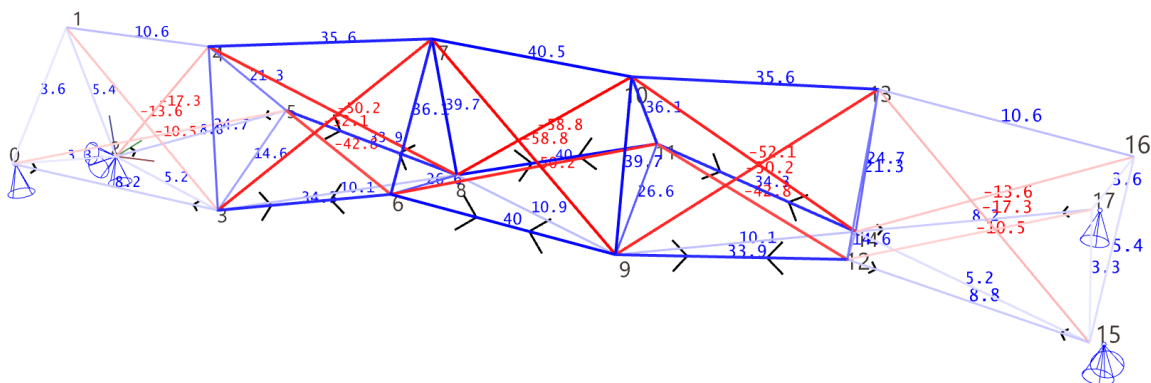


FIGURE 2.9 – Passerelle dimensionnante – Efforts précontrainte [illustration de l'auteur]

Eléments	Prétension [kN]	Raccourcissement [mm]
SAC2-5 et SAC12-15	8,8	R ₁ = 21
SAC0-3 et SAC14-17	8,2	
SAC5-8 et SAC9-12	33,9	R ₂ = 66
SAC3-6 et SAC11-14	34,3	
SAC8-11	40,0	R ₃ = 77
SAC6-9	40,0	

TABLEAU 2.4 – Passerelle dimensionnante – Prétension des sangles

Etat limite ultime (ELU) :

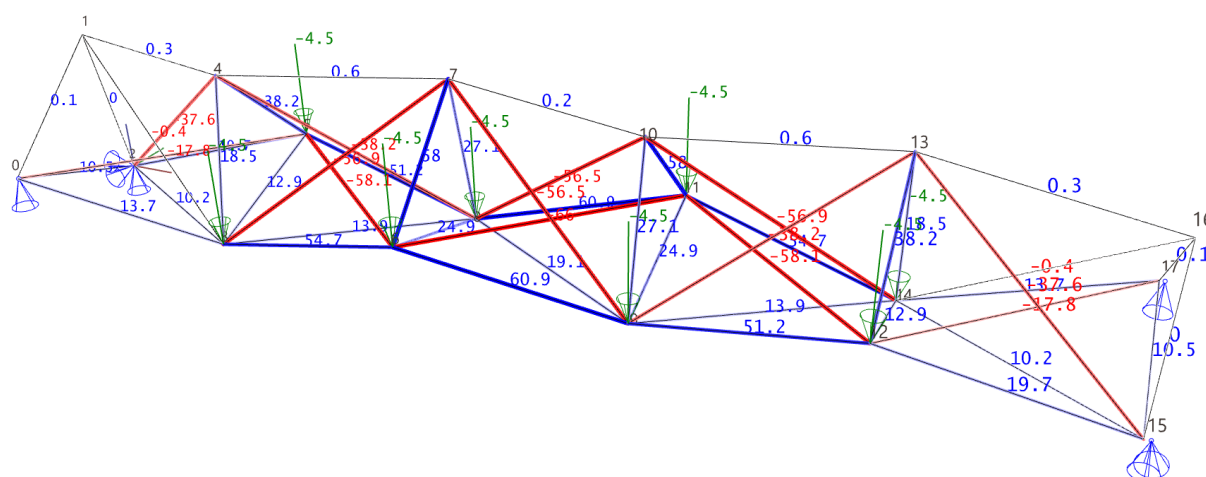


FIGURE 2.11 – Passerelle dimensionnante – Efforts ELU [illustration de l'auteur]

Élément	Effort maximal [kN]
Buton	66,0
Corde transversale	58,0
Corde longitudinale	0,6
Sangle à cliquet	60,8
Corde additionnelle	19,1

TABLEAU 2.8 – Passerelle dimensionnante – Efforts maximaux ELU

Appui	Réaction verticale R_v [kN]
0	6,1
2	11,6
15	11,6
17	6,1

TABLEAU 2.9 – Passerelle dimensionnante – Réactions d'appuis ELU

Résumé des efforts dans la passerelle dimensionnante :

Élément	Efforts maximaux [kN]		
	Prétension	ELS	ELU
Buton	58,8	59,9	66,0
Corde transversale	39,7	50,2	58,0
Corde longitudinale	40,5	13,4	0,6
Sangle à cliquet	40,0	53,4	60,8
Corde additionnelle	10,9	16,4	19,1

TABLEAU 2.10 – Passerelle dimensionnante – Résumé efforts maximaux

2.1.8.2 Résultats structure expérimentale à 2 modules

Les propriétés des matériaux utilisés pour la réalisation de la passerelle sont différentes de celles utilisées lors du dimensionnement. Ce changement est expliqué à la section 2.2.3.

Propriétés différentes :

- Module de Young des sangles à cliquet $E_{SAC} = 3,77 \text{ GPa}$
- Module de Young des cordes $E_c = 9 \text{ GPa}$

- Capacité de mise en prétension des sangles à cliquet $F_{prét} = 15 \text{ kN}$

Précontrainte de la passerelle :

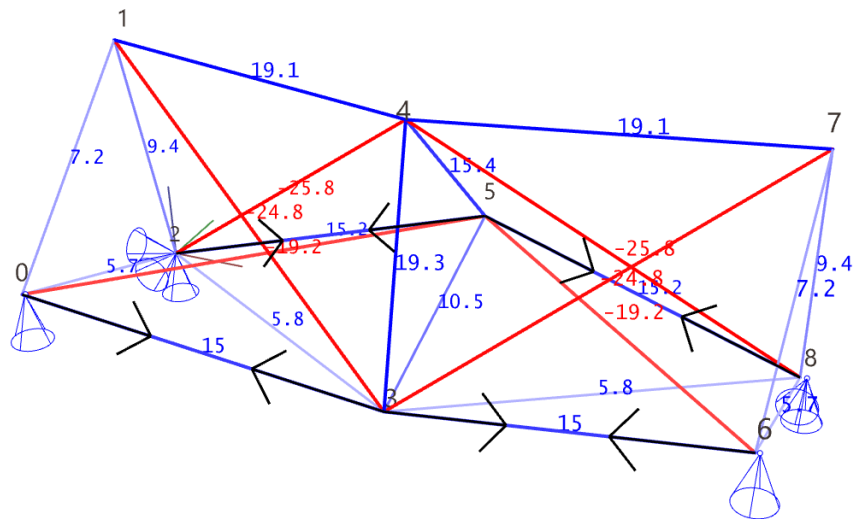


FIGURE 2.12 – Structure expérimentale 2 modules – Efforts précontrainte [illustration de l’auteur]

Eléments	Prétension [kN]	Raccourcissement [mm]
SAC2-5 et SAC5-8	15,2	$R_1 = 73$
SAC0-3 et SAC3-6	15,0	

TABLEAU 2.11 – Structure expérimentale 2 modules – Prétension des sangles

Élément	Effort maximal [kN]
Buton	25,8
Corde transversale	19,3
Corde longitudinale	19,1
Sangle à cliquet	15,2
Corde additionnelle	5,8

TABLEAU 2.12 – Structure expérimentale 2 modules – Efforts maximaux durant précontrainte

Chargement maximal de la passerelle :

La structure expérimentale à 2 modules peut être chargée avec 1000 kg sur les 2 nœuds inférieurs de la base du milieu, soit un total de 2000 kg.

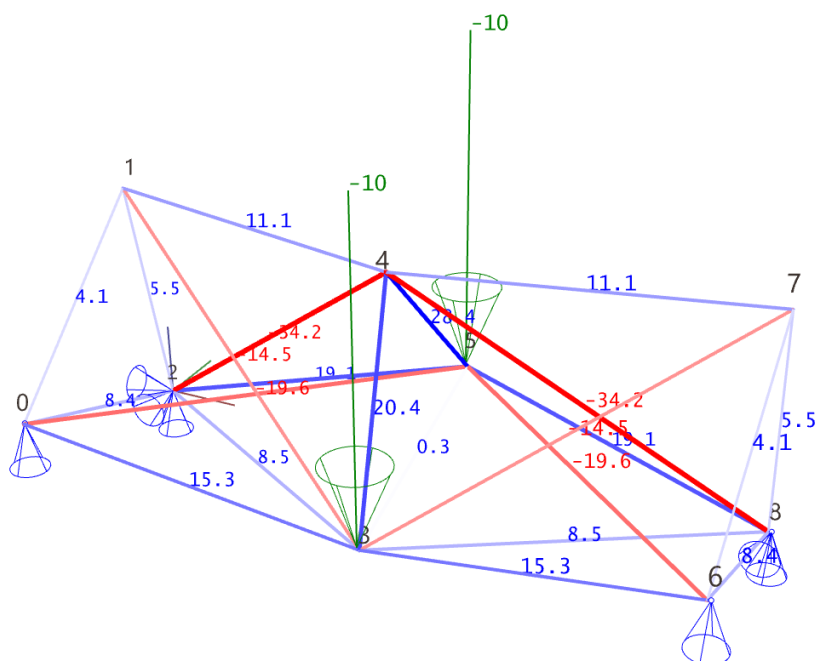


FIGURE 2.13 – Structure expérimentale 2 modules – Efforts chargement [illustration de l’auteur]

Élément	Effort maximal [kN]
Buton	34,2
Corde transversale	28,4
Corde longitudinale	11,1
Sangle à cliquet	19,1
Corde additionnelle	8,5

TABLEAU 2.13 – Structure expérimentale 2 modules – Efforts maximaux chargement

Appui	Réaction verticale R_v [kN]
0	3,0
2	7,0
6	3,0
8	7,0

TABLEAU 2.14 – Structure expérimentale 2 modules – Réactions d’appuis chargement

Résumé des efforts dans la passerelle réelle :

Élément	Effort maximal [kN]	
	Prétension	Chargement
Buton	25,8	34,2
Corde transversale	19,3	28,4
Corde longitudinale	19,1	11,1
Sangle à cliquet	15,2	19,1
Corde additionnelle	5,8	8,5

TABLEAU 2.15 – Structure expérimentale 2 modules – Résumé efforts maximaux

2.2 Description des éléments

La résistance des éléments doit être assez grande pour ne pas rompre sur la passerelle dimensionnante. Les valeurs de sollicitation et de résistance pour chaque élément composant la structure sont résumées au TABLEAU 2.16.

Élément	Sollicitation ELU	Charge de rupture	Taux de travail ultime
Butons			
Bambou	66 kN	68 kN	97%
Plaque d'embout		79 kN	83%
Tige filetée renforcée		69 kN	95%
Câbles transversaux			
Corde	58 kN	287 kN	20%
Manille		120 kN	48%
Gousset		123 kN	47%
Câbles longitudinaux			
Corde	60,8 kN	287 kN	21%
Manille		120 kN	51%
Gousset		123 kN	49%
Sangle à cliquet		100 kN	61%
Maillon de chaîne		210 kN	29%
Câbles additionnels			
Corde	19,1 kN	287 kN	7%
Manille		60 kN	32%
Gousset		31 kN	62%

TABLEAU 2.16 – Récapitulatif des sollicitations et résistances des éléments

2.2.1 Les nœuds

La structure à 5 modules est constituée de 18 nœuds. L'objectif de chaque nœud est de connecter 2 butons, 2 câbles transversaux, 2 câbles longitudinaux et, pour certains, 2 câbles additionnels. Les axes de tous ces éléments doivent être concourants lorsque l'angle relatif entre deux bases est de 39° , angle définissant la géométrie initiale. Les nœuds doivent permettre le bon déploiement de la structure (voir section 2.5 Déploiement), le chargement de la structure et doivent résister aux sollicitations appliquées. Ils doivent également être utilisables sur deux orientations de la structure, avec appuis simples (réalisés dans ce mémoire) et appuis complexes (pas réalisés dans ce mémoire).

Pour répondre à ces objectifs, les nœuds sont réalisés sur base de boules en acier de rayon 50mm. Dans ces boules sont creusés des trous taraudés ainsi qu'un alésage et sur lesquelles sont soudés différents goussets pour l'attache des câbles. Les axes des différents éléments suivent des axes bien précis dont le point concourant est le centre de la boule, correspondant au nœud numérique. La conception des nœuds et des axes de chaque élément connecté est réalisée sur le logiciel *Solidworks*, un logiciel de conception 3D assistée par ordinateur, avec l'aide du logiciel *Geogebra*, un logiciel de géométrie dynamique 3D. Elle est détaillée en ANNEXE F :

CONCEPTION NUMÉRIQUE DES NŒUDS. Des photos de l'usinage des nœuds sont exposées en ANNEXE G : PHOTOS DE L'USINAGE DES NŒUDS.

La composition d'un nœud est visible à la FIGURE 2.14.

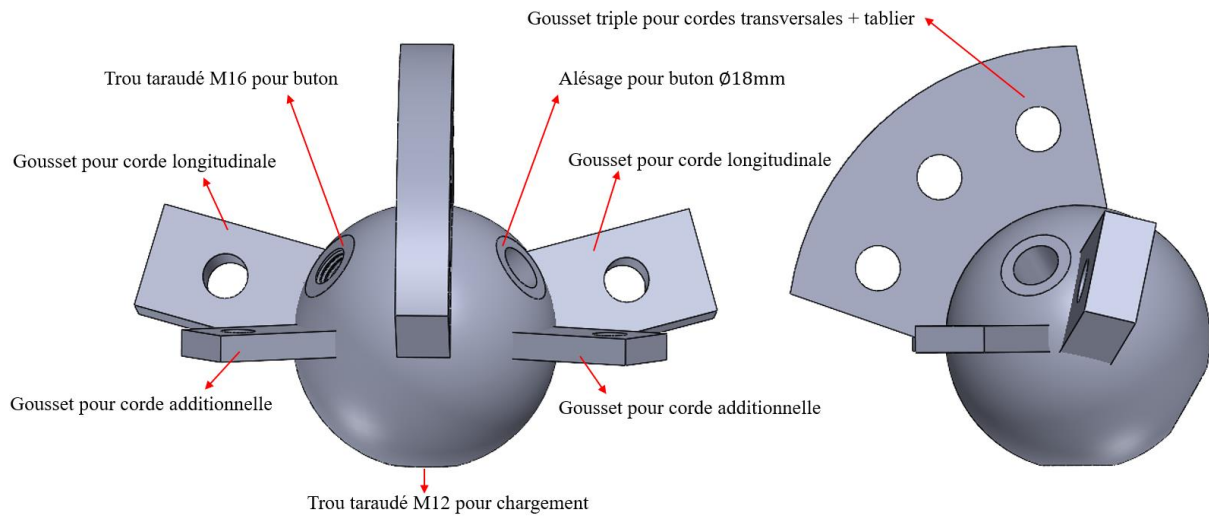


FIGURE 2.14 – Modèle numérique d'un nœud (BT7) [illustration de l'auteur]

- Trou taraudé M16 d'une profondeur de 30mm permettant la connexion d'un bouton,
- Alésage Ø18mm traversant toute la boule permettant la connexion d'un bouton,
- Gousset triple permettant l'accroche de câbles transversaux ainsi qu'un éventuel tablier,
- Goussets longitudinaux permettant l'accroche de câbles longitudinaux,
- Goussets additionnels permettant l'accroche de câbles additionnels,
- Trous taraudés M12 permettant la fixation d'un anneau de levage pour le chargement de la structure ainsi que pour le système d'appuis pour la structure d'appuis complexes.

La boule n'ayant qu'un rayon de 50 mm, il est important de bien concevoir chaque composant afin d'éviter tout problème d'encombrement lors de la connexion de la boule aux éléments de la structure.

La disposition des nœuds sur la structure est visible à la FIGURE 2.15.

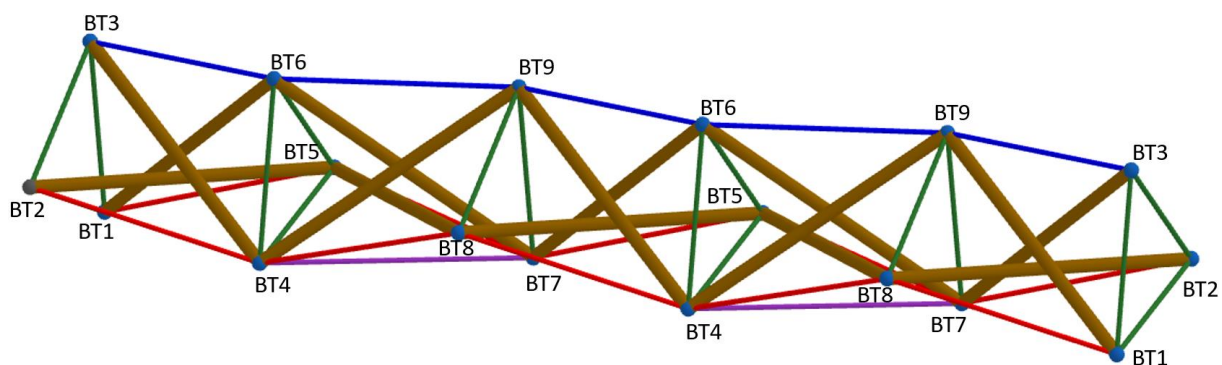


FIGURE 2.15 - Disposition des nœuds sur la structure [illustration de l'auteur]

Parmi les 18 nœuds, il y a 9 différents types de nœuds (notés BTX) nécessaires pour répondre aux objectifs.

- Pour le bon déploiement de la structure, il est nécessaire d'avoir l'alésage Ø18mm, servant à la connexion d'un bouton, toujours orienté de telle sorte à pouvoir y glisser la tige filetée d'un bouton d'un nouveau module. Pour cela, une alternance des types de boule est utilisée entre chaque base de la structure.
- Les nœuds situés aux extrémités (BT1, BT2 et BT3) de la structure ne disposent uniquement des goussets nécessaires à les connecter au module adjacent. Ils ne sont donc pas pourvus des goussets longitudinaux et additionnels inutiles. Ils sont également dépourvus de l'alésage Ø18mm, non-nécessaire au déploiement sur les boules aux extrémités, privilégiant le trou taraudé M16.
- La structure peut être utilisée avec 2 câbles additionnels par module. Il y a donc un nœud par base n'ayant pas de goussets additionnels (BT6 et BT8). Remarque : le nœud BT2 a besoin d'un gousset additionnel pour l'une des deux extrémités, il est donc équipé d'un gousset additionnel.
- Pour le chargement de la structure, il est nécessaire de réaliser un trou taraudé M12 tel que son axe soit vertical. Il est donc nécessaire de réaliser différents BT pour les différentes positions de ces trous taraudés sur les boules.

Sur ces nœuds, 3 types de goussets sont utilisés. Il est nécessaire qu'ils résistent aux sollicitations et qu'ils permettent l'accroche de manilles. Ils sont soudés à la boule via un rayon de soudure de 4mm d'épaisseur. Le calcul de leur résistance est détaillé en ANNEXE A : NOTE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT.

- Le gousset longitudinal permet une sollicitation maximale de 122 kN. La manille s'y accrochant est une manille Lemmens de 2T. Les dimensions du gousset longitudinal sont visibles à la FIGURE 2.16.

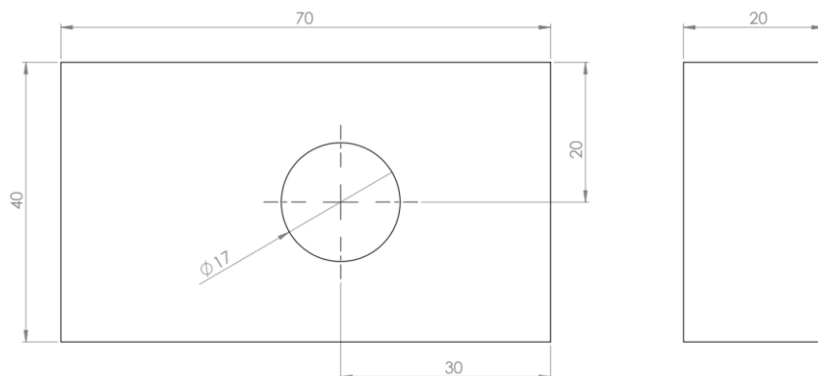


FIGURE 2.16 - Dimensions gousset longitudinal [illustration de l'auteur]

- Le gousset triple permet une sollicitation maximale de 122 kN. La manille s'y accrochant est une manille Lemmens de 2T. Les dimensions du gousset triple sont visibles à la FIGURE 2.17.

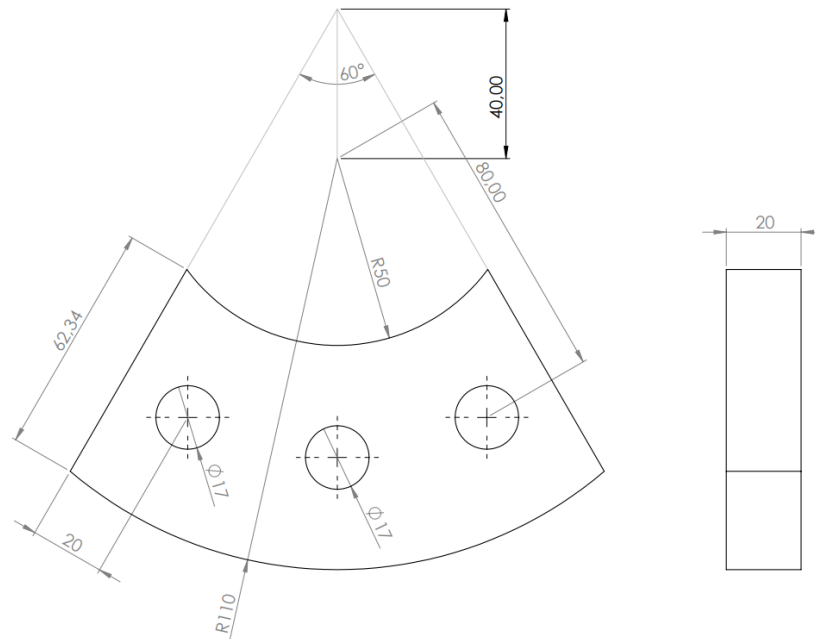


FIGURE 2.17 - Dimensions gousset triple [illustration de l'auteur]

- Le gousset additionnel permet une sollicitation maximale de 30 kN. La manille s'y accrochant est une manille Lemmens 1T. Les dimensions du gousset additionnel sont visibles à la FIGURE 2.18.

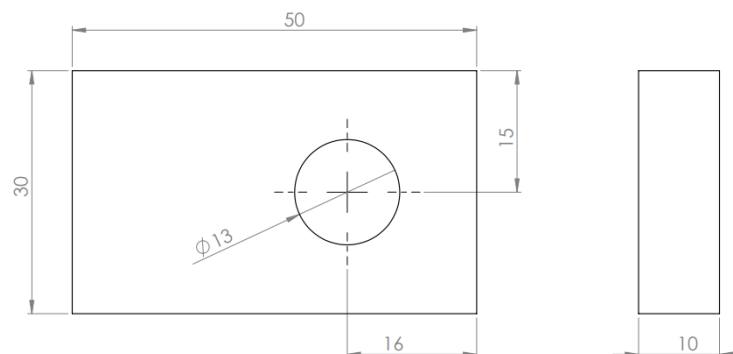


FIGURE 2.18 - Dimensions gousset additionnel [illustration de l'auteur]

D'autres avantages de la boule sont :

- La boule permet de bien rotuler le nœud lorsqu'il est déposé sur un appui.
- Le nœud numérique étant le centre de la boule, il est possible de déterminer sa position en connaissant les positions de 4 points sur la surface de celle-ci (voir section 3.2.3).

Les objectifs du nœud ont été atteints. La connexion d'un nœud (BT7) aux éléments est visible à la FIGURE 2.19. Le système de chargement de la structure est visible à la FIGURE 2.20.



FIGURE 2.19 - Connexion des éléments à un nœud (BT7) [illustration de l'auteur]



FIGURE 2.20 - Dispositif chargement d'un nœud (BT7) [illustration de l'auteur]

2.2.2 Les boutons

Chaque module est composé de 3 boutons. Le nombre total de boutons sur la passerelle à 5 modules est donc de 15 boutons. Ces boutons sont principalement réalisés à partir de bambou. L'objectif de ce chapitre est de détailler la composition d'un bouton.

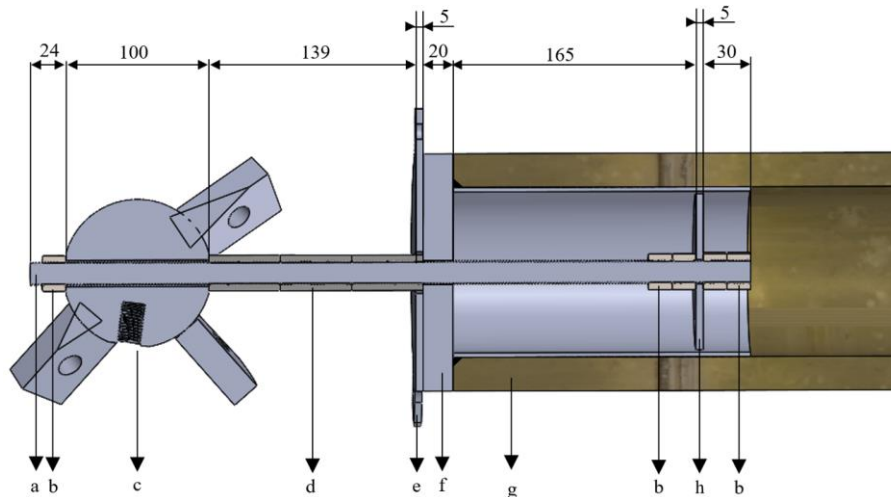
Les boutons doivent donc être capables de résister à la compression, de ne pas flamber ainsi que d'avoir une bonne connexion aux nœuds permettant la déployabilité.

2.2.2.1 Composition d'un bouton

La longueur d'un bouton, de nœud numérique (centre des boules) à nœud numérique est de $l_b = 3931\text{mm}$. Ces boutons sont composés de 8 éléments décrits ci-dessous. La FIGURE 2.21 montre un schéma de la composition d'un bouton.



Coupe A :



Légende :

- a. Tige fileté M16
- b. Ecrou M16
- c. Nœud
- d. Manchon M16
- e. Plaque déploiement
- f. Embout
- g. Bambou
- h. Plaque d'appoint

Coupe B :

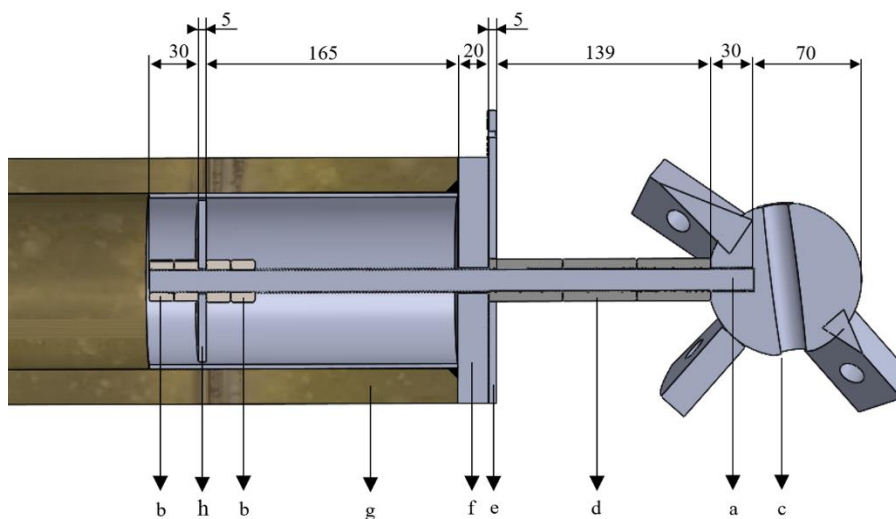


FIGURE 2.21 – Schéma de la composition d'un bouton [illustration de l'auteur]

2.2.2.2 Bambou

Le bambou constitue l'élément principal du buton. Il s'agit d'une plante caractérisée par une tige formée d'un chaume, c'est-à-dire une succession de nœuds et d'entre-nœuds. Le bambou est présent sur tous les continents, sauf en Antarctique. Leur vitesse de croissance est très rapide, allant jusqu'à 1m par jour chez certaines espèces. Leur section cylindrique creuse confère à l'élément une bonne résistance au flambement ainsi qu'un important avantage de poids. Enfin, l'utilisation de bambou donne une certaine originalité à la structure.

L'espèce de bambou utilisée est le *Guadua angustifolia*, originaire de Colombie. Les propriétés mécaniques utilisées pour le dimensionnement de ces éléments proviennent d'une étude de l'Université Larenstein aux Pays-Bas [21] comparant les espèces *Guadua* et *Moso*. Cette étude donne la densité ρ , le module d'élasticité moyen $E_{0,mean}$ ainsi que la résistance à la flexion caractéristique $f_{m,k}$. Bien que le bambou ne soit pas du bois, les butons sont dimensionnés selon l'Eurocode 5.

Hypothèses :

- Les valeurs caractéristiques sont égales à $\frac{2}{3} * \text{valeurs moyennes}$,
- La résistance à la compression axiale est égale à $\frac{2}{3} * \text{résistance à la flexion}$.

	Symbole	Valeur	Unité
Densité	ρ	650	kg/m ³
Module d'élasticité moyen	$E_{0,mean}$	13000	MPa
Module d'élasticité caractéristique	$E_{0,k}$	8666	MPa
Résistance caractéristique à la flexion	$f_{m,0,k}$	85,5	MPa
Résistance caractéristique à la compression axiale	$f_{c,0,k}$	57	MPa

TABLEAU 2.17 - Propriétés mécaniques du bambou *Guadua*

Calcul et optimisation de la section :

L'objectif du calcul est de déterminer la section de bambou nécessaire afin de résister à une compression de 66 kN. Pour cela, le calcul au flambement selon l'Eurocode 5 est implémenté dans le logiciel numérique *Grasshopper* (voir FIGURE 2.23).

Les paramètres utilisés :

- Longueur de flambement $L_f = l_b$,
- Excentricité initiale $\delta_0 = 50mm$: hypothèse de défaut de rectitude (voir FIGURE 2.22),
- Chargement de longue durée en extérieur : $k_{mod} = 1$
- $\beta_c = 0,2$: le bambou est plutôt considéré comme un bois massif plutôt que lamellé collé,
- Dispersion du matériau considérée comme pour le bois : $\gamma_M = 1,3$.

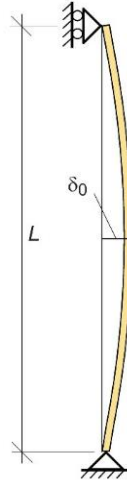


FIGURE 2.22 - Défaut de rectitude initial [22]

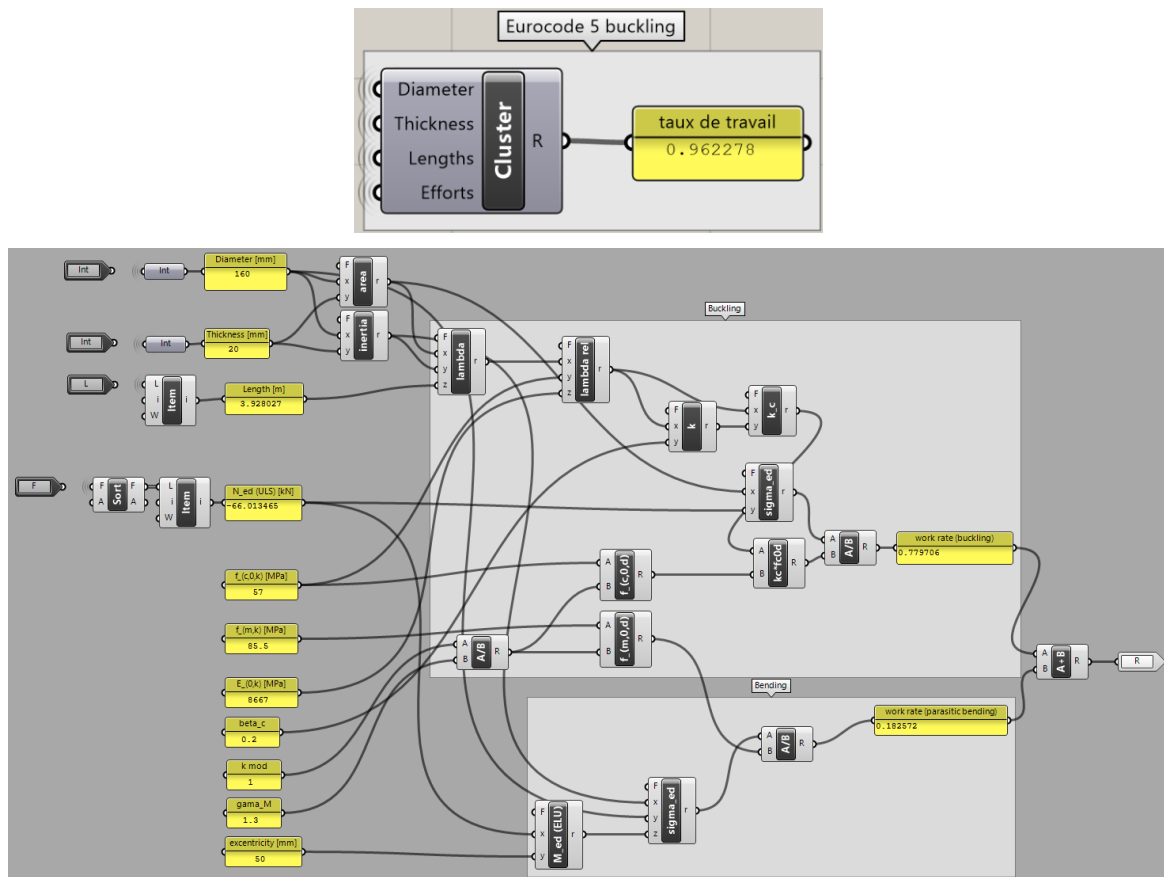


FIGURE 2.23 – Implémentation Eurocode 5 dans Grasshopper [illustration de l'auteur]

Après optimisation, les dimensions de la partie bambou d'un bouton sont :

	Valeur	Unité
Longueur	3503	mm
Diamètre	160	mm
Epaisseur	20	mm

Tableau 2.18 – Dimensions de la partie bambou d'un bouton

La sollicitation maximale admissible est égale à 68kN.

2.2.2.3 Embouts avec plaque d'appoint

L'objectif des embouts est de transmettre l'effort de compression du bambou à la tige filetée. Les embouts sont composés d'une plaque en acier S355 d'épaisseur 20mm soudée à un tube en acier s'enfilant dans l'extrémité creuse du bambou. Une plaque d'appoint d'épaisseur 5mm servant à encastrer la tige filetée dans le bambou est placée à l'intérieur du tube. L'embout est fixé au bambou à l'aide d'une colle à bois expansive, la plaque d'appoint est donc perdue dans le bambou. La plaque d'appoint est bloquée en utilisant le principe d'écrou contre-écrou, permettant de s'assurer qu'elle ne bougera pas et que la tige filetée sera toujours bien encastrée dans le bambou.

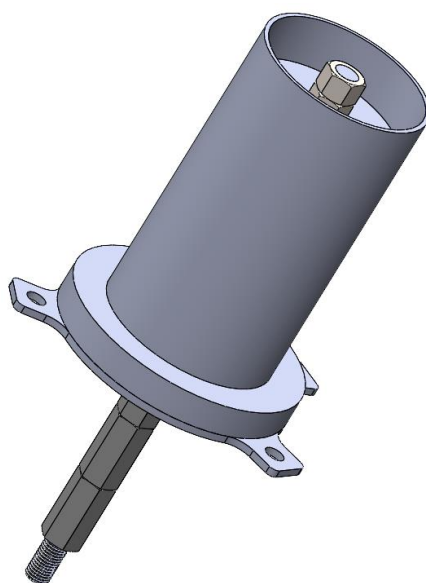


FIGURE 2.24 - Modèle numérique d'un embout [illustration de l'auteur]

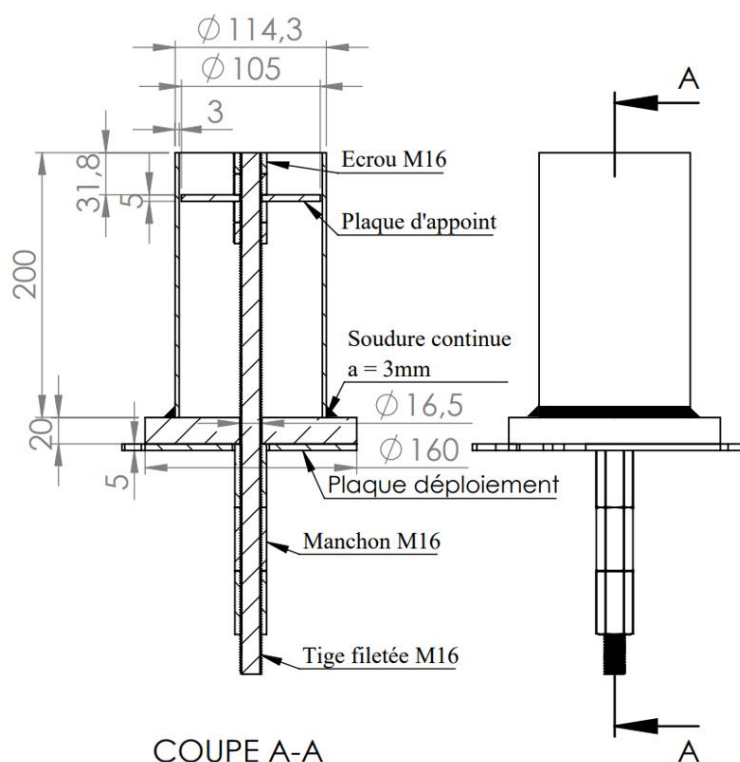


FIGURE 2.25 – Géométrie embout [illustration de l'auteur]

Le bambou venant buter sur l'extrémité de la plaque en acier, celle-ci fonctionne en flexion (voir FIGURE 2.26).

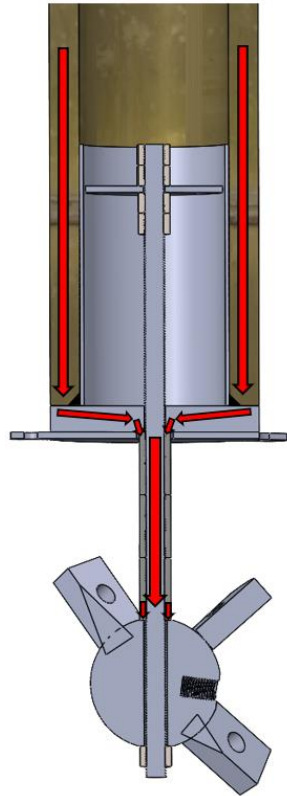


FIGURE 2.26 - Chemin de contrainte dans buton [illustration de l'auteur]

L'épaisseur de la plaque doit donc être assez importante pour résister aux sollicitations de flexion. Un modèle d'élément fini de la plaque est réalisé et l'épaisseur de 20mm est déterminée afin de respecter le critère Von Mises (voir FIGURE 2.27) sous un chargement de 66 kN (équivalent à 7503kPa de charge répartie sur la surface de contact). Cette pièce est réalisée par oxycoupage d'une tôle de 20 mm d'acier S355. Le résultat détaillé du modèle se trouve en ANNEXE A : NOTE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT.

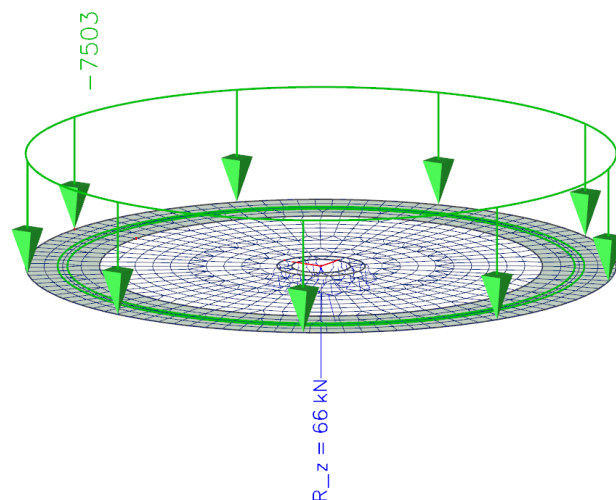


FIGURE 2.27 – Modélisation en éléments finis de la plaque d'épaisseur 20mm sous 66 kN [illustration de l'auteur]

2.2.2.4 Tige filetée

La tige filetée est une tige M16 d'une classe d'acier 8.8, choisie par souci d'encombrement à la surface du nœud (voir FIGURE 2.28). En effet, il est nécessaire d'utiliser une tige filetée M16 afin de pouvoir visser un manchon venant buter sur la boule. La tige filetée transfère l'effort de compression de l'embout du bambou jusqu'au nœud (voir FIGURE 2.26).

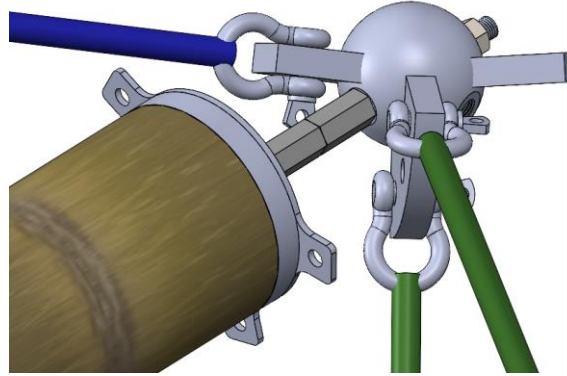


FIGURE 2.28 - Encombrement du nœud [illustration de l'auteur]

A cause d'une succession de jeux dans l'assemblage, il est possible que la force de compression soit légèrement excentrée (voir FIGURE 2.29) du centre de la tige filetée. Cette excentricité provoque du moment parasite qui peut plier la tige filetée jusqu'à une possible rupture. Afin de pallier ce problème, la tige filetée est renforcée par 3 manchons (voir Figure 2.30) en acier de classe 10 soudés les uns aux autres. Le calcul de la résistance de la tige sous charge excentrée est détaillé à en ANNEXE A : NOTE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT.

La longueur de tige filetée entre l'embout et la surface du nœud est donc de 144mm, cette longueur est nécessaire afin d'éloigner suffisamment le bambou du nœud et ainsi éviter le contact entre le bambou et les cordes voisines (voir FIGURE 2.28).

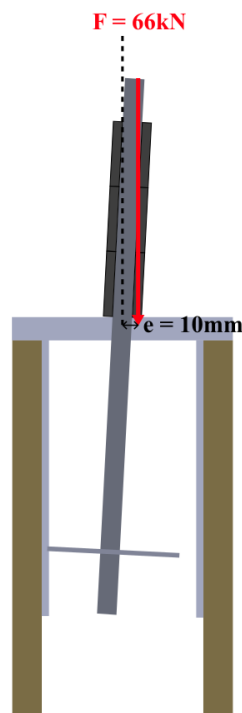


FIGURE 2.29 – Excentricité de la force de compression [illustration de l'auteur]

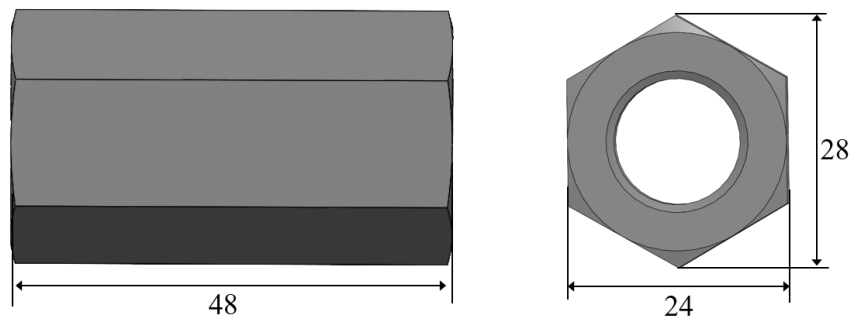


Figure 2.30 - Géométrie d'un manchon [illustration de l'auteur]

2.2.2.5 Plaque de déploiement

Pour le bon déploiement des modules de la structure, il est nécessaire d'utiliser des plaques de déploiement. En effet, comme le module est déployé sans nœud à l'une des deux bases (voir section Déploiement), une plaque de déploiement doit être utilisée pour y accrocher des câbles temporaires, 2 transversaux et 1 longitudinal (voir FIGURE 2.32). Cette plaque sert à assurer la bonne géométrie d'un module déployé. Le diamètre de l'alésage au centre de cette plaque étant de 28mm, elle est libre de pivoter autour de la tige et des manchons. Les alésages prévus pour l'accroche des cordes temporaires peuvent ainsi pivoter et bien se placer lors du déploiement. Cette plaque n'est plus sollicitée une fois le module assemblé à la structure car elle n'est pas dans le chemin de contrainte du bouton. Elle est réalisée par découpe laser d'une tôle d'acier S255 d'épaisseur 5mm.

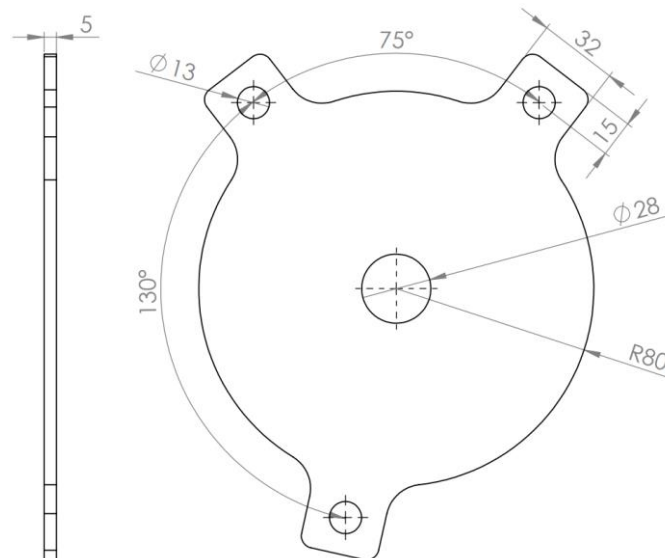


FIGURE 2.31 - Géométrie plaque de déploiement [illustration de l'auteur]



FIGURE 2.32 - Assemblage de 2 modules [illustration de l'auteur]

2.2.3 Les câbles

On appelle câbles les éléments capables de reprendre des efforts sous tension mais pas en compression. La structure à 5 modules est composée de 38 câbles visibles sur la FIGURE 2.33 :

- 18 cordes transversales nommées CT,
- 5 cordes longitudinales nommées CL,
- 5 cordes additionnelles nommées CA,
- 10 sangles à cliquet nommées SAC.

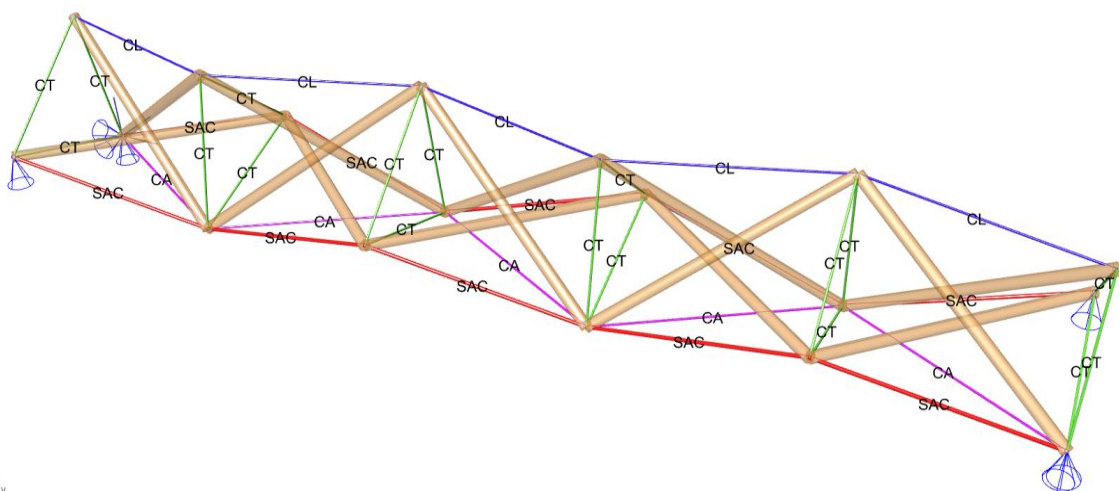


FIGURE 2.33 – Emplacement des éléments tendus dans la structure 5 modules [illustration de l'auteur]

Les différentes cordes ont une longueur bien définie et doivent être les plus précises possibles. Pour cela un protocole de réalisation de corde est établi, disponible en ANNEXE C : PROTOCOLE DE RÉALISATION DES CORDES. La jonction d'une corde au nœud est visible à la FIGURE 2.34. Le détail des longueurs des éléments câbles est visible au TABLEAU 2.19.

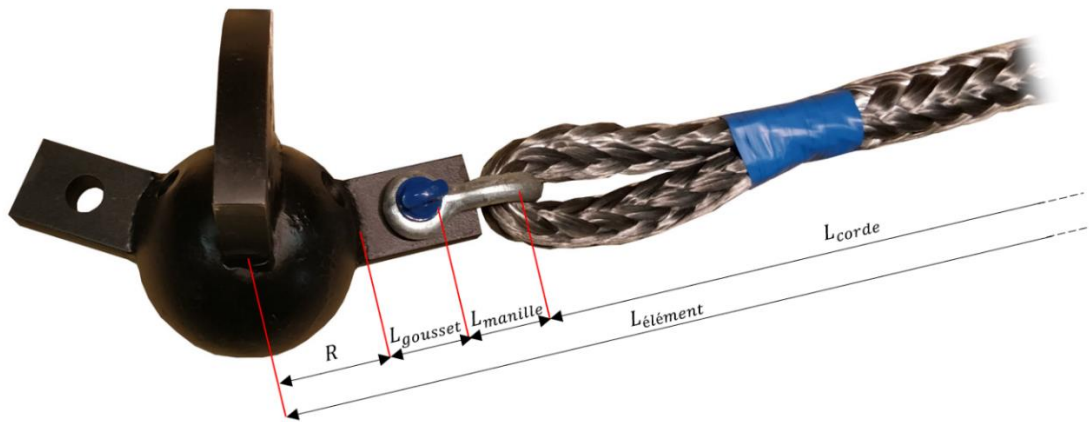


FIGURE 2.34 - Jonction d'une corde au nœud [illustration de l'auteur]

$$L_{corde} = L_{élément} - 2 * (R + L_{gousset} + L_{manille})$$

[mm]	Type de corde		
	Transversale	Longitudinale	Additionnelle
$L_{élément}$	2294	3074	3409
R	50	50	50
$L_{gousset}$	38.5	48.5	56.5
$L_{manille}$	48	48	36
L_{corde}	2021	2781	3124

TABLEAU 2.19 - Détail des longueurs composant l'élément

Dans cette section, les cordes et les sangles sont étudiées afin de déterminer leurs propriétés mécaniques. Ces éléments sont constitués de fibres en polyester et ont un comportement complexe [23], différent de celui des câbles en acier qui est généralement considéré comme linéaire élastique. L'application d'une force de traction sur un câble composé de fibres synthétiques engendre une déformation dissociée en deux composantes :

- Une composante viscoélastique : la déformation dépend de certains paramètres tels que la température, la vitesse de chargement, le sens d'application de ce dernier (chargement ou déchargement : phénomène d'hystérésis).
- Une composante viscoplastique : le déchargement de l'élément entraîne une diminution de la déformation, mais ne revient pas à un état de déformation nulle.

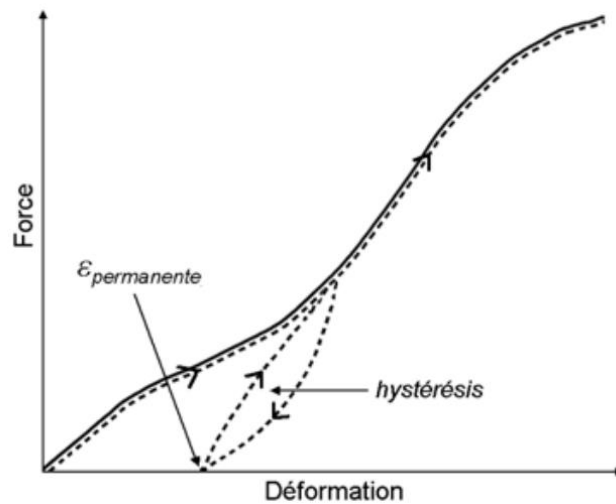


FIGURE 2.35 Allure de la relation force – déformation pour un câble synthétique. La courbe en traits forts illustre un essai de traction simple ; celle en pointillés illustre un essai à rupture précédé d'un cycle de charge – décharge. [23]

Dans le temps, un phénomène de relaxation apparaît. Pour une déformation maintenue constante appliquée à un câble, la contrainte résultante diminue progressivement. Un essai de relaxation est réalisé sur la structure, visible à la section 4.2.4.

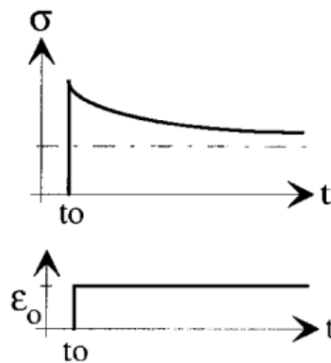


FIGURE 2.36 - Phénomène de relaxation [24]

L'objectif de cette section est de simplifier ce comportement afin de pouvoir utiliser un simple module de Young et une section lors de l'étude du comportement de la structure.

2.2.3.1 Cordes

La corde utilisée pour ces éléments est une corde marine à haute résistance, la Steelsafe SK78, réalisée par l'entreprise English Braids à partir de fibres Dyneema®. Ces fibres sont en polyéthylène et sont produites par l'entreprise néerlandaise DSM selon un procédé de filature de gel dans lequel les fibres sont étirées, chauffées, allongées et refroidies. L'étirement et le filetage conduisent à un alignement moléculaire et une faible densité. Ces fibres possèdent des chaînes moléculaires extrêmement longues qui transfèrent la charge efficacement au squelette polymère.



FIGURE 2.37-Corde Steelsafe SK78 [illustration de l'auteur]

Diamètre	20 mm
Masse linéique m_l	0,24 kg/m
Résistance à la rupture T_u	410 kN
Résistance aux UV	Très bonne

TABLEAU 2.20- Caractéristiques de la corde

La longueur de ces cordes a une grosse influence sur le comportement de la structure, c'est pourquoi la précision de cette longueur est très importante. Le système d'attache de ces cordes aux manilles est aussi étudié afin de connecter aux manilles tout en évitant au maximum l'allongement parasite de la corde.

2.2.3.1.1 Essais mécaniques de traction

Afin de déterminer le module de Young de la corde, un essai de traction est réalisé en laboratoire avec la machine servo-hydraulique universelle MTS 100kN sur une corde test C-Test1. Le test est composé de trois cycles de chargement entre $F_{min} = 0,5 \text{ kN}$ et $F_{max} = 80 \text{ kN}$. La valeur de F_{min} est déterminée afin d'avoir la corde légèrement en tension. Celle de F_{max} provient de la sollicitation maximale de ces cordes sur la passerelle chargée à l'ELU. Le vérin est contrôlé en déplacement avec une vitesse de 10 mm/minute et limité en force. Le pas de temps d'acquisition est de 0,1 seconde.

Les mesures prises lors de ce test sont :

- La force exercée par le vérin
- Le déplacement du vérin

L'essai est réalisé sur deux systèmes d'attache : l'attache par nœud de chaise et l'attache par épissure.

2.2.3.1.1.1 Attache par nœud de chaise

La première est le nœud de chaise qui est un nœud de boucle non coulant largement utilisé dans le domaine nautique ou en alpinisme (voir FIGURE 2.38).

L'attache par nœud de chaise réduit la résistance de 70% [25]. La corde résiste donc à 123 kN.

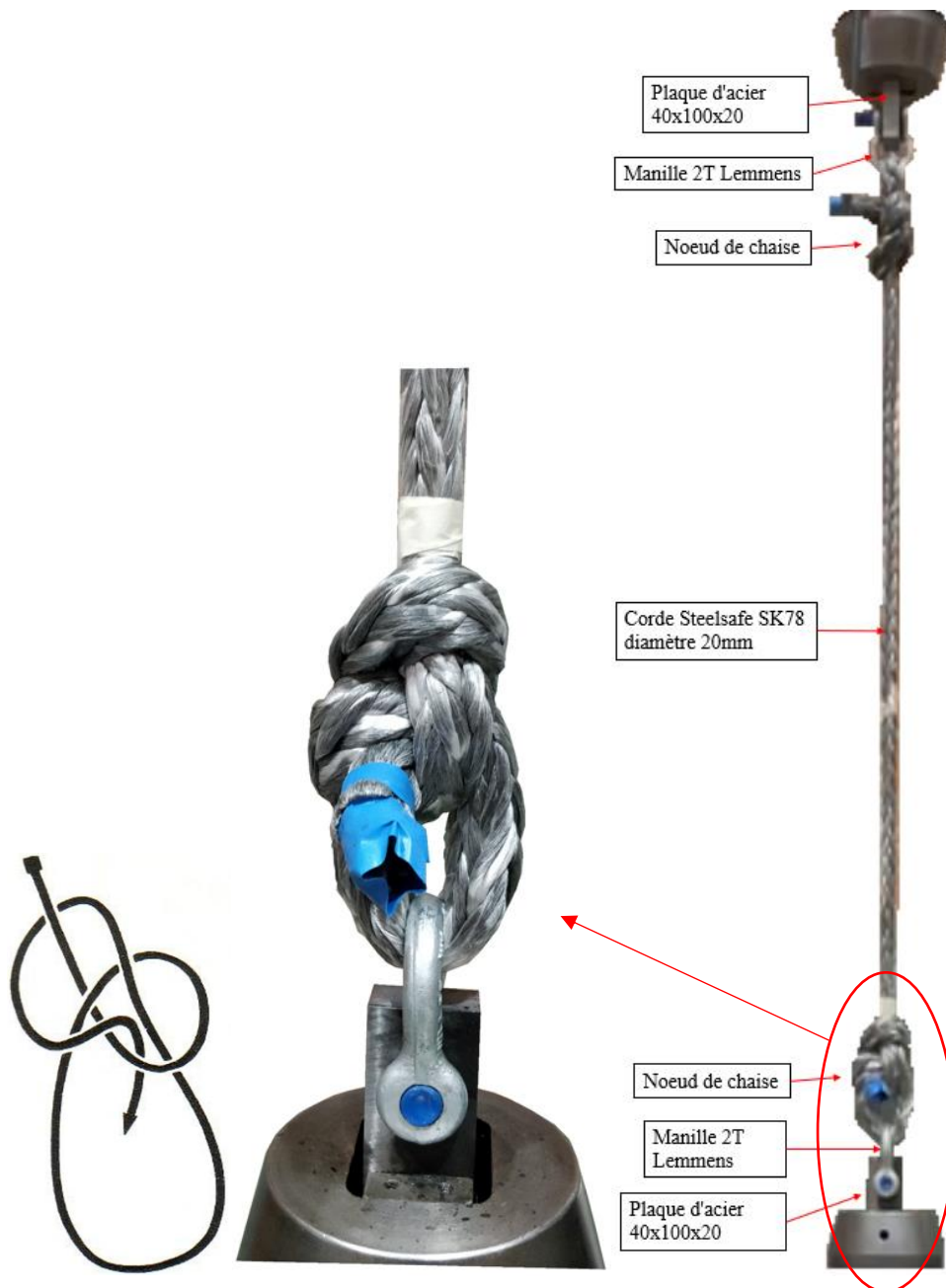


FIGURE 2.38 - Configuration de l'essai du nœud de chaise [illustration de l'auteur]

2.2.3.1.1.2 Attache par épissure

La seconde solution est l'épissure. Il s'agit de la réunion de deux bouts de cordes par entrelacement des torons (voir FIGURE 2.39). Dans le cas d'une attache, l'épissure désigne la fermeture de la corde sur elle-même. Pour cela, l'extrémité libre de la corde est introduite dans l'âme de la corde creuse (voir FIGURE 2.40). Le système d'attache par épissure repose sur le fait que la corde se resserre lorsqu'elle est sollicitée et que son diamètre diminue. En se resserrant, la corde comprime l'extrémité enfouie dans l'âme. Ainsi, la force de frottement F_f entre les fibres de la corde et les fibres de l'extrémité permet de reprendre la tension induite par la

manille. En mettant une certaine longueur d'épissure, la force de frottement empêche le glissement de l'extrémité hors de l'âme.

Un avantage de l'épissure est la faible perte de résistance de la corde : seulement 30% de perte de résistance [25]. La corde a donc une résistance de 287 kN.

La configuration de l'essai de l'épissure est détaillée à la FIGURE 2.41. Le protocole de réalisation d'épissure est détaillé en ANNEXE C : PROTOCOLE DE RÉALISATION DES CORDES.



FIGURE 2.39 – Épissure réalisée [illustration de l'auteur]

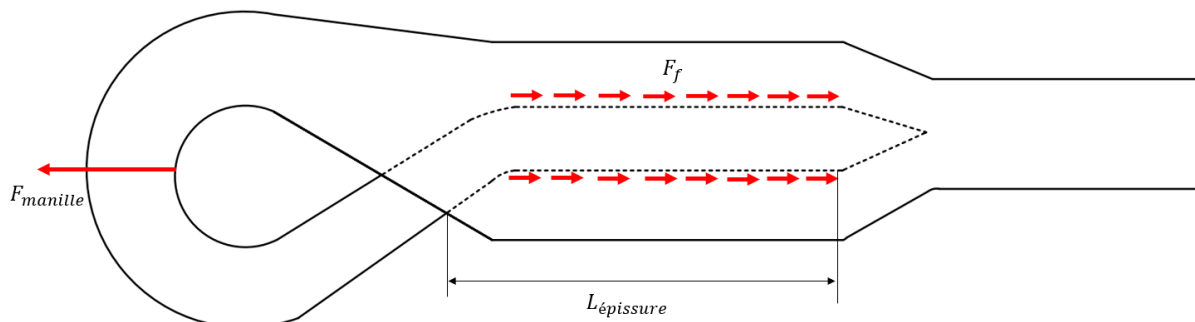


FIGURE 2.40 - Schéma de l'épissure [illustration de l'auteur]

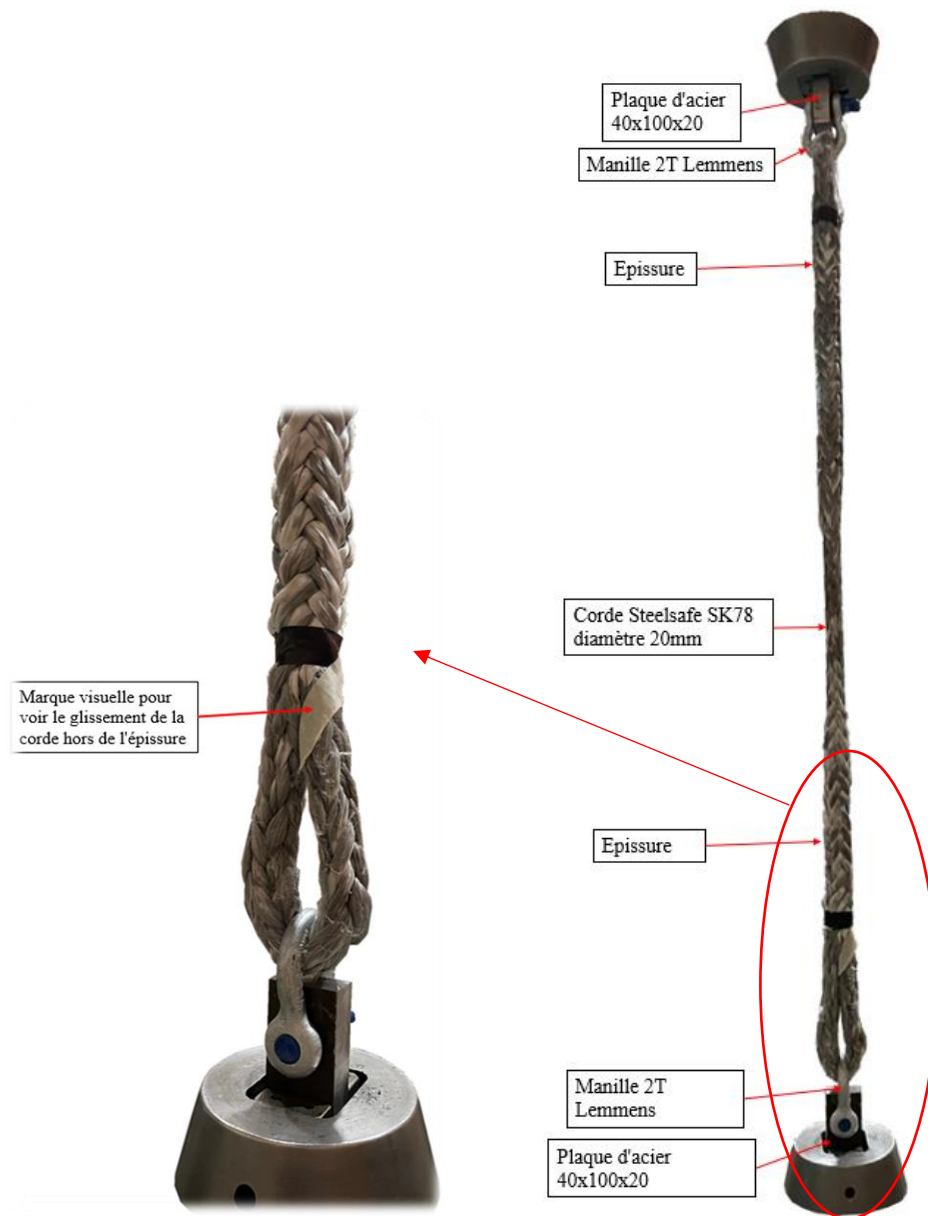


FIGURE 2.41 - Configuration de l'essai de l'épissure [illustration de l'auteur]

2.2.3.1.1.3 Machine Compliance

Afin d'étudier correctement le comportement de la corde lors de ces essais de traction, il est nécessaire d'ignorer le comportement des autres éléments du système. En effet, à chaque test en traction, l'ensemble du système se déforme. Lorsque le logiciel de test mesure le déplacement du vérin, ce déplacement est en réalité la somme des déformations des éléments du système. Afin de déterminer le déplacement dû uniquement à la déformation de la corde, le déplacement dû à la déformation des autres éléments doit être retiré. Il s'agit du principe de machine compliance.

Pour cela, un essai de traction préalable est réalisé afin de déterminer le déplacement du vérin en fonction de la charge appliquée. La configuration de l'essai est détaillée sur la figure ci-dessous (voir FIGURE 2.42).

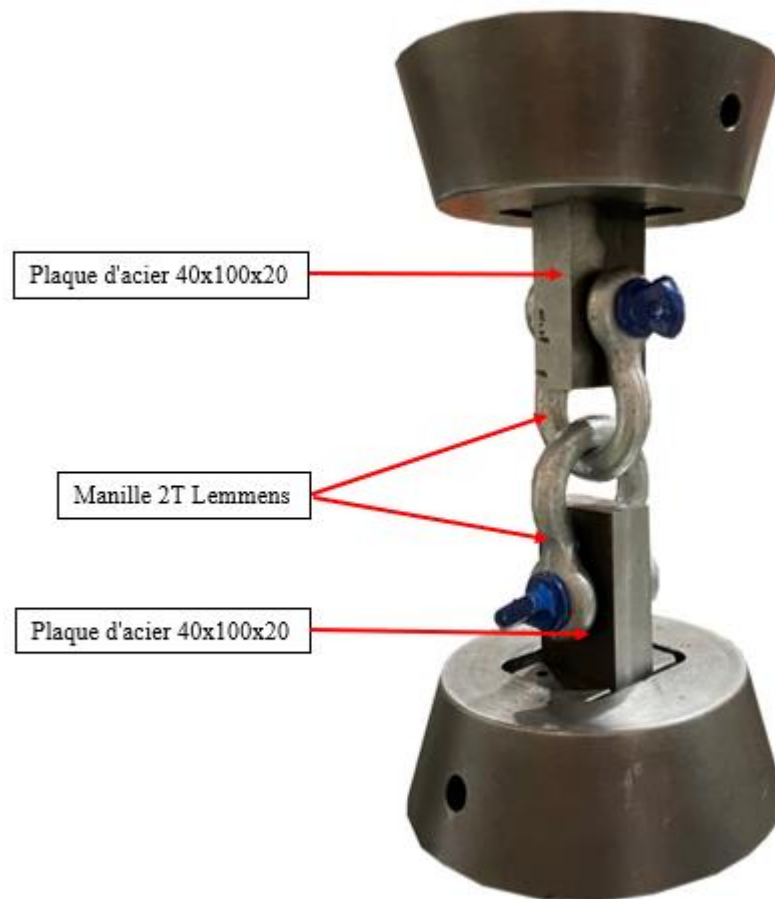


FIGURE 2.42 - Configuration de l'essai de traction de machine compliance [illustration de l'auteur]

2.2.3.1.2 Résultats des essais de traction

Les résultats présentés dans cette section prennent en compte les résultats de la machine compliance.

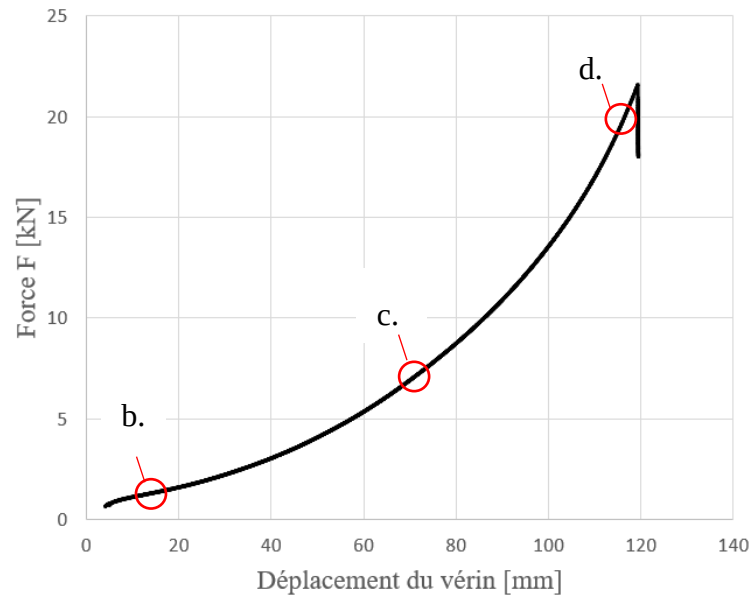
2.2.3.1.2.1 Résultats essai de traction avec nœud de chaise

L'essai est réalisé sur une corde C-Test1. Lors de cet essai, deux mesures sont prises :

- La longueur entre les points de contact manille/corde sous chargement de 0,5kN : L_i
- La longueur entre les débuts des nœuds sous chargement de 0,5kN : L_n

Remarque : par souci de sécurité, les mesures ne peuvent pas être prises lorsque la corde est sollicitée à $F_{max} = 80 \text{ kN}$.

Dans un premier temps, l'essai n'a pas pu aboutir en raison d'un resserrage des nœuds qui a grandement augmenté la longueur de la corde et donc atteint la course maximale du vérin. Cette première étape souligne l'inconvénient majeur des nœuds de chaise : **le resserrage des nœuds** (voir FIGURE 2.43). Cette première étape est appelée le préchargement.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 2.43 - Premier chargement sur nœuds de chaise : (a) force appliquée F en fonction du déplacement du vérin (b),(c),(d) Evolution des nœuds lors du chargement [illustration de l'auteur]

Dans un second temps, l'essai peut être réalisé. Le déplacement du vérin lors de cet essai est représenté sur la figure ci-dessous (voir FIGURE 2.44).

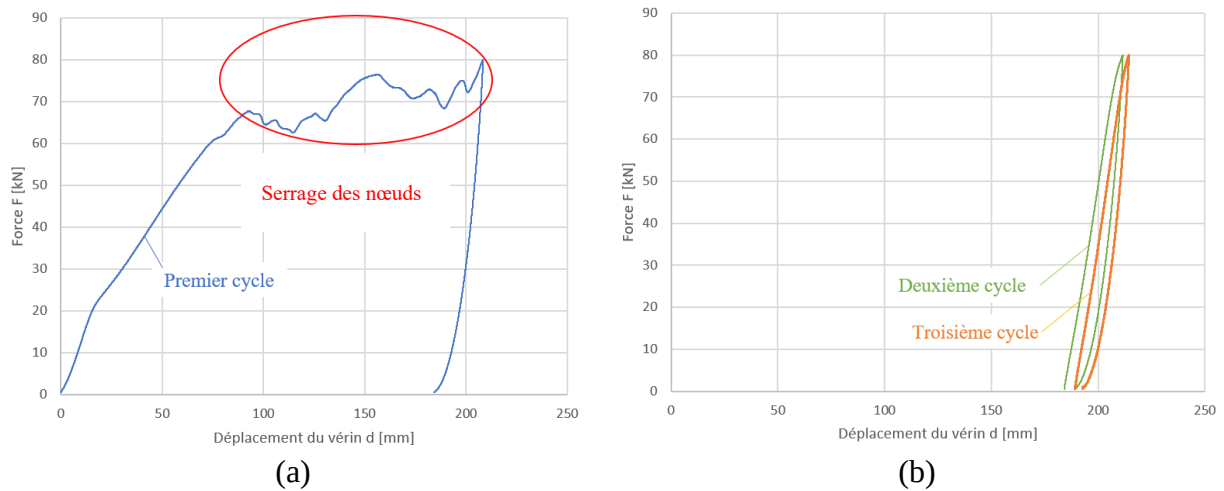
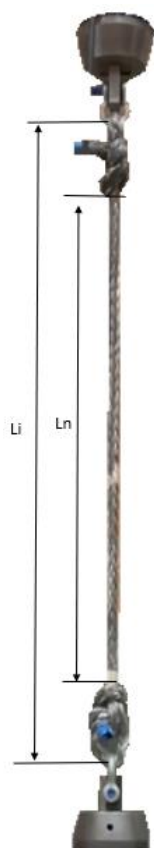


FIGURE 2.44 - Force exercée en fonction du déplacement du vérin : (a) premier cycle de chargement (b) deuxième et troisième cycle de chargement [illustration de l'auteur]

Constatations :

- La corde et les nœuds résistent à une sollicitation d'au moins 80 kN.
- Lors du premier cycle de chargement, la force exercée fluctue beaucoup par rapport au déplacement du vérin. Il s'agit du phénomène de serrage des nœuds, la corde glisse dans les nœuds. Ce système d'attache ne peut donc pas être retenu car il ne permet pas d'avoir une précision suffisante sur la longueur des cordes.
- Lors des cycles 2 et 3, la force exercée en fonction du déplacement du vérin est linéaire. La corde ne glisse plus dans les nœuds car ils ont déjà été serrés jusqu'à F_{max} .
- La corde peut être caractérisée en étudiant les cycles de chargement 2 et 3.

Les mesures de longueur de la corde permettent de quantifier l'allongement dû au serrage des nœuds (voir FIGURE 2.45). Entre le début du préchargement et la fin du troisième cycle de chargement, la corde s'est allongée de 290 mm, en grande partie dû au serrage des nœuds.



(a)

Symbole	Valeurs			Unité
	Début préchargement à 0,5 kN	Début premier cycle à 0,5 kN	Fin troisième cycle à 0,5 kN	
Li	1090	1190	1380	[mm]
Ln	830	940	1230	[mm]

(b)

FIGURE 2.45 – Essai avec nœud de chaise (a) schéma (b) mesures de la corde à différents moments de l'essai [illustration de l'auteur]

Le module de Young de la corde est déterminé en moyennant les modules trouvés lors des cycles 2 et 3 (voir FIGURE 2.46). Ces modules sont calculés par approximation linéaire entre deux limites de contrainte :

- La limite inférieure vaut 5% de la contrainte totale appliquée : 12 MPa
- La limite supérieure vaut 90% de la contrainte totale appliquée : 230 MPa

Le module de Young de la corde C-Test1 calculé est $E_c = 15,76 \text{ [GPa]}$. Cet essai permet d'écarter la solution d'attache des nœuds de chaise et de trouver le module de Young de la corde lorsque cette dernière est prétendue par une force $F=80 \text{ kN}$.

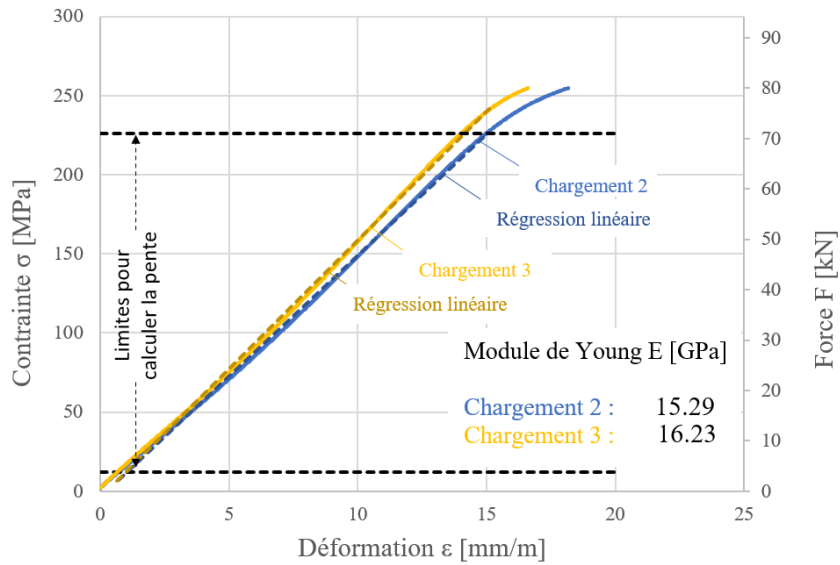
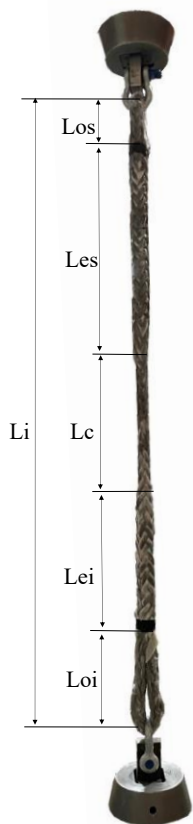


FIGURE 2.46 - Graphe de contrainte/déformation de la corde avec nœuds de chaise des cycles 2 et 3 [illustration de l'auteur]

2.2.3.1.2.2 Résultats essais de traction avec épissures

L'essai est réalisé sur une corde C-Test2. Lors de cet essai, les différentes parties de la corde ont été mesurées avant le premier cycle de chargement sous 0,5kN et à la fin du troisième cycle de chargement sous 0,5kN (voir FIGURE 2.47).



(a)

Longueurs	Symbole	Valeurs		Unité
		Début premier cycle à 0,5kN	Fin troisième cycle à 0,5kN	
œil supérieur	L_{os}	80	90	[mm]
épissure supérieure	L_{es}	330	350	[mm]
centrale	L_c	290	320	[mm]
épissure inférieure	L_{ei}	230	240	[mm]
œil inférieur	L_{oi}	155	170	[mm]
entre points de contact corde/manille	L_i	1085	1170	[mm]

(b)

FIGURE 2.47- Essai avec épissures (a) schéma (b) mesures de la corde [illustration de l'auteur]

Le déplacement du vérin lors de cet essai est représenté sur la figure ci-dessous (voir FIGURE 2.48).

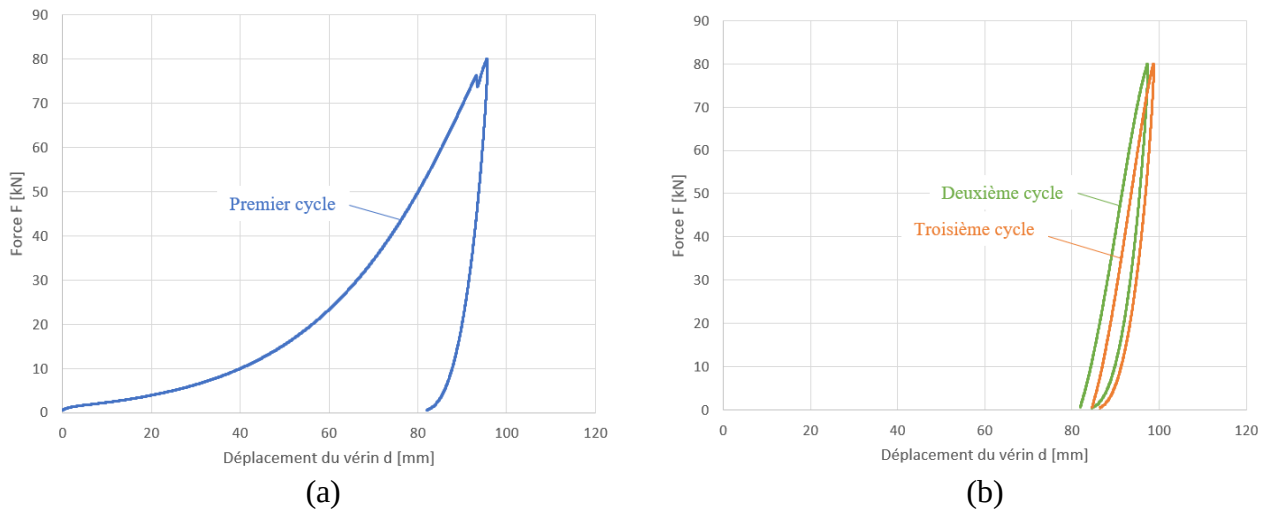


FIGURE 2.48 - Force exercée en fonction du déplacement du vérin (a) premier cycle de chargement (b) deuxième et troisième cycle de chargement [illustration de l'auteur]

Constatations :

- La corde et les épissures résistent à une sollicitation d'au moins 80 kN.
- Une épissure de 230 mm est suffisante pour reprendre une tension de 80 kN
- Le glissement de la corde dans les épissures est très faible. Il est mesuré à seulement 3mm à la fin du troisième cycle. Ce glissement s'est produit lors du premier cycle, quand la sollicitation de la corde était proche de F_{max} . La solution d'attache par épissure permet donc une meilleure précision sur la longueur des cordes.
- Le premier cycle de chargement est marqué par une grande déformation de la corde. Lors du premier chargement, les fibres de la corde se réarrangent. Il s'agit du phénomène viscoplastique. La corde n'est plus aussi lâche qu'avant tout chargement. Il faut donc tenir compte de cet allongement irréversible de la corde au premier chargement lors de la découpe des cordes afin d'avoir une longueur finale précise, après le premier chargement.
- Le comportement de la corde est différent entre le premier chargement et les deux suivants.
- Le comportement de la corde lors du deuxième et troisième cycle de chargement montre une certaine répétabilité, la corde est considérée comme élastique. Elle peut donc être caractérisée en étudiant ces deux cycles.

Seule la déformation totale de la corde est connue, pas les déformations locales. Dès lors, le module de Young de la corde peut être déterminé par régression linéaire de toutes les valeurs entre deux limites de contrainte en considérant une section de corde constante de diamètre 20mm :

- La limite inférieure vaut 5% de la contrainte totale appliquée : 12 MPa
- La limite supérieure vaut 90% de la contrainte totale appliquée : 230 MPa

Le module de Young de la corde est déterminé en moyennant les modules trouvés lors des cycles 2 et 3 (voir FIGURE 2.49).

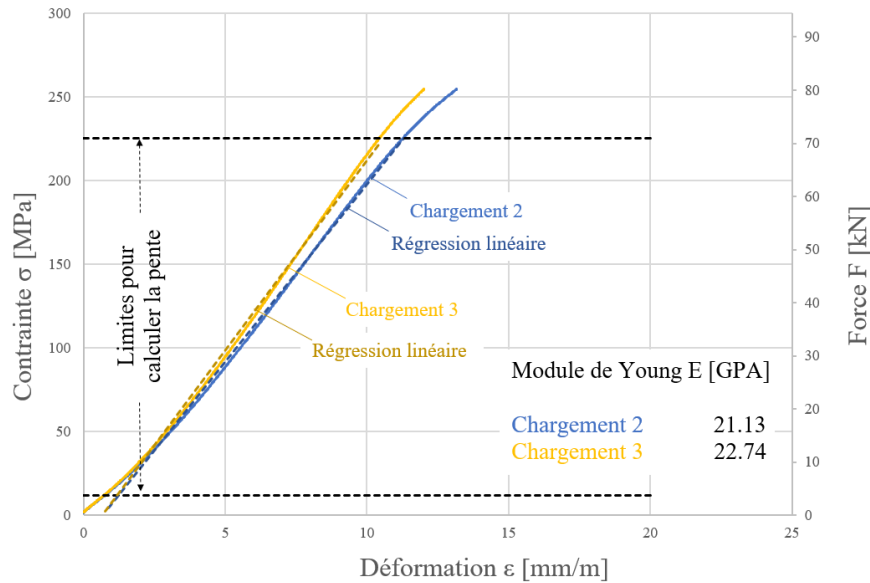


FIGURE 2.49 - Graphe de contrainte/déformation de la corde avec épissures des cycles 2 et 3 [illustration de l'auteur]

La rigidité de la corde avec épissures prétendue avec une force $F = 80$ [kN] est $E_{c, \text{épissures}} = 21,93$ [GPa]. Ce module de Young est plus élevé que celui calculé pour la corde avec nœuds de chaise. Cela s'explique par l'influence des épissures sur la rigidité de la corde. En effet, une épissure a une section 2 fois plus grande que la corde libre, ce qui rigidifie la corde aux droits des épissures. Il faut donc tenir compte des longueurs d'épissure afin d'obtenir le module de Young final de chaque corde.

Une manière de prendre en compte les épissures dans la recherche du module de Young par allongement serait de considérer les déformations de chaque partie de la corde.

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{os} + \varepsilon_{es} + \varepsilon_c + \varepsilon_{oi} + \varepsilon_{ei}$$

Avec ε_{tot} la déformation totale, ε_{os} la déformation de l'œil supérieure, ε_{es} la déformation de l'épissure supérieure, ε_c la déformation de la corde entre les épissures, ε_{oi} la déformation de l'œil inférieur et ε_{ei} la déformation de l'épissure inférieure.

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\Delta F}{2A} * \frac{1}{E_c} * \frac{L_{os} + L_{es}}{L_i} + \frac{\Delta F}{A} * \frac{1}{E_c} * \frac{L_c}{L_i} + \frac{\Delta F}{2A} * \frac{1}{E_c} * \frac{L_{oi} + L_{ei}}{L_i}$$

De cette équation, la valeur du module de Young de la corde peut être calculée. Les valeurs de longueurs sont celles après le 3^{ème} chargement à 0,5kN. Ces résultats pour les chargements 2 et 3 entre les limites de 5% et 90% du chargement total sont reprises dans le tableau ci-après :

$L_{os} + L_{es}$	440		[mm]
L_c	320		[mm]
$L_{oi} + L_{ei}$	410		[mm]
L_i	1170		[mm]
A	314,15		[mm ²]
ΔF	68		[kN]
	Chargement 2	Chargement 3	
ε_{tot}	10,44	9,71	[mm/m]
E_c	13,14	14,19	[GPa]

TABLEAU 2.21 - Résultats chargement 2 et 3

Le module de Young de la corde **prétendue par une force F=80kN** est donc de $E_c = 13,67$ [GPa]. Cet essai permet de choisir la solution d'attache par épissure. Ce module de Young de la corde à 1 brin (non-épissurée) est utilisé pour calculer les modules de Young équivalents de chaque type de corde (voir TABLEAU 2.22). Ces cordes sont simplifiées à des éléments de section constante de diamètre 20mm dont le module de Young est calculé par influence des épissures sur une partie de la longueur totale.

$$L_i * A * E_{eq} = (L_{os} + L_{es}) * 2A * E_c + L_c * A * E_c + (L_{oi} + L_{ei}) * A * E_c$$

	Corde			
	transversale	longitudinale	additionnelle	
$L_{os} + L_{es}$	430	430	430	[mm]
L_c	1161	1920	2264	[mm]
$L_{oi} + L_{ei}$	430	430	430	[mm]
L_i	2021	2780	3124	[mm]
E_c	13,67	13,67	13,67	[GPa]
E_{eq}	19,49	17,90	17,43	[GPa]

TABLEAU 2.22 – Modules de Young équivalents pour chaque type de corde prétendues à 80kN

2.2.3.1.3 Conclusion des essais sur la corde

L'attache des cordes aux manilles est réalisée par épissures, permettant de réaliser une longueur précise des cordes, une perte de résistance acceptable et un meilleur esthétisme.

La résistance des cordes est de 287 kN.

Lors des tests, la prétension de la corde, correspondant au premier chargement, est de 80 kN. En pratique, la prétension appliquée aux cordes lors de leur réalisation est de 10 kN, elles sont donc moins rigides que celle testée en laboratoire. Il est donc nécessaire de réaliser des tests sur une corde avec différents niveaux de prétension afin de mieux étudier le comportement des cordes sur la structure.

Pour l'étude de la structure, l'hypothèse du module de Young des cordes avec épissures prétendues par une force 10 kN est : $E_{corde} = 9$ [GPa]. Cette valeur est déterminée en réalisant des essais de tension d'une corde utilisée sur la structure via une sangle à cliquet et un capteur de force.

2.2.3.2 Sangles à cliquet

Les sangles à cliquet (SAC) sont à l'emplacement de deux câbles longitudinaux par module (voir FIGURE 2.33). Elles permettent la mise en prétension de la structure. Les sangles résistent à une sollicitation de 100 kN. La section mesurée est $A_{sangle} = 262mm^2$ (section rectangulaire : largeur = 75mm, épaisseur = 3,5mm).

2.2.3.2.1 Essai de traction sur Sangle à cliquet

Le module de Young de la sangle est déterminé par essai de chargement d'une sangle test sur la machine MTS 100 kN au laboratoire LEMSC. Le test est composé d'un chargement entre $F_{min} = 0,5 kN$ et $F_{max} = 80 kN$. La valeur de F_{min} est déterminée afin d'avoir la sangle légèrement en tension. Celle de F_{max} provient de la sollicitation maximale des sangles sur la passerelle chargée à l'ELU. Le vérin est contrôlé en déplacement avec une vitesse de 10 mm/minute et limité en force. Le pas de temps d'acquisition est de 0,1 seconde.

Les mesures prises lors de ce test sont :

- La force exercée par le vérin,
- Le déplacement du vérin.

Le dispositif de l'essai est détaillé à la FIGURE 2.50. Comme pour la caractérisation des cordes, le principe de compliance machine est utilisé. Cependant, l'ajout de manille 3,25T de chez Lemmens est nécessaire pour l'accroche des crochets de la sangle à cliquet.

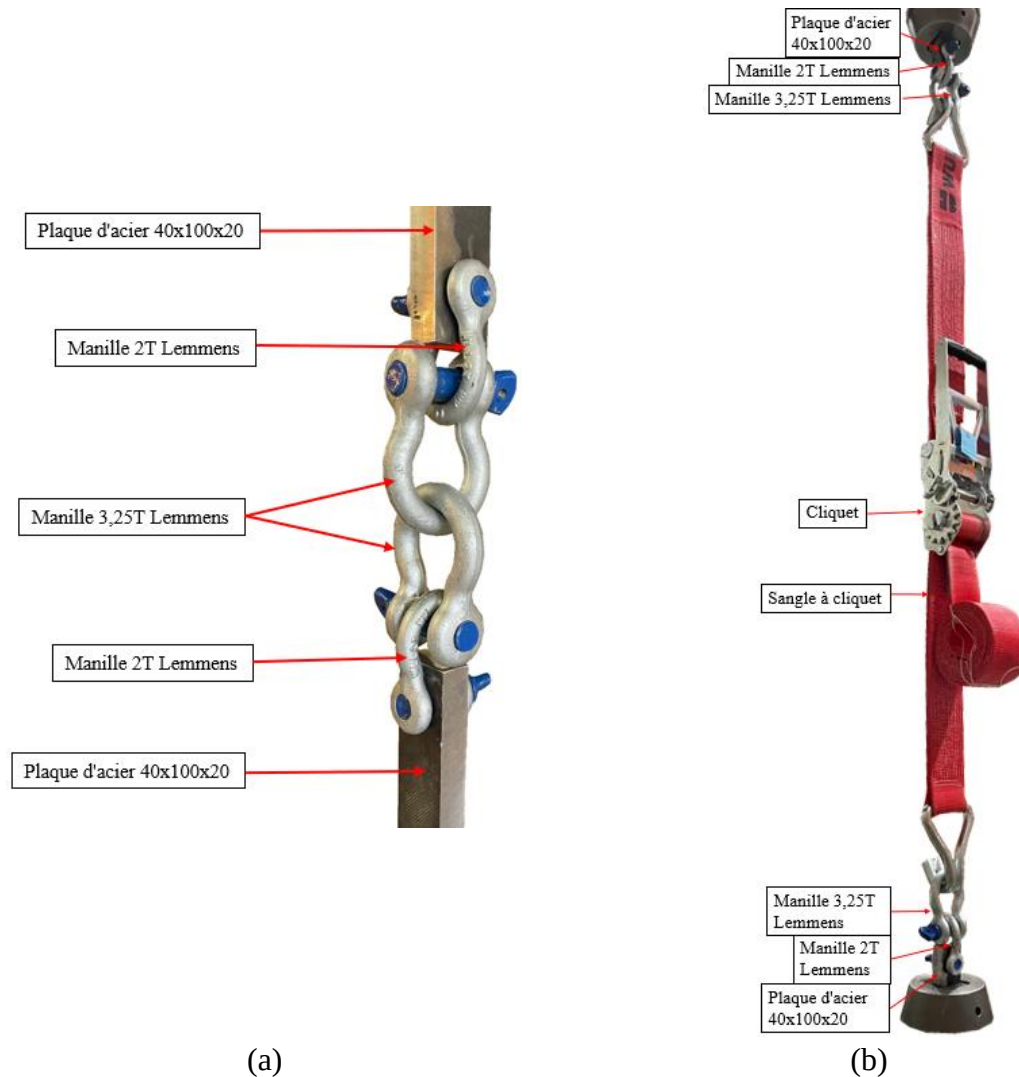
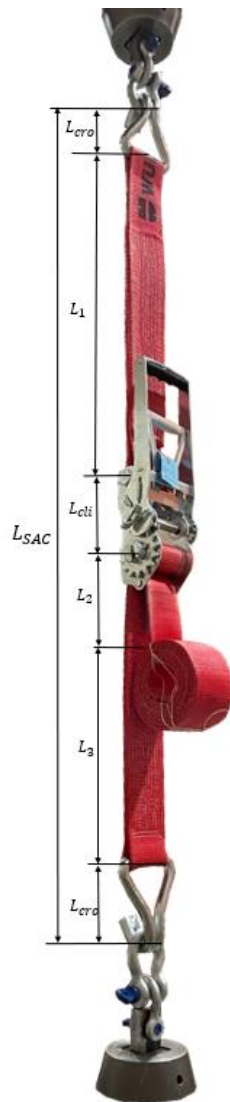


FIGURE 2.50 – Dispositif de l'essai sur sangle à cliquet (a) Machine compliance (b) Essai sur SAC

Le détail des longueurs de la sangle à cliquet est visible à la FIGURE 2.51. La longueur totale de la sangle testée est 1,54 mètres.



(a)

Elément	Symbole	Longueur	Unité
Sangle à cliquet	L_{SAC}	1,54	[m]
Crochet	L_{cro}	0,11	[m]
Partie 1	L_1	0,55	[m]
Cliquet	L_{cli}	0,13	[m]
Partie 2	L_2	0,20	[m]
Partie 3	L_3	0,44	[m]

(b)

FIGURE 2.51 – Essai sur la sangle (a) Photo (b) Mesures sous $F=0,5 \text{ kN}$

2.2.3.2.2 Résultats essai de traction sur sangle à cliquet

Le module de Young est déterminé par régression linéaire de toutes les valeurs entre deux limites de contrainte en considérant une section de 262 mm^2 .

- La limite inférieure vaut 5% de la contrainte totale appliquée : 15 MPa
- La limite supérieure vaut 90% de la contrainte totale appliquée : 274 MPa

Le module de Young est de $E_{sangle} = 3,77 \text{ [GPa]}$ (voir FIGURE 2.52).

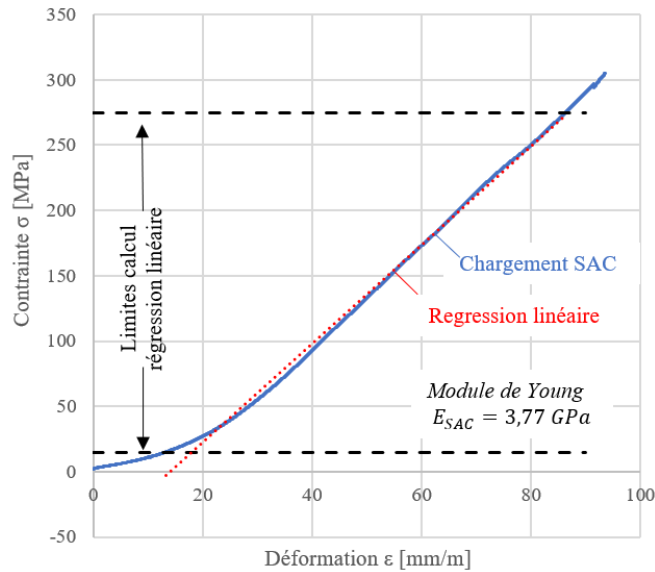


FIGURE 2.52 - Graphe de contrainte/déformation de la sangle à cliquet [illustration de l'auteur]

2.2.3.2.3 Conclusion de l'essai sur la sangle à cliquet

Le module de Young de la sangle à cliquet obtenu lors du test de traction en laboratoire est de **$E_{sangle} = 3,77 \text{ [GPa]}$** . Cependant, cette valeur ne correspond pas exactement au module de Young des sangles utilisées sur la structure. En effet, la SAC testée a une longueur totale $L_{SAC}=1,62\text{m}$ tandis que les SAC utilisées sur la structure ont une longueur totale de $2,78\text{m}$. La différence de longueur entre les deux est une augmentation de L_2 , partie composée de la sangle à simple épaisseur et donc, moins rigide. Le module de Young de la SAC sur la structure est donc supposé plus faible que celui déterminé lors du test en laboratoire. Faute d'information supplémentaire, le module de Young considéré pour les SAC lors de l'étude du comportement de la structure est de **$E_{sangle} = 3,77 \text{ [GPa]}$** . De plus, il serait intéressant d'effectuer un essai composé de plusieurs cycles de chargement afin de mieux caractériser l'effet viscoplastique de la sangle.

Cette faible valeur a un impact sur l'efficacité de la structure. En effet, les sangles placées aux câbles longitudinaux inférieures se déforment facilement, donc la corde placée au câble longitudinal supérieur se détend plus rapidement.

Leur cliquet permet de tendre ces sangles d'une force de 5kN . En utilisant un bras de levier en acier (voir FIGURE 2.53) supplémentaire, il est possible de les tendre avec une force de 15 kN . Cette force de prétension est beaucoup plus faible que prévu dans les objectifs de la structure, cela a donc un impact direct sur les performances de la structure.



FIGURE 2.53 - Bras de levier pour sangle à cliquet [illustration de l'auteur]

La force de mise en prétension par raccourcissement de 1mm de sangle est :

$$\Delta F = \frac{\Delta L * E * A}{L} = \frac{1 * 3,77 * 262}{3074} = 0,32 \text{ kN}$$

Ce système de mise en prétension, bien que pratique, n'est pas assez efficace. Il est donc nécessaire d'améliorer ce point à l'avenir.

2.3 Poids de la structure

Dans cette section, le poids des éléments de la structure est détaillé. Le poids total est détaillé au TABLEAU 2.23 pour 1, 2 et 5 modules, correspondant aux structures testées (voir chapitres tests). Le poids propre de chaque structure peut ainsi être introduit dans le logiciel numérique.

Eléments	Poids [kg]	1 module		2 modules		5 modules	
		Nombre	Total [kg]	Nombre	Total [kg]	Nombre	Total [kg]
Nœuds :							
BT4, BT5, BT7, BT9	5,7	4	22,8	6	34,2	8	45,6
BT6, BT8	5,6	2	11,2	3	16,8	4	22,4
BT1, BT2, BT3	5,4	0	0	0	0	6	32,4
Corde transversale	0,71	6	4,26	9	6,39	18	12,78
Corde longitudinale	0,88	1	0,88	2	1,76	5	4,4
Corde additionnelle	0,96	1	0,96	2	1,92	5	4,8
Sangle à cliquet	6,5	2	13	4	26	10	65
Manille additionnelle	0,14	2	0,28	4	0,56	10	1,4
Manille normale	0,3	18	5,4	30	9	66	19,8
Manille sangle	0,6	4	2,4	8	4,8	20	12
Maillon	0,23	4	0,92	8	1,84	20	4,6
Bambous :							
Bamb1	12,94	1	12,94	1	12,94	1	12,94
Bamb2	14	1	14	1	14	1	14
Bamb3	13,3	1	13,3	1	13,3	1	13,3
Bamb4	10,09	0	0	1	10,09	1	10,09
Bamb5	11,19	0	0	1	11,19	1	11,19
Bamb6	12,52	0	0	1	12,52	1	12,52
Moyenne bambous	12,34	0	0	0	0	9	111,06
Embout	4,77	6	28,62	12	57,24	30	143,1
Plaque appoint	0,33	6	1,98	12	3,96	30	9,9
Tige filetée petite	0,53	3	1,59	6	3,18	15	7,95
Tige filetée grande	0,65	3	1,95	6	3,9	15	9,75
Manchon	0,12	18	2,16	36	4,32	90	10,8
Plaque déploiement	0,87	6	5,22	12	10,44	30	26,1
		143,86		260,35		617,88	

TABLEAU 2.23 - Poids des éléments de la structure

Le poids total de la structure 5 modules est de **617,88kg**. La répartition des poids est :

- Les nœuds pèsent au total **100,4 kg**, soit 16,2% du poids total de la structure,
- Les cordes pèsent au total **21,98 kg**, soit 3,6% du poids total de la structure,
- Les sangles à cliquet pèsent au total **65 kg**, soit 10,5% du poids total de la structure,
- Les manilles pèsent au total **37,8 kg**, soit 6,1% du poids total de la structure,
- Les bambous pèsent au total **185,1 kg**, soit 29,9% du poids total de la structure,
- Les connections entre le bambou et les nœuds (embouts + plaques d'appoint + tiges filetées + manchons) pèsent **181,5 kg**, soit 29,3% du poids total de la structure,
- Les plaques de déploiement pèsent au total **26,1 kg**, soit 4,2% du poids total de la structure.

2.4 Appuis

Afin de supporter la structure, il est nécessaire de réaliser de bons appuis. Les objectifs de ces derniers sont :

- Surélever la structure telle que les nœuds les plus bas soient à au moins 0,8m du sol permettant le chargement de la structure.
- Avoir la structure bien orientée, c'est-à-dire respecter la hauteur des nœuds sur appuis afin de correspondre au modèle numérique.
- Eviter tout basculement de l'appui.
- Pouvoir bloquer les nœuds selon certaines directions.

Il y a 2 types d'appuis : les appuis hauts et les appuis bas. Afin d'avoir la bonne orientation des bases de la structure, la différence de hauteur entre les deux types d'appuis doit être de 0,78m. Afin de respecter l'objectif d'hauteur minimale des nœuds, les hauteurs des appuis doivent donc être de 0,76m pour les appuis bas et 1,54m pour les appuis hauts.

Les appuis sont composés de 4 éléments :

- 1 tronc d'arbre (d'essence tsuga) définissant la hauteur de l'appui de diamètre 0,28m,
- 2 chevrons permettant d'éviter le basculement de l'appui,
- 1 plaque d'acier de 5mm d'épaisseur afin d'éviter l'enfoncement du nœud dans le bois,
- Des équerres en acier pour bloquer certaines directions.

La structure se déformant lorsqu'elle est sollicitée, le nœud frotte sur la plaque d'acier au sommet de l'appui. Cela induit une force horizontale qui crée un moment déstabilisant. Afin d'éviter le basculement de l'appui lors de la déformation de la structure, il est nécessaire d'ajouter des chevrons au pied de l'appui permettant de modifier le point de basculement de l'appui. Ainsi, en changeant la position de ce point, le moment stabilisant créé par le poids de l'appui G et le poids de la structure appliqué à l'appui N augmente considérablement. Les calculs sont disponibles en ANNEXE A : NOTE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT.

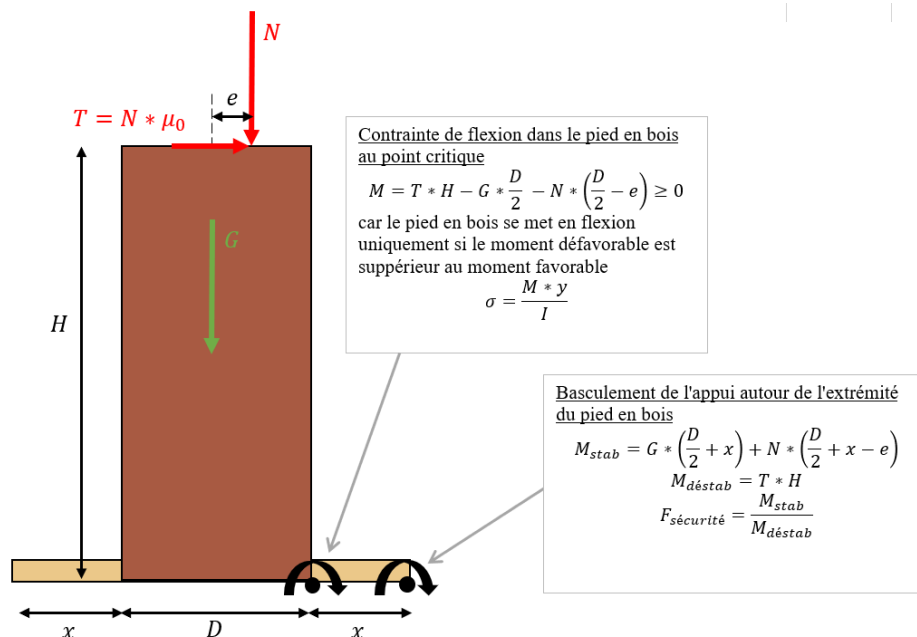


FIGURE 2.54 - Schéma moments stabilisant et déstabilisant [illustration de l'auteur]

Les chevrons sont assemblés (voir FIGURE 2.55) et vissés à la buche (voir FIGURE 2.56) et fonctionnent en flexion. Ils ont une section carrée de 45mm de côté. Le dépassement du chevron hors de la section de la buche est de 0,2m.

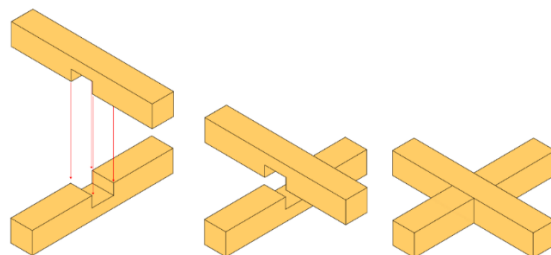


FIGURE 2.55 – Schéma assemblage chevrons [illustration de l’auteur]

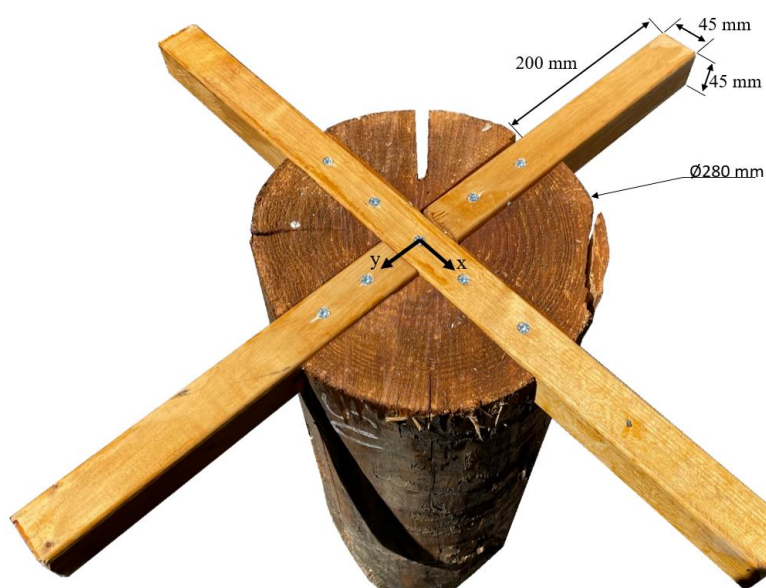


FIGURE 2.56 - Disposition des chevrons au pied de l'appui [illustration de l’auteur]

Afin d’éviter l’enfoncement de la boule dans le bois, une plaque d’acier de 5mm d’épaisseur et de diamètre 300mm est placée en tête d’appui. Ces plaques sont percées (voir FIGURE 2.57) afin de pouvoir y visser des équerres en acier permettant de bloquer les nœuds selon certaines directions.

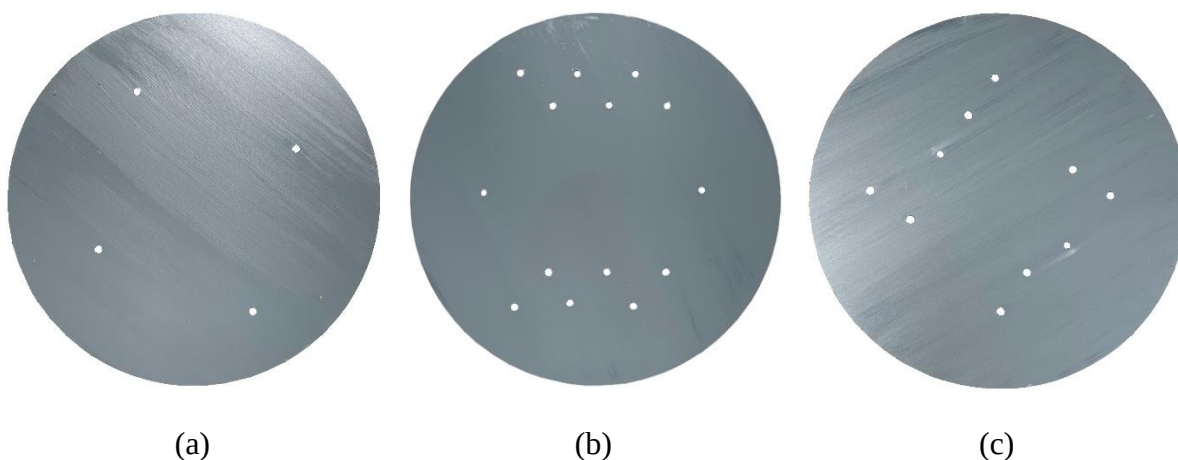


FIGURE 2.57 - Plaques percées : (a) pour simplement la visser (b) pour bloquer la direction y (c) pour bloquer les directions x et y [illustration de l’auteur]

Les équerres, préparées pour épouser parfaitement les nœuds, peuvent ainsi être placées. Les résultats des nœuds posés sur appuis sont visibles à la FIGURE 2.58.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 2.58 – Nœuds posés sur appuis : (a) simplement posé (b) bloqué en y (c) bloqué en x et y
[illustration de l'auteur]

2.5 Déploiement

Cette section a pour objectif de résumer le protocole de déploiement de la structure disponible en ANNEXE B : PROTOCOLE DE DÉPLOIEMENT.

La stratégie de déploiement de la structure est la suivante :

- Déployer le premier module (c'est-à-dire la mise à sa bonne forme géométrique sans prétension),
- Mettre de la prétension initiale dans le premier module via les sangles à cliquet afin de permettre à la structure de tenir sous poids propre lors de sa pose sur appuis,
- Déployer le second module,
- Assembler le second au premier module,
- Mettre la prétension initiale dans le second module,
- Déployer le troisième module,
- Assembler le troisième au second module,
- Mettre la prétension initiale dans le troisième module,
- Déployer le quatrième module,
- Assembler le quatrième au troisième module,
- Mettre la prétension initiale dans le quatrième module,
- Déployer le cinquième module,
- Mettre la prétension initiale dans le cinquième module,
- Une fois tous les modules assemblés, la structure est déplacée à l'endroit souhaité où 4 appuis seront installés à l'avance,
- Mise en prétension finale de la structure, module par module.

La rotation relative entre les bases de la structure est alternée, c'est-à-dire la rotation entre les bases est alternativement de $+39^\circ$ et -39° . Cela implique qu'il doit y avoir deux types de modules (voir FIGURE 2.59 et FIGURE 2.60), sensiblement identiques mais déployés "en miroir".

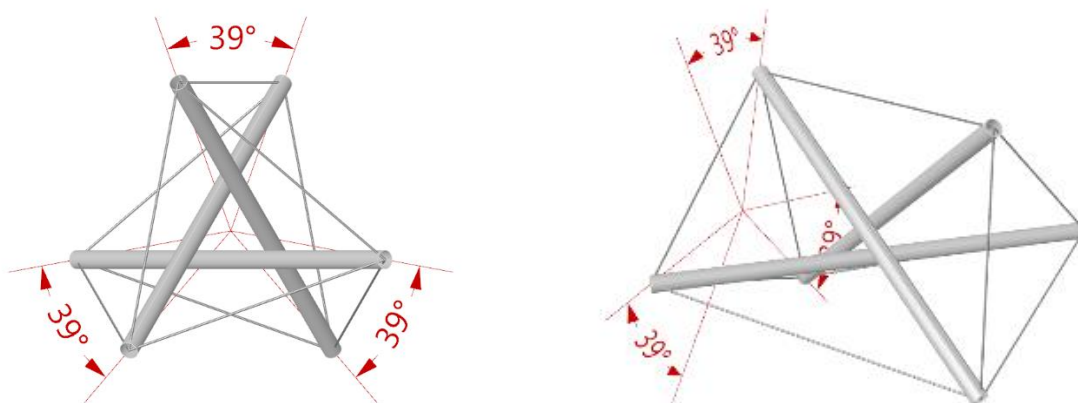


FIGURE 2.59 – Module Orientation 1 [illustration de l'auteur]

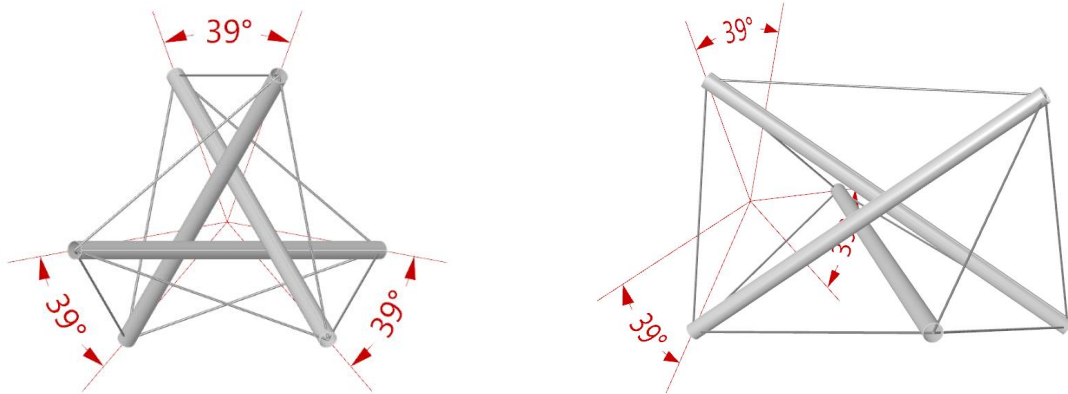


FIGURE 2.60 – Module Orientation 2 [illustration de l'auteur]

L'assemblage de deux modules (voir FIGURE 2.61) se fait en enfilant les tiges filetées, dépassant des 3 boutons du nouveau module déployé, dans les alésages prévus à cet effet des nœuds du dernier module de la structure.

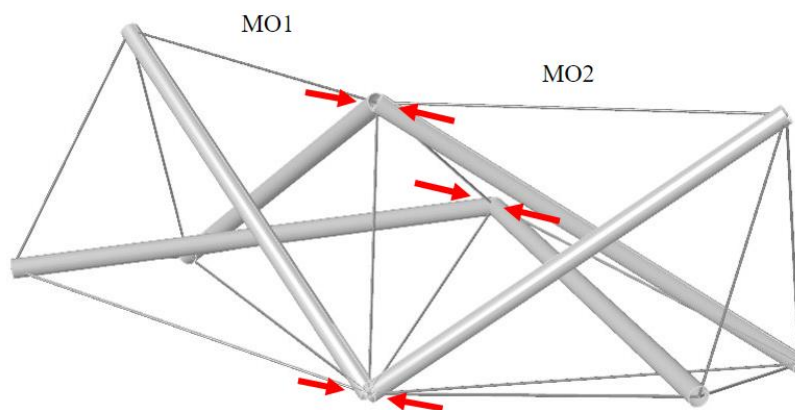


FIGURE 2.61 - Schéma assemblage de 2 modules [illustration de l'auteur]

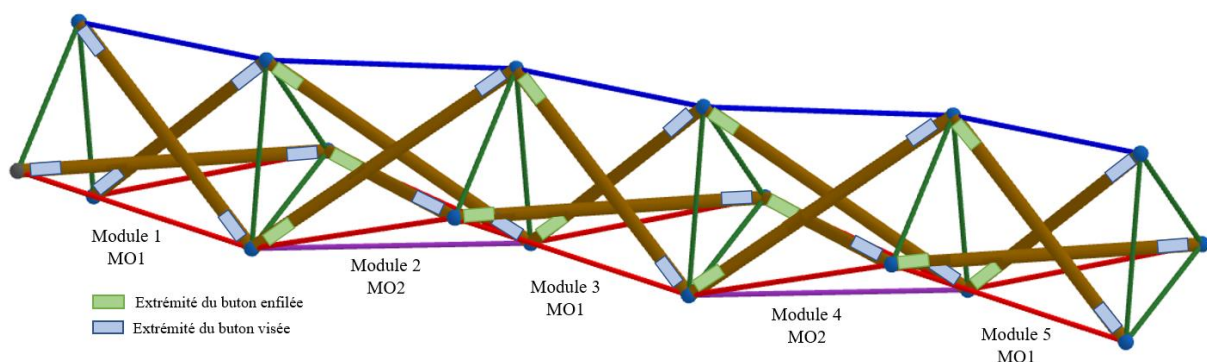


FIGURE 2.62 – Emplacement des extrémités de bouton pour déploiement [illustration de l'auteur]

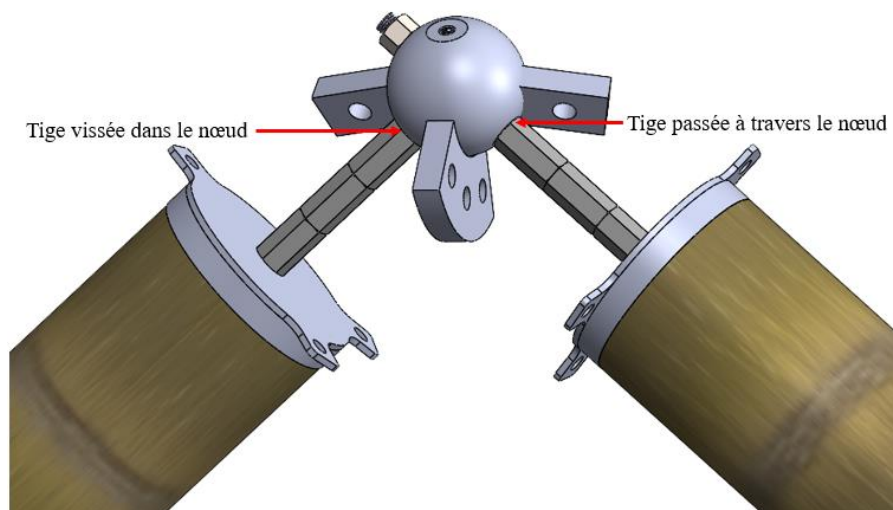


FIGURE 2.63 – Connexion boutons dans nœud [illustration de l'auteur]

La **plaque de déploiement** composant les embouts aux extrémités des boutons est un point central du déploiement de la structure. Elle permet d'attacher les cordes temporaires aux extrémités du bouton qui n'est pas encore connecté à un nœud. Elle est mobile, placée autour des manchons de la tige filetée.

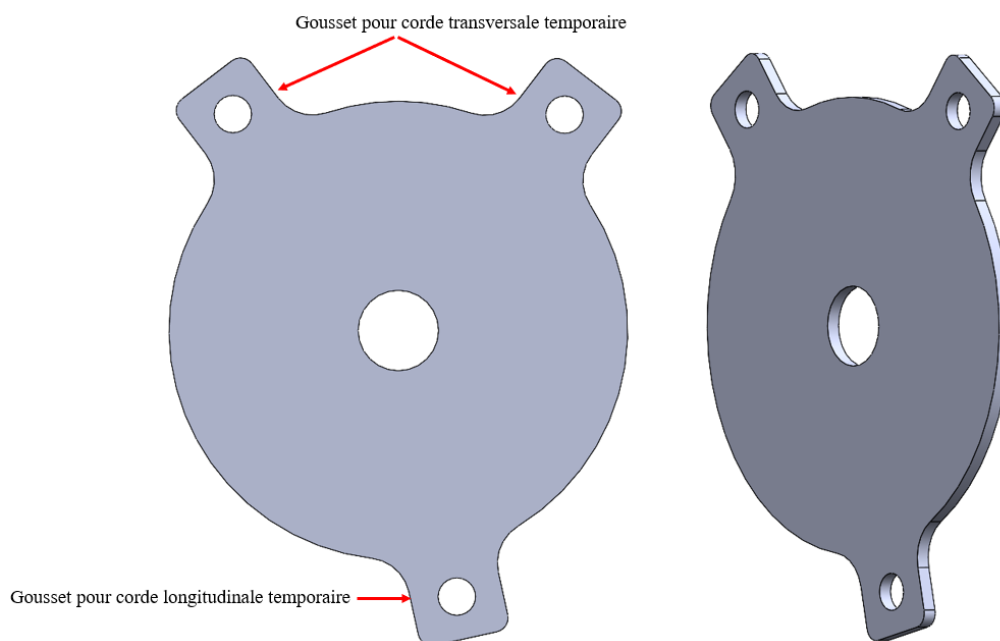


FIGURE 2.64 - Plaque de déploiement [illustration de l'auteur]

2.5.1 Description générale des composants de la structure

La structure est composée de plusieurs types d'éléments :

- 18 nœuds composés de 9 types (voir FIGURE 2.65) : BT1, BT2, BT3, BT4, BT5, BT6, BT7, BT8 et BT9

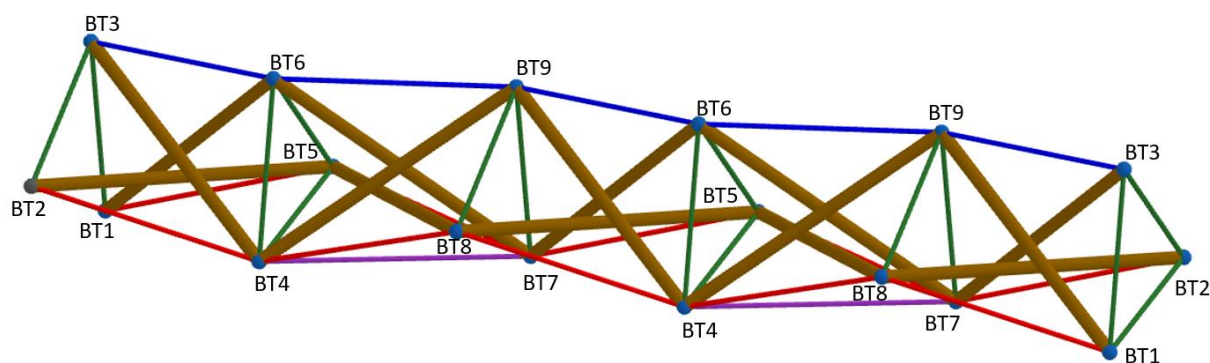


FIGURE 2.65 - Emplacement des différents types de nœud [illustration de l'auteur]

Chaque module est composé des éléments suivants (voir FIGURE 2.66) :

- 3 boutons, notés BAMB1, BAMB2 et BAMB3,
- 3 cordes transversales, notées CT1, CT2, CT3,
- 1 corde longitudinale, notée CL,
- 1 corde additionnelle, notée CA,
- 2 sangles à cliquet, notées SAC1 et SAC2.

Les éléments ne servant qu'au déploiement à attacher aux plaques de déploiement sont :

- 3 cordes transversales temporaires, notées CTT1, CTT2 et CTT3,
- 2 cordes longitudinales temporaires, notées CLT1 et CLT2,
- 1 système de poulie (voir FIGURE 2.67), notée SP, composée de 2 poulies doubles et d'une corde de 25m (longueur totale).

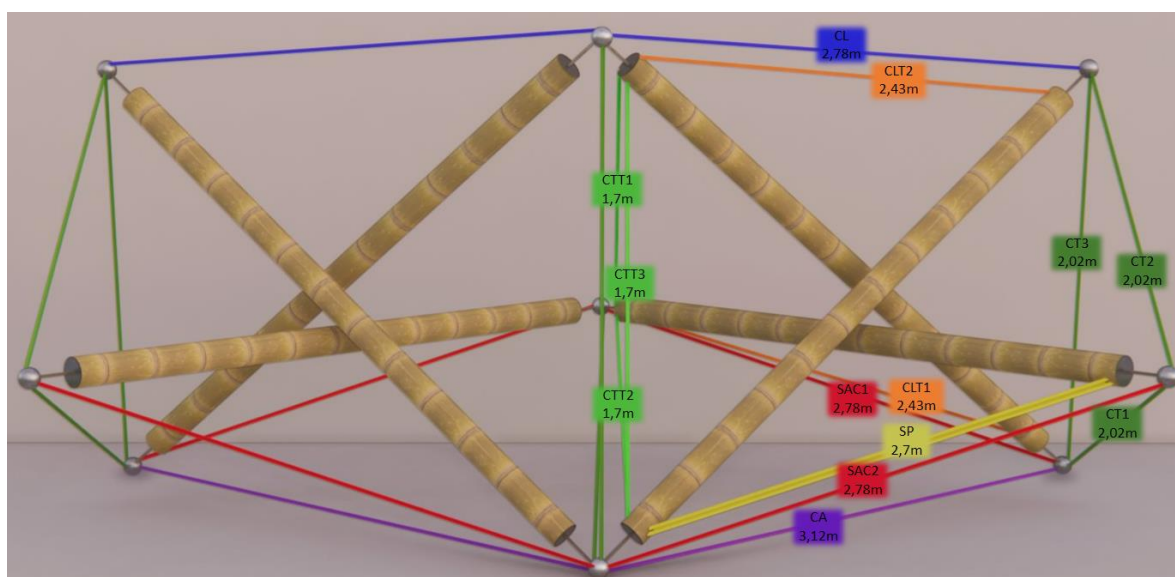


FIGURE 2.66 - Notation des éléments d'un module déployé [illustration de l'auteur]



FIGURE 2.67 - Système de poulies [illustration de l'auteur]

2.5.2 Déploiement d'un module

Le déploiement d'un module comprend l'accroche des différents éléments et l'élévation afin de lui conférer sa bonne géométrie. Pour cela, 12 étapes sont nécessaires, détaillées en ANNEXE B : PROTOCOLE DE DÉPLOIEMENT.

En résumé, le déploiement d'un module consiste à placer correctement les boutons et les câbles sur le sol (voir FIGURE 2.68). Ensuite, en tirant sur le système de poulies SP, le module s'élève (voir FIGURE 2.69). Le module est déployé.

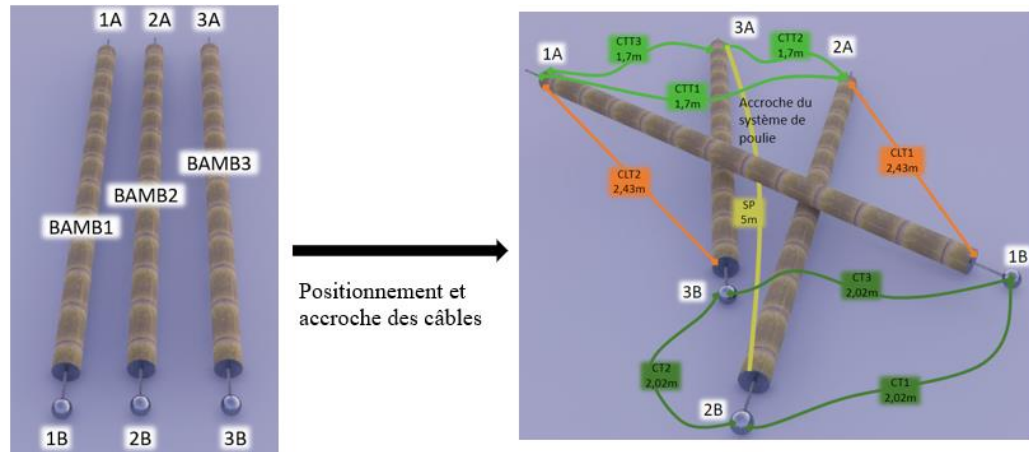


FIGURE 2.68 - Placement des boutons et accroche des câbles [illustration de l'auteur]

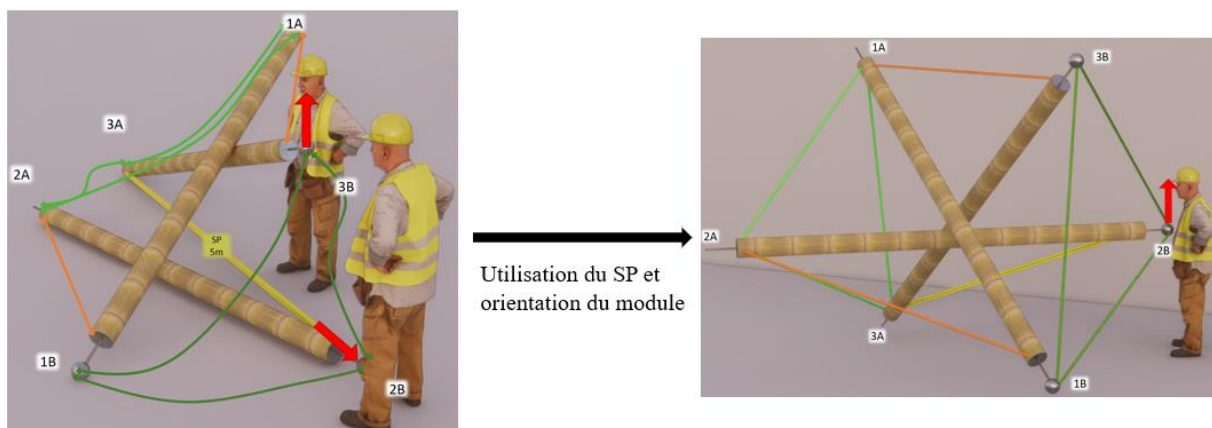


FIGURE 2.69 - Elévation d'un module [illustration de l'auteur]

2.5.3 Assemblage

Une fois un module déployé, il faut l'assembler au dernier module déjà monté de la structure. Un assemblage de deux modules se fait toujours entre un module de type MO1 et de type MO2. Pour assembler le module déployé au dernier module monté de la structure, 5 étapes sont nécessaires, détaillées en ANNEXE B : PROTOCOLE DE DÉPLOIEMENT.

En résumé, l'assemblage de deux modules consiste à glisser les tiges filetées du nouveau module dans les alésages des nœuds du module précédent en profitant de la maniabilité du modèle offerte par le système de poulie. L'ordre d'enfillement des tiges dans les nœuds est : nœud du haut, nœud du bas et ensuite nœud du milieu (voir FIGURE 2.70). Ensuite, le câble permanent longitudinal et les deux sangles à cliquets peuvent être accrochés entre les différents nœuds. Une fois attachés, les cordes temporaires sont enlevées et le câble additionnel est accroché (voir FIGURE 2.71). Une prétension initiale permettant à la structure de tenir sur appuis sous poids propre doit être introduite dans le module assemblé.

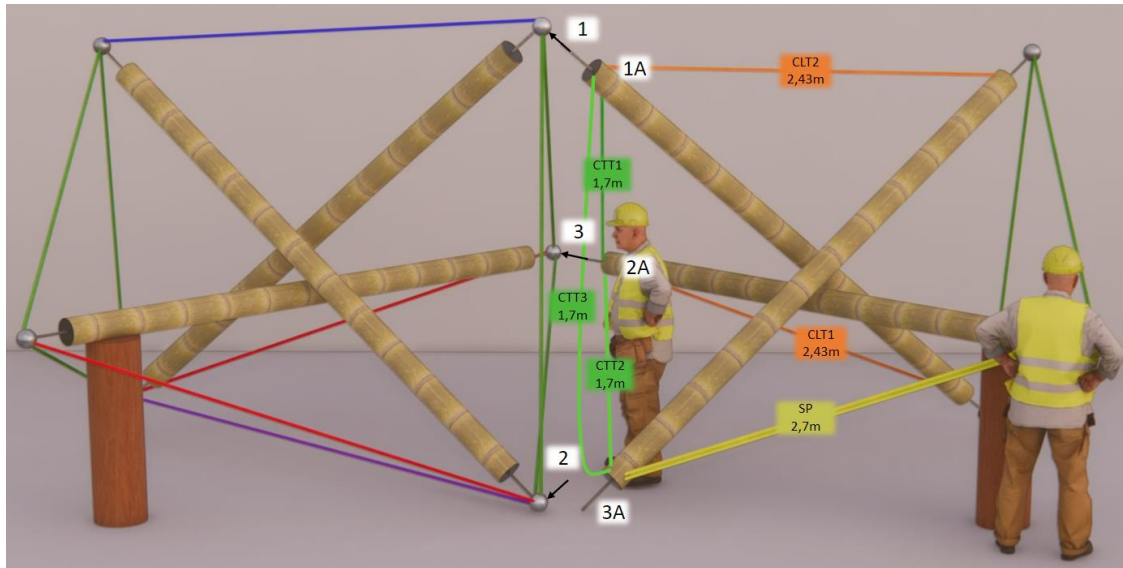


FIGURE 2.70 - Enfilement des tiges filetées [illustration de l'auteur]

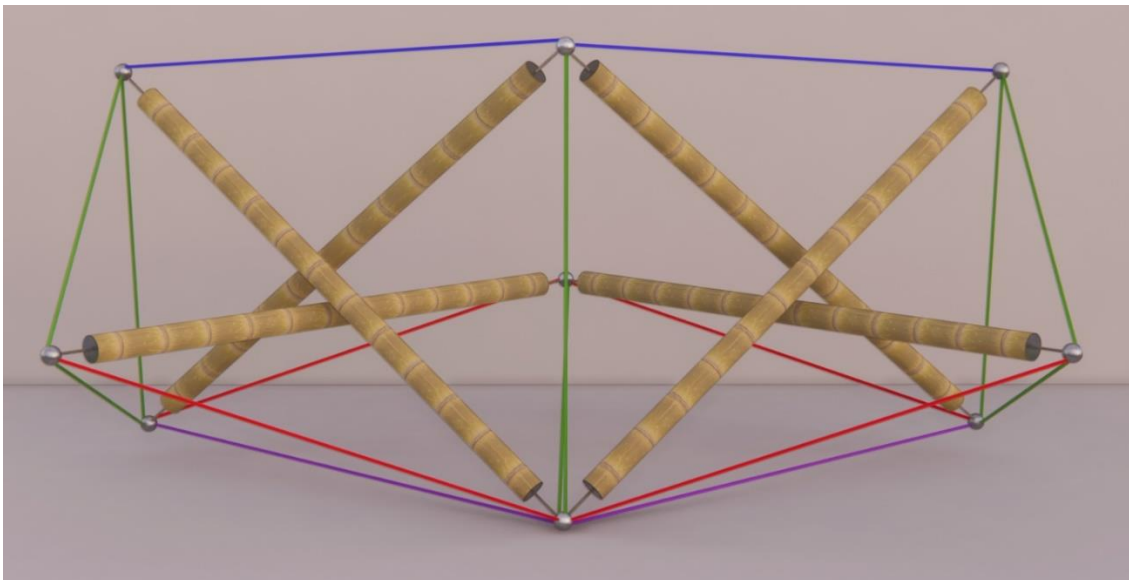


FIGURE 2.71 - 2 modules assemblés [illustration de l'auteur]

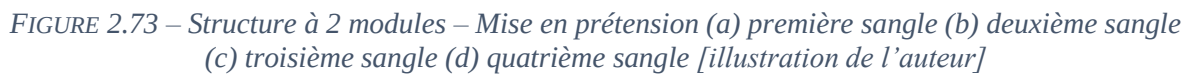
2.5.4 Mise en prétension de la structure

Lorsque les modules sont assemblés les uns avec les autres et légèrement prétendus, la structure peut être placée sur les 4 appuis placés à l'avance. La mise en prétension se fait via les sangles à cliquet et est contrôlée en force. Un essai de mise en prétension d'une structure à 2 modules est réalisé à la section 4.2.1.

La structure avec une faible précontrainte initiale est visible à la FIGURE 2.72.

La mise en précontrainte de la structure est détaillée à la FIGURE 2.73. Les 4 étapes correspondant à la prétension de chaque sangle. Les efforts attendus dans chaque sangle à chaque étape sont détaillés au TABLEAU 2.24.

Les coordonnées des nœuds de la structure précontrainte sont visibles à la FIGURE 2.74.



67

		Introduction de la préstension par les sangles à cliquet			
		5 mm	46 mm		46 mm
		Prétension	Module 1		Module 2
Efforts internes [kN]		initiale	SAC2-5	SAC0-3	SAC5-8
Module 1	SAC2-5	1,1	6,1	11,2	10,8
	SAC0-3	0,9	5,9	11,1	10,6
Module 2	SAC5-8	1,1	0,9	1,3	4,5
	SAC3-6	0,9	0,7	1,2	4,3

TABLEAU 2.24 - Résumé efforts dans les sangles à chaque étape de mise en prétension de la structure à 2 modules

Les positions des nœuds après précontrainte de la structure à 2 modules est visible à la FIGURE 2.74, les angles relatifs entre les bases sont visibles à la FIGURE 2.75.

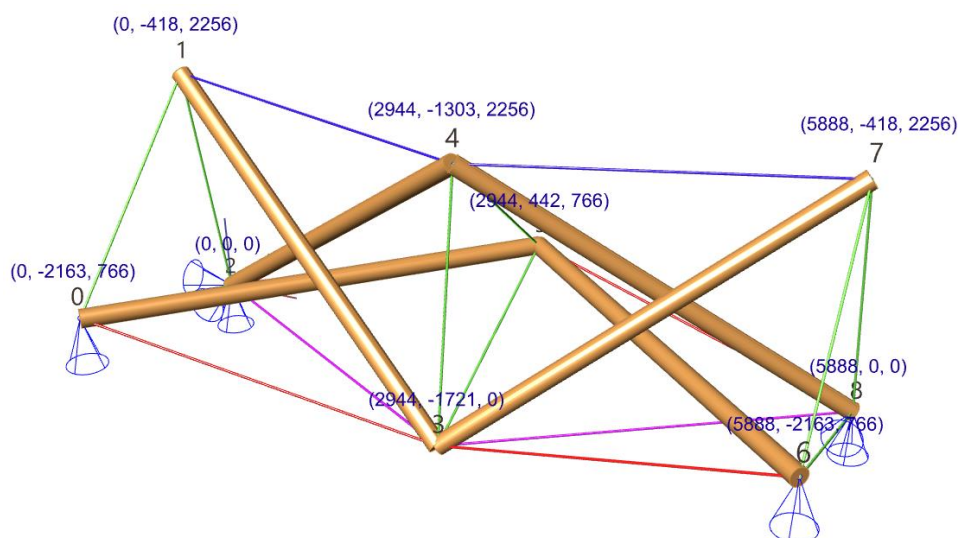


FIGURE 2.74 – Structure à 2 modules - Coordonnées des nœuds après précontrainte [illustration de l'auteur]

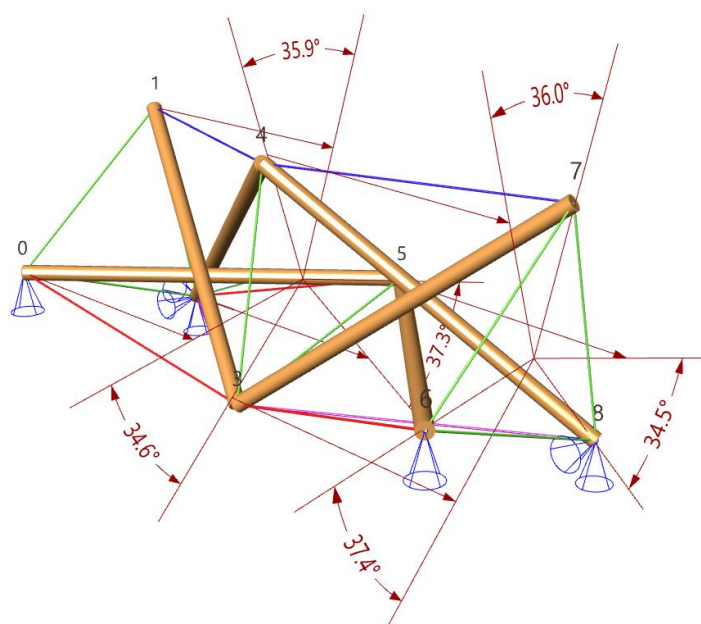


FIGURE 2.75 – Structure à 2 modules – Angles relatifs entre les bases après précontrainte [illustration de l'auteur]

3 INSTRUMENTATION

Pour confronter la structure expérimentale à la structure numérique provenant du plug-in MUSCLE pour le logiciel *Grasshopper*, il convient de comparer plusieurs résultats à observer durant les tests. Les efforts internes et les positions des éléments sont les données primordiales permettant de définir l'état de la structure. De ces données, il pourra être tiré :

- La variation des efforts entre les tests,
- La variation des efforts dans le temps,
- La répartition des efforts,
- Le déplacement des nœuds,
- La variation de longueur des éléments.

Pour obtenir ces résultats, deux systèmes majeurs sont mis en place durant les tests. Les efforts internes à la structure s'obtiennent via des capteurs de forces installés sur certains éléments et les positions des nœuds s'obtiennent grâce à un scanner 3D.



FIGURE 3.1 – (a) Capteur de force fabriqué pour le projet [illustration de l'auteur] (b) Scanner 3D Faro M70 [26]

3.1 Mesure des efforts internes

3.1.1 Éléments contrôlés

Pour une structure composée de 53 éléments et donc 53 valeurs d'efforts internes il est important de choisir quels seront les éléments contrôlés. La structure étant composée de 5 modules chacun de degré d'hyperstaticité¹ de 1, il est nécessaire de connaître au moins 2 efforts internes par module pour le caractériser². Les capteurs sont placés en série aux sangles à cliquet (éléments en position longitudinales inférieure), visible à la FIGURE 3.2. L'assemblage du maillon à la sangle est visible à la FIGURE 3.3.

¹ La présence d'un câble additionnel rend indépendamment chaque module hyperstatique

² En connaissant la géométrie de la structure il est possible de calculer le reste des efforts internes par équilibre aux nœuds.

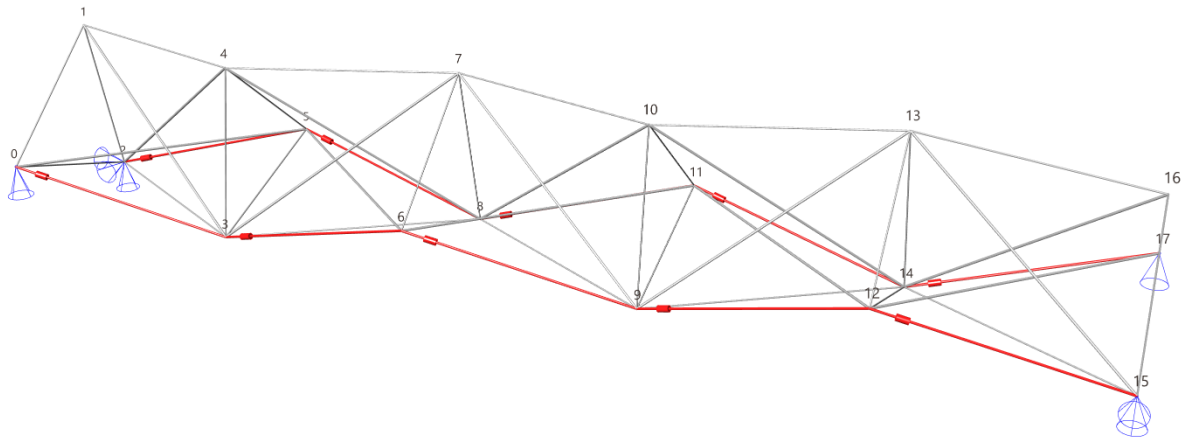


FIGURE 3.2 – Emplacement des 10 capteurs [illustration de l’auteur]



FIGURE 3.3 – Maillon sur assemblage [illustration de l’auteur]

Ce positionnement permet premièrement d’obtenir une valeur directe de la tension introduite via les sangles à cliquet. Il y a donc un meilleur contrôle sur le niveau de précontrainte de la structure. Ensuite, le système de prise de mesure prenant de la place, il est judicieux de le placer sur un élément dont sa longueur est variable³. La structure peut alors être montée avec ou sans ce capteur en adaptant la longueur de la sangle plutôt que les autres éléments cordes fabriqués avec une longueur bien définie.

En suivant ce choix, un total de 10 capteurs de force en tension sont placés en série des 10 sangles de la structure.

3.1.2 Maillon capteur de tension

Un capteur de force est constitué d’un corps d’épreuve sur lequel est collé une jauge de déformation. Ce corps d’épreuve est un maillon de chaîne équipé d’une jauge de déformation, permettant l’accroche de manilles et ayant une résistance suffisante.

L’objectif de ce chapitre est de calibrer les capteurs de force au moyen d’essai sur la machine de tension MTS 100kN. La calibration consiste à définir la relation entre la tension subie par le maillon et les mesures de déformation des jauges. En outre, l’analyse se concentre d’abord en détail sur un seul maillon équipé de deux jauges de déformation. Le but est de déterminer si

³ La sangle peut avoir une longueur sortante du cliquet variable (entre 1 et 3 mètres) avant d’être bloquée.

deux jauges par maillon sont nécessaires ou si une seule jauge permet déjà de mesurer une force de tension avec précision.

3.1.2.1 Caractéristiques d'un maillon

Le maillon vient d'une chaîne classe 80 vendue par le fournisseur Godet. L'acier de cette chaîne est un acier à grains très fins qui a une résistance minimale à la rupture de 800MPa. Les chaînes G80 sont très élastiques et résistantes aux chocs malgré leur grande dureté superficielle. La charge maximale utile (CMU) de la chaîne est de 212 kN.

Les dimensions du premier maillon analysé sont résumées dans le Tableau 3.1. Un schéma des dimensions réelles est visible à la FIGURE 3.4. Les dimensions données par le fournisseur sont visibles sur la Figure 3.5.

Diamètre [mm]		Largeur interne [mm]	
d1	13,03	e1	22,66
d1'	13,04	e2	22,9
d2	13,07	Longueur interne [mm]	
d2'	13,08	p1	80,18
d3	12,88		
d3'	12,86		

TABLEAU 3.1 – Mesure des dimensions du maillon M01

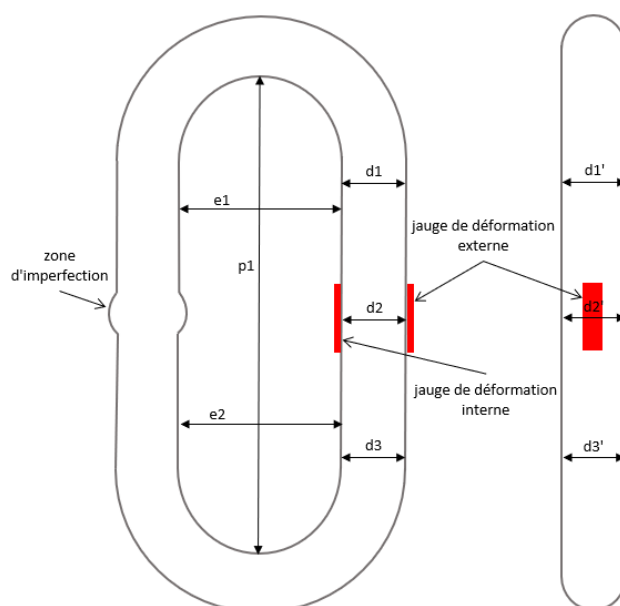


FIGURE 3.4 - Schéma général d'un maillon [illustration de l'auteur]

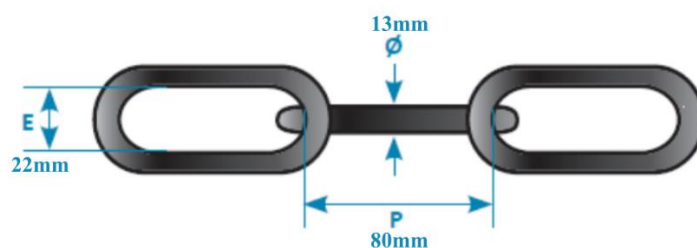


FIGURE 3.5 - Schéma et dimensions d'après le fournisseur Godet [27]

Les dimensions utilisées pour l'analyse sont les moyennes des mesures du maillon réel, résumées au Tableau 3.2.

Longueur interne	p	80,18	[mm]
Largeur interne	e	22,78	[mm]
Diamètre théorique	$\phi_{\text{théo}}$	13	[mm]
Aire théorique d'une partie	$A_{\text{théo}}$	132,73	[mm ²]
Aire théorique totale	$A_{\text{théo,tot}}$	265,46	[mm ²]

TABLEAU 3.2 - Dimensions du maillon utilisées pour l'analyse

3.1.2.2 Jauges de déformation

Deux jauges de déformations (CEA-06-125UN-350) sont collées sur le premier maillon, une sur la face interne et la seconde sur la face externe d'une partie longue du maillon. Le marquage, nécessaire au bon positionnement de la jauge, est réalisé à l'aide d'un trusquin (voir FIGURE 3.6).

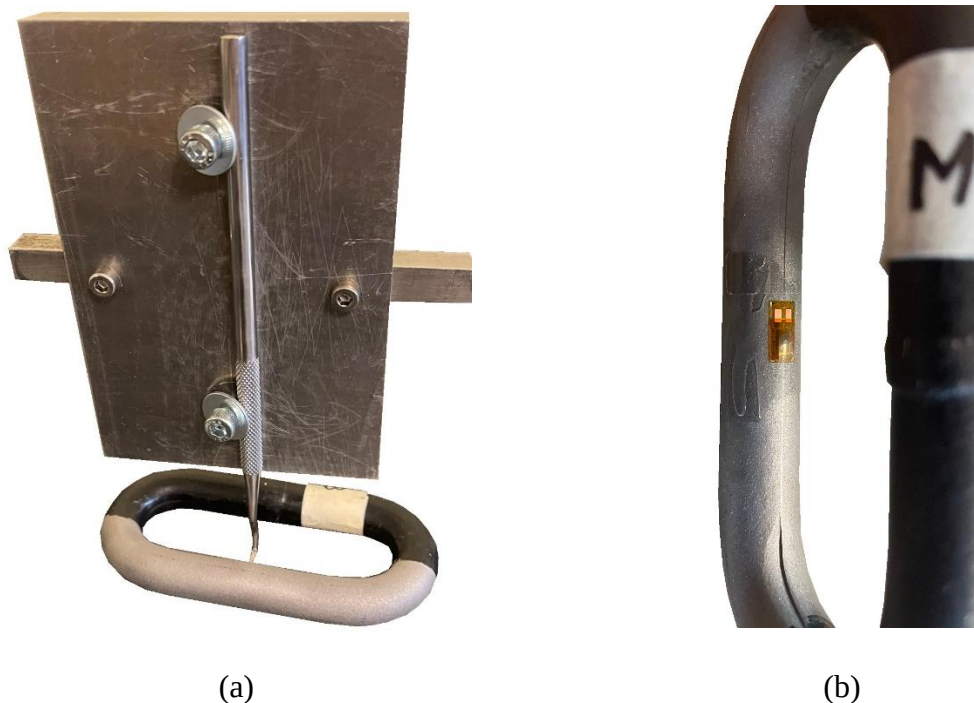


FIGURE 3.6 – (a) Marquage d'un maillon (b) Collage de jauge sur la face interne [illustration de l'auteur]

3.1.2.3 Analyse numérique

Une analyse numérique est réalisée afin de comprendre le comportement du maillon sollicité en tension. De cette analyse sont observés la déformation et les contraintes à la surface du maillon.

Comme la force appliquée sur le point de contact entre deux maillons est excentrée par rapport à l'axe moyen de la partie longue du maillon, cela induit de la flexion dans cette dernière. La déformation du maillon est caractérisée par le rapprochement des deux parties longues du maillon, comme illustré sur la FIGURE 3.7.

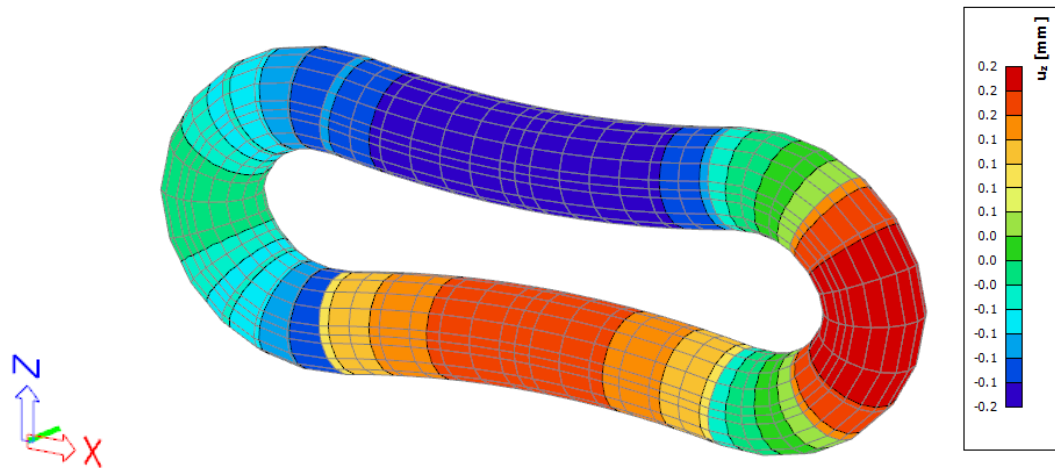


FIGURE 3.7 - Déplacement du maillon selon l'axe Z sous un chargement selon l'axe X de 35kN avec un module de Young de 210GPa [illustration de l'auteur]

La flexion implique une différence de déformation entre la fibre interne et la fibre externe des parties longues du maillon. En effet, en plus de la contrainte axiale due à l'effort normal, la flexion induit des contraintes de tension supplémentaires en face interne du maillon et de compression en face externe. Pour quantifier ces contraintes ou déformations, un modèle en éléments finis 1D est réalisé dans le logiciel SCIA (voir Figure 3.8).

Une sollicitation de 35 kN est appliquée au maillon. Cette sollicitation correspond à la force maximale appliquée au maillon lors de l'essai en traction.

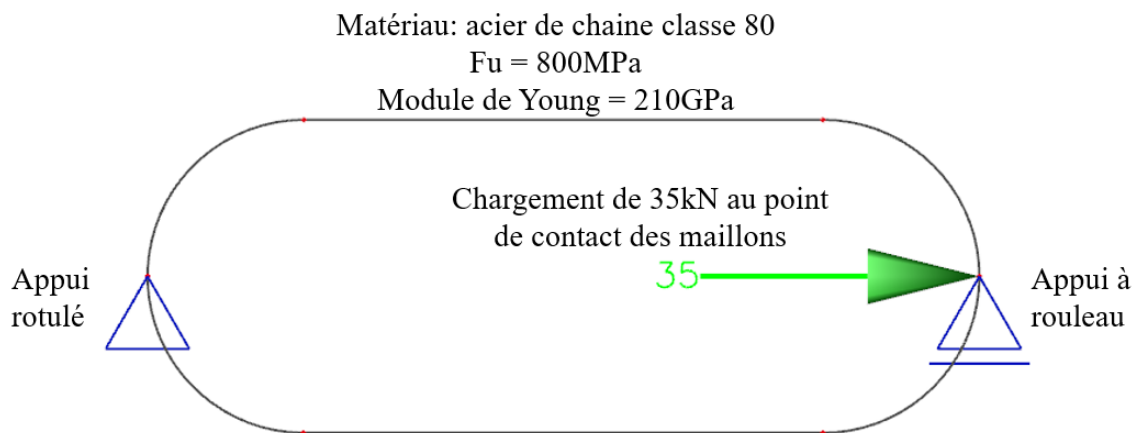


FIGURE 3.8 - Modélisation du maillon en SCIA [illustration de l'auteur]

Les résultats du calcul sont (voir FIGURE 3.9) :

- Contrainte sur la face externe : -138,60 MPa en compression
- Contrainte sur la face interne : 402,36 MPa en traction

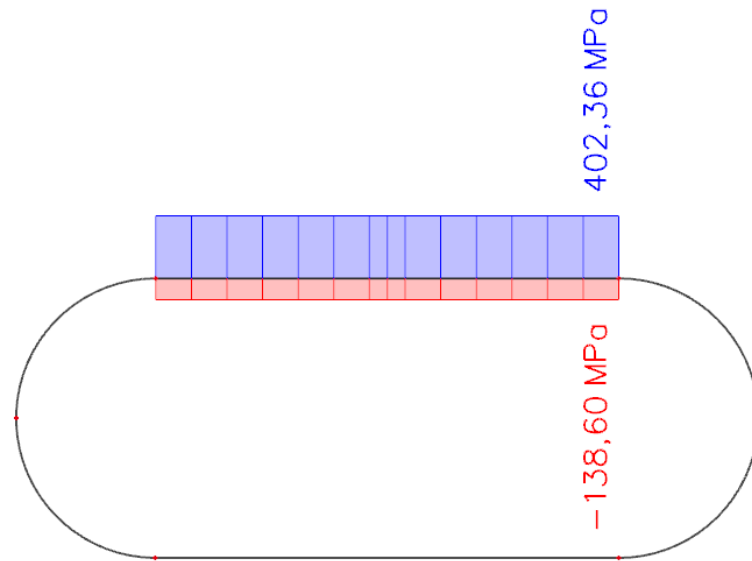


FIGURE 3.9 - Contraintes 1D dans la partie longue du maillon [illustration de l'auteur]

La flexion composée qui induit ces différences de contraintes entre faces interne et externe peut également s'observer dans les résultats du calcul.

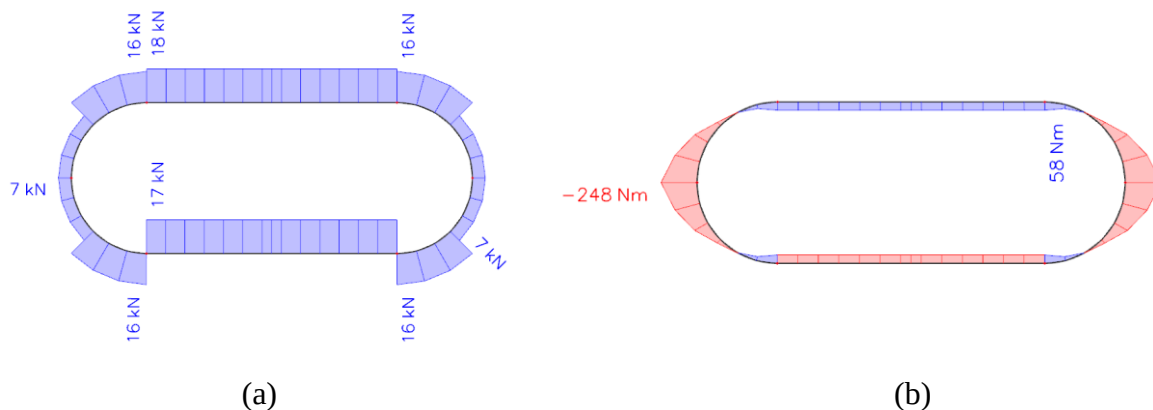


FIGURE 3.10 - Efforts internes dans le maillon : (a) effort normal (b) moment de flexion [illustration de l'auteur]

Ces résultats numériques seront comparés avec les résultats expérimentaux à la section 3.1.2.5.

3.1.2.4 Analyse expérimentale

L'objectif en collant une jauge de déformation sur un maillon est d'en faire un capteur de force en tension. Pour ce faire, il faut établir une relation entre la charge de tension parcourant le maillon et la déformation de la jauge mesurée. Comme observé grâce à l'analyse numérique, les déformations sur les faces internes et externes ne sont pas les mêmes. Une jauge de déformation est collée sur chacune de ces faces pour obtenir des données sur ces déformations lors de la mise en tension du maillon. Les tests ont pour but de déterminer la relation entre la déformation du maillon et la tension le parcourant.

Les objectifs du test de tension d'un maillon sont :

- Déterminer le nombre de jauges à coller sur un maillon pour le caractériser sous tension.

- Déterminer la relation entre l'effort de tension parcourant le maillon et la déformation de la jauge.

Pour cela, 3 cycles de chargement ont été effectués. La tension maximale appliquée au maillon est de 35kN, cette charge correspond à la sollicitation maximale pouvant être appliquée à la plaque en acier utilisée lors du test. La vitesse de chargement du maillon est de 0,5 kN/s.

Les mesures prises lors du test sont :

- La force exercée par le vérin.
- Le déplacement du vérin.
- La déformation de la jauge de déformation sur la face interne.
- La déformation de la jauge de déformation sur la face externe.

La configuration de l'essai est détaillée sur la figure ci-dessous (voir FIGURE 3.11).

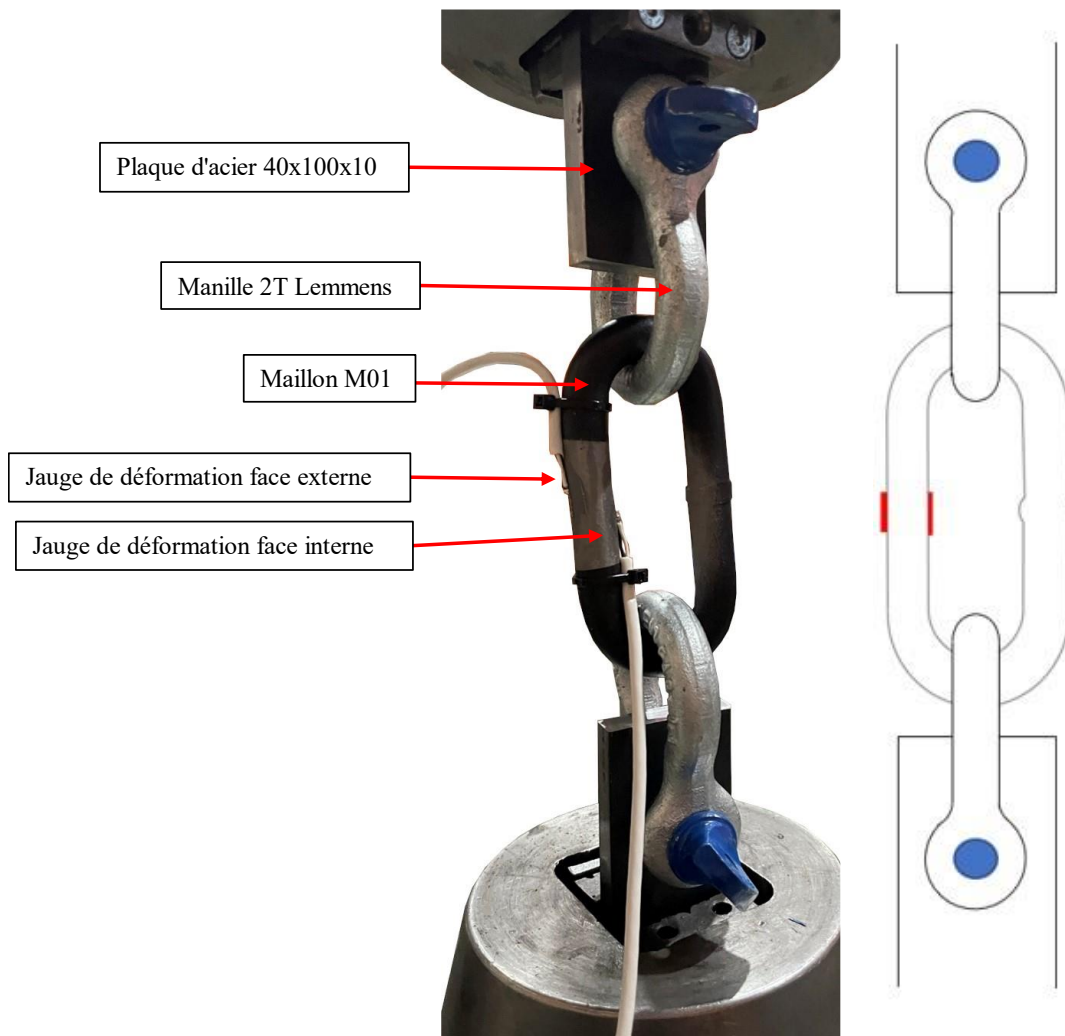


*FIGURE 3.11 - Configuration de l'essai de tension du premier maillon équipé de deux jauges
[illustration de l'auteur]*

Les résultats du test de chargement du maillon se trouvent dans les graphes de la FIGURE 3.12.

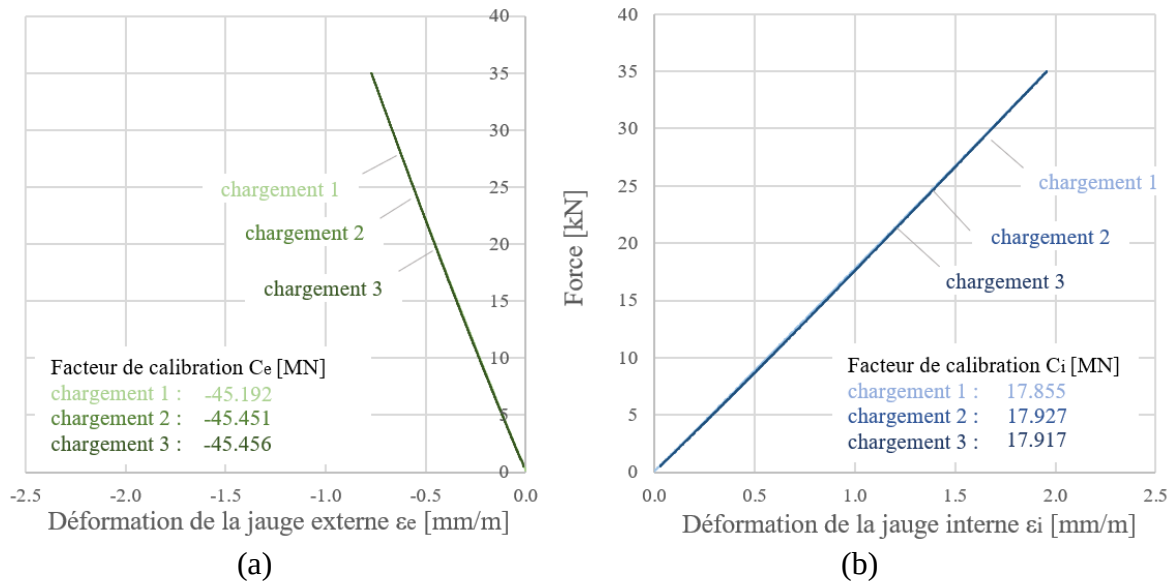


FIGURE 3.12 - Résultats de trois cycles de chargement sur un maillon équipé de deux jauges : (a) mesures de la jauge en face externe (b) mesures de la jauge en face interne [illustration de l'auteur]

Observations de la FIGURE 3.12:

- les déformations mesurées par les jauges sont linéaires par rapport à la tension appliquée.
- le facteur de calibration des chargements 2 et 3 sont très proches tandis que le facteur de calibration du chargement 1 est légèrement différent. Ceci s'explique par le fait que, contrairement aux chargement 2 et 3, le chargement 1 commence par une tension initiale nulle. En effet, comme il s'agit de la première tension appliquée au maillon, les éléments de l'assemblage (FIGURE 3.11) se réarrangent légèrement entre eux. C'est pourquoi les résultats du premier chargement sont négligés.
- la déformation de la jauge interne est plus importante que celle de la jauge externe. Le signal est donc plus fort en collant la jauge sur la face interne du maillon.

Conclusions de la FIGURE 3.12 :

- la linéarité des résultats des test permet d'établir une relation linéaire entre la déformation de la jauge et la tension dans le maillon. On peut donc en déduire un facteur de calibration qui est la pente de la droite d'interpolation de chaque essai :

$$C_{e,i} = \frac{F}{\epsilon_{e,i}} [MN]$$

- le facteur de calibration de chaque jauge est obtenu en faisant la moyenne des essais 2 et 3.
- pour la jauge externe, le facteur de calibration est $C_e = -45,453 [MN]$.
- pour la jauge interne, le facteur de calibration est $C_i = 17,922 [MN]$.

Après avoir répondu à l'objectif initial qui est de calibrer le maillon pour en faire un capteur de force, on peut vérifier la validité des résultats. Pour cela on peut, par exemple, calculer le module de Young du maillon et calculer les contraintes en faces externe et interne.

On peut s'intéresser à la fibre moyenne et calculer le facteur de calibration faisant le lien entre la déformation de cette fibre et la tension parcourant le maillon. Ce facteur est la pente de la moyenne des droites des jauges externe et interne et se calcule comme suit :

$$C_{moy} = \frac{1}{\frac{1/C_e + 1/C_i}{2}} = 59,177 \text{ [MN]}$$

Le module de Young du maillon est la pente de cette même droite mais relativement aux contraintes et non aux forces. Le module et les contraintes se calculent donc de la manière suivante :

$$E = \frac{C_{moy}}{A_{théo,tot}} = 222,9 \text{ [GPa]} \quad \sigma = \frac{F}{A_{théo,tot}} \text{ [MPa]}$$

Ces caractéristiques sont visibles sur le graphe de la FIGURE 3.13.

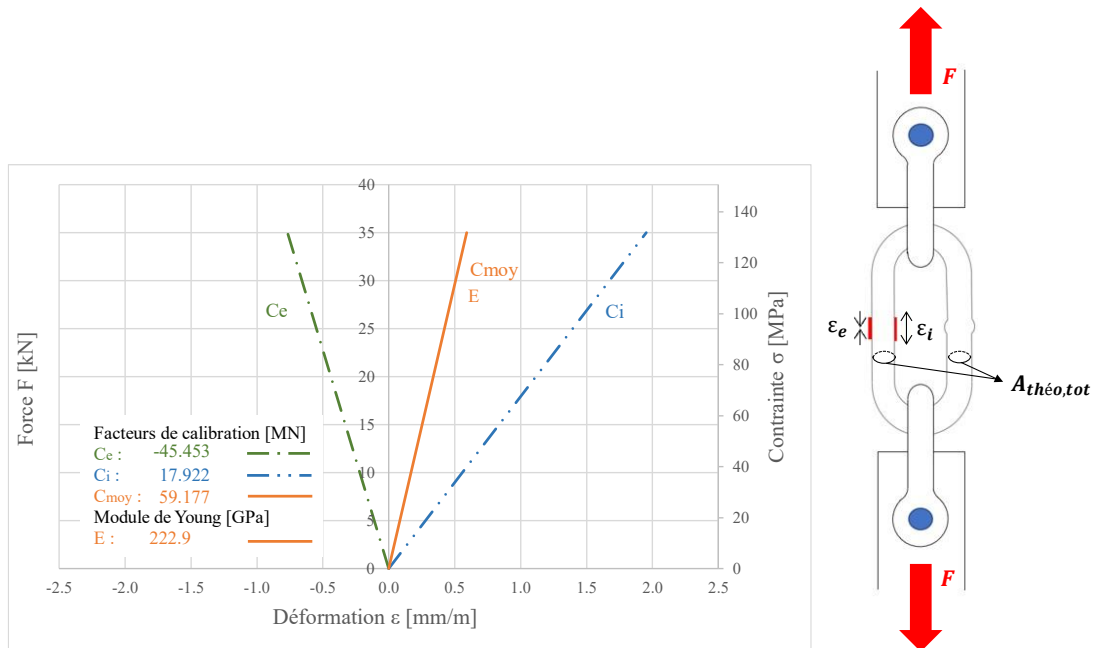


FIGURE 3.13 – Résultats des facteurs de calibrations externe C_e , interne C_i , moyen C_m et du module de Young E du maillon M01 [illustration de l'auteur]

Ce résultat, bien qu'acceptable, semble légèrement trop élevé comparé au module de Young de l'acier qui est 210[GPa]. On peut expliquer cette différence par deux imprécisions. Premièrement, il est possible que les jauges de déformations ne soient pas parfaitement l'une en face de l'autre, ce qui fausse le calcul de la déformation moyenne. Deuxièmement, la force ne se répartit peut-être pas de manière égale entre les deux parties longues du maillon. Cela serait causé par la zone d'imperfection, là où le maillon a été refermé lors de la fabrication, où l'on observe un diamètre plus important de 13,8mm.

Dès lors, afin de faire une comparaison avec les résultats numériques, les contraintes σ_{ext} et σ_{int} peuvent être calculées en utilisant les déformations des jauges et le module de Young.

	σ_{ext}	σ_{int}
chargement 1	-173 MPa	438 MPa
chargement 2	-172 MPa	436 MPa
chargement 3	-172 MPa	436 MPa
Moyenne 2 et 3	-172 MPa	436 MPa

TABLEAU 3.3 - Contraintes calculées sur les faces externe et interne

3.1.2.5 Conclusion de l'essai d'un maillon avec deux jauges

L'analyse numérique a pour but de prédire ce que vont mesurer les jauges lors du test expérimental. Comme on l'observe dans le TABLEAU 3.4, les résultats sont similaires mais pas totalement semblables.

	Numérique	Expérimentale
σ_{ext}	-139 MPa	-172 MPa
σ_{int}	402 MPa	436 MPa

TABLEAU 3.4 - Comparaison entre l'analyse numérique et expérimentale

Ces différences peuvent-être expliquées par des petites erreurs présentes dans les deux analyses :

Analyse numérique :

- Le point d'application de la force se trouve au centre de la section et non pas au point de contact réel en face externe de la section. Le chemin des contraintes principales n'est alors pas le même sur le modèle numérique qu'en réalité.
- Les imperfections de la géométrie réelle du maillon ne sont pas présentes dans le modèle numérique.
- Le calcul numérique se fait selon la théorie de poutres avec des éléments 1D définis par des longueurs et des sections. Pour un élément si petit et courbe que le maillon, un modèle d'éléments finis en volumes 3D serait sûrement plus précis.

Analyse expérimentale :

- Les jauges ne sont pas parfaitement alignées dans l'axe du maillon. La déformation dans l'axe est alors décomposée en une déformation longitudinale et transversale. La déformation longitudinale est alors moins grande que si la jauge était alignée. On en tire alors un module de Young qui est plus élevé.
- Les deux jauges externe et interne ne sont peut-être pas parfaitement l'une en face de l'autre. La fibre moyenne calculée comme étant entre ces deux jauges n'est pas parfaitement au centre de la section.

Cumulées les unes aux autres, ces imprécisions expliqueraient la différence entre les résultats numériques et expérimentaux. On considère cependant que le test est réussi et répond aux objectifs initiaux.

En ce qui concerne le placement des jauges, on observe qu'il n'est pas nécessaire de coller deux jauges de déformation sur chaque maillon. Il suffit de coller une jauge, faire un test de tension du maillon et en déduire le facteur de calibration qui permet de transformer cet assemblage en capteur de force en tension. Il reste à déterminer la position de la jauge de déformation.

	Avantages	Inconvénients
Jauge face interne	- Se déforme plus - Signal plus fort → moins de bruit dans le signal - Jauge protégée par le maillon → risque moins grand de la casser - Intuitif de mesurer la tension dans le maillon par allongement d'une jauge de déformation	- Compliquée à coller due à la difficulté d'accès de la face interne
Jauge face externe	- Simple à coller	- Jauge vulnérable à l'environnement

TABLEAU 3.5 - Avantages et inconvénients de la position de la jauge

Il est donc préférable de coller la jauge sur la face interne des parties longues des maillons.

3.1.2.6 Calibrations de 12 maillons

Une seule jauge de déformation est donc placée sur la face interne de 12 maillons, 2 maillons de secours sont réalisés.

Un système d'acquisition différent de celui utilisé pour l'analyse du premier maillon est utilisé lors des essais sur la structure. Ce nouveau système renvoie une valeur de différence de tension et non plus une déformation. Une relation linéaire existe entre ces deux mesures et est propre à chaque type de jauge de déformation. Le coefficient α , connu pour les jauges utilisées, définit la relation entre une différence de tension et une déformation de la jauge. Pour les jauges de référence CEA-06-125UN-350 :

$$\begin{aligned}
 4.410 \text{ [mV]} &= 1.6413 \text{ [mm/m]} \\
 1 \text{ [mV]} &= 0.372 \text{ [mm/m]} \\
 \omega &= 0.372 \text{ [1/V]}
 \end{aligned}$$

En procédant à cette analyse pour tous les maillons, le facteur de calibration $C_i \text{ [MN]}$ est déterminé. Ce facteur lie la déformation de la jauge à l'effort de traction parcourant le maillon. Pour utiliser le système d'acquisition il faut y introduire les facteurs de calibration $\beta \text{ [MN/V]}$ et ainsi lire directement les efforts de traction de tous les maillons capteurs de force simultanément. Ce facteur s'obtient avec la relation $\beta_i \text{ [MN/V]} = C_i \text{ [MN]} * \omega \text{ [1/V]}$. Ces valeurs sont reprises dans le TABLEAU 3.6.

	C_i [MN]	β_i [MN/V]
M01	17.922	6.670
M02	17.923	6.670
M03	18.231	6.785
M04	18.323	6.819
M05	17.841	6.640
M06	18.528	6.896
M07	18.376	6.839
M08	18.084	6.731
M09	18.490	6.882
M10	18.400	6.848
M11	18.044	6.716
M12	18.395	6.846

TABLEAU 3.6 - Facteurs de calibration des maillons

3.1.3 Programme d'acquisition

Les efforts internes sont observés via l'utilisation d'un programme d'acquisition *Contact Pro IV* (voir FIGURE 3.14) développé par le pôle LEMSC⁴. Les maillons capteurs de force sont reliés individuellement par câbles jusqu'à un conditionneur contenant les cartes d'acquisition. Ce boîtier, lié à une unité de commutation et d'acquisition, permet d'alimenter les jauges en électricité et donc d'obtenir une différence de tension lorsque celles-ci se déforment (voir FIGURE 3.15). Ces variations de tension sont lues par le logiciel *Contact Pro IV* et interprétées en efforts internes en utilisant les relations définies par les facteurs présentés dans le TABLEAU 3.6. Les jauges sont zérotées lors du lancement du programme d'acquisition. C'est pourquoi, les maillons doivent être branchés avant la construction de la structure.



FIGURE 3.14 – Exemple de fenêtre générée par le logiciel [illustration de l'auteur]

⁴ Laboratoire Essais Mécaniques, Structures et Génie civil

Le logiciel affiche un graphique en temps réel de l'évolution des valeurs de chaque entrée (ici 4 capteurs de force sont branchés) ainsi qu'un tableau reprenant les valeurs actuelles (voir FIGURE 3.14). Une fois le test terminé et le logiciel arrêté, un fichier *.res* est généré reprenant les valeurs de chaque entrée pour chaque pas de temps. Ce fichier s'ouvre et s'utilise dans *Excel*.



FIGURE 3.15 – (a) Conditionneur (b) Boîtier d'acquisition [illustration de l'auteur]

3.1.4 Capteur de force en compression

Afin d'avoir une certaine diversification de mesures d'efforts internes, il est également possible d'utiliser des capteurs de force en compression à l'extrémité de certains boutons. Pour cela, une pièce appelée « adaptateur capteur » est conçue et usinée afin de permettre la pose d'un capteur Sensy 5900-B [28]. La capacité de ce capteur est de 30 à 100 kN. L'acier utilisé pour l'adaptateur est le 42CrMo4, acier allié commun au chrome-molybdène et a une limite élastique de 635MPa. Cette pièce permet de buter le capteur à l'embout du bambou, faisant passer l'effort de compression par le capteur, ce dernier pouvant ainsi le mesurer (voir FIGURE 3.16). Son trou taraudé permet également de renforcer la tige pour la flexion.

Cette solution ne sera pas utilisée dans ce mémoire à cause de soucis de livraison du capteur de force.

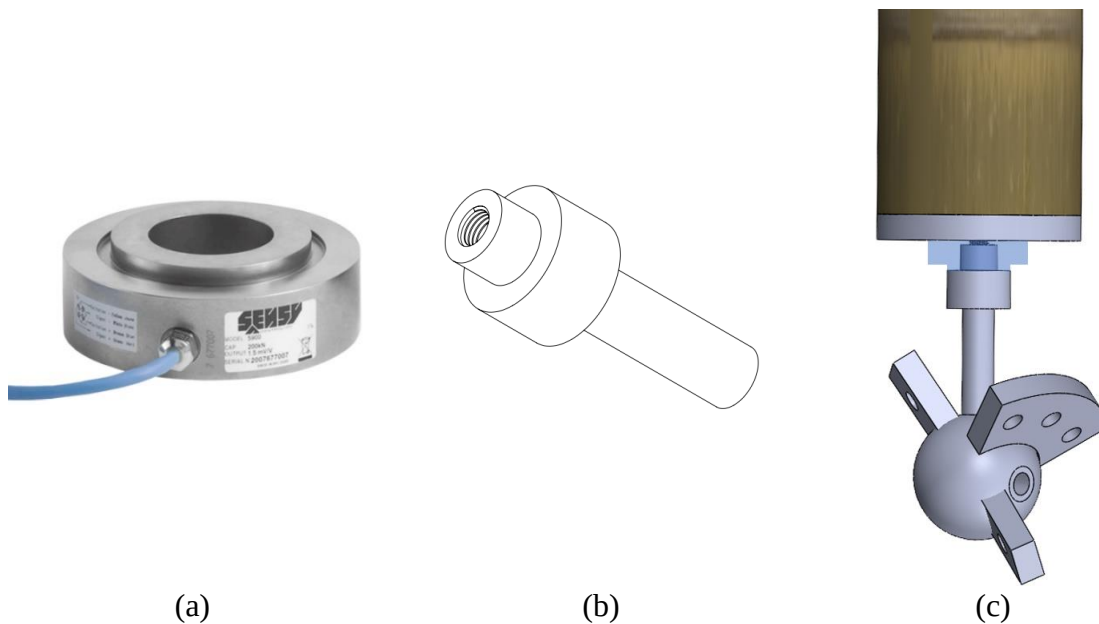


FIGURE 3.16 – (a) Capteur de force Sensy [28] (b) Adaptateur capteur (c) Assemblage avec capteur transparent [illustration de l'auteur]

3.2 Mesure des coordonnées des nœuds

Toutes les étapes mentionnées ci-après décrivent le procédé d'obtention de géométrie de la structure à un seul instant. Il convient de répéter ce procédé pour chaque test afin d'étudier l'évolution de la géométrie de la structure.

3.2.1 Scanner 3D

Afin de déterminer la géométrie de la structure, il est nécessaire de connaître la position de ses nœuds. Le nœud théorique est le point où les axes des éléments étants connectés au nœud réel concordent. Ce point est au centre des boules servant de lieu d'assemblage des boutons et câbles. Les boules présentes sur la structure peuvent bouger dans toutes les directions et surtout, elles peuvent pivoter sur elles-mêmes. Même après ces transformations, le nœud théorique reste toujours le centre de la boule. La position de ce centre n'étant pas directement mesurable, elle doit être déterminée en évaluant les positions de certains points visibles, situés à la surface de la boule. En effet, il est possible de déterminer la position du centre d'une boule en connaissant les positions de 4 points sur la surface de cette dernière.

L'outil permettant d'acquérir des coordonnées de points dans l'espace est le scanner *Faro Focus M70*. En scannant la structure dans son environnement, des points sur la surface de la structure et donc sur la surface des boules sont enregistrés. Le scanner projette un laser tout autour de lui grâce à un système de miroir pivotant (voir FIGURE 3.17). Il enregistre un nuage de points localisé dans l'espace. Ils sont ensuite traités dans le logiciel SCENE, présenté dans la section suivante (voir section 3.2.2).

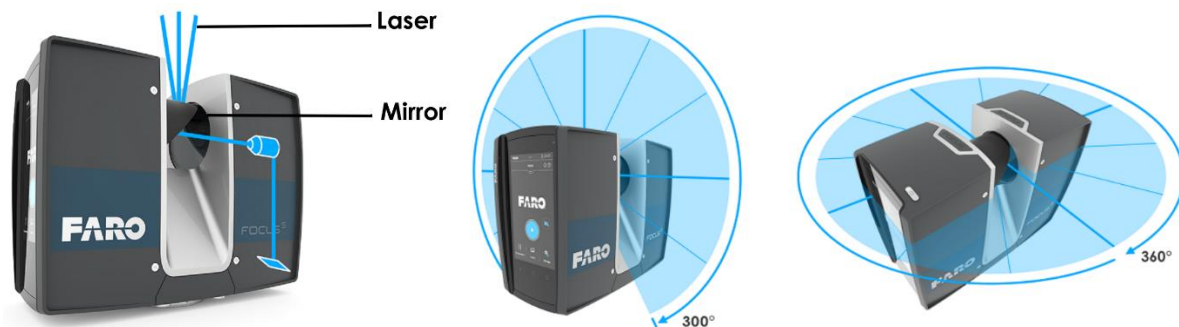


FIGURE 3.17 – Fonctionnement Scanner Faro M70 [26]

L'utilisation du scanner se fait assez simplement. Il suffit de le placer à quelques mètres de la structure de manière qu'il ait une vue sur plusieurs boules (voir FIGURE 3.18). Une fois le scan réalisé, le scanner Faro peut être déplacé afin d'avoir une vue différente et ainsi, pouvoir scanner différents points de différentes boules. Plusieurs scans sont réalisés afin d'avoir chaque boule scannée selon au moins 2 positions différentes, permettant de caractériser plus précisément la surface de la boule et donc, mieux la définir dans l'espace.



FIGURE 3.18 – Placement du scanner [illustration de l'auteur]

Les différents nuages de points résultant des différents scans sont assemblés via le logiciel SCENE, présenté dans la section 3.2.2.

Un mode d'emploi détaillant chaque étape à réaliser ainsi que la gestion des paramètres se trouve en ANNEXE D : MANUEL D'UTILISATION SCANNER FARO M70.

3.2.2 Logiciel SCENE

Le traitement des fichiers créés par le scanner Faro contenant les nuages de points est réalisé via le logiciel *SCENE*. L'objectif principal de ce logiciel est de combiner plusieurs nuages de points issus de plusieurs scans et d'en faire une scène 3D. Cet assemblage de plusieurs nuages de points est automatique. Il est réalisé par analyse des différents nuages, permettant d'identifier des surfaces identiques entre les nuages, comme des murs par exemple. Pour aider à la reconstitution de la scène, il peut être nécessaire de placer des cibles (voir FIGURE 3.19) dans l'environnement du scanner. Chaque cible doit être unique dans l'environnement et doit être le plus visible possible depuis les différents endroits de scans. Ces cibles permettent au logiciel *SCENE* de superposer directement les points des centres de ces cibles et donc avoir une meilleure superposition entre différents scans (voir FIGURE 3.20).

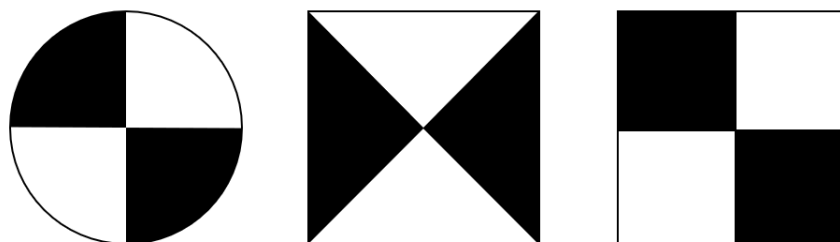


FIGURE 3.19 – Exemple de cibles [illustration de l'auteur]

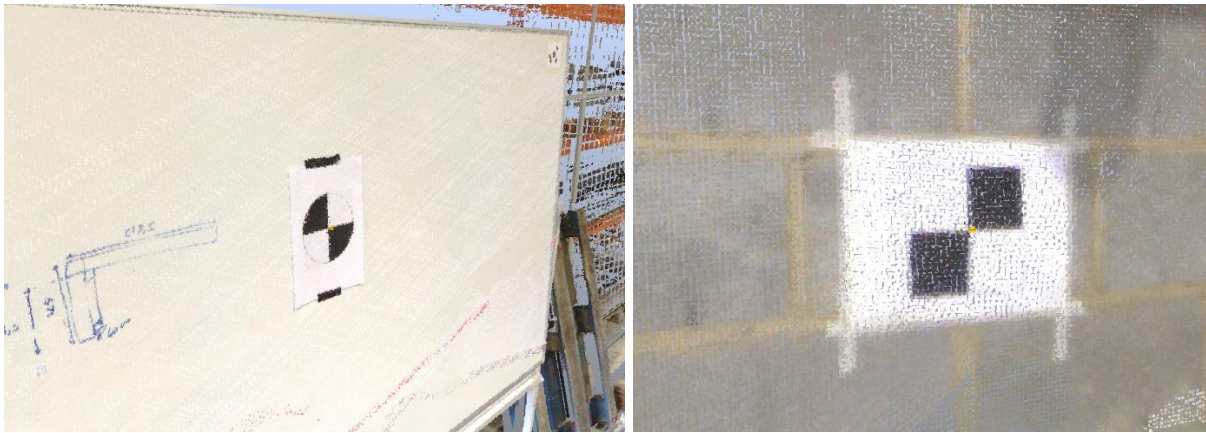


FIGURE 3.20 - Cibles vues dans le logiciel SCENE [illustration de l'auteur]

Les points provenant des différents scans sont placés dans un même système de coordonnées, permettant de visualiser l'objet scanné dans son ensemble et sous tous les angles (voir FIGURE 3.21). Afin de rendre la scène plus visuelle, une photo est prise à chaque scan afin d'assigner une couleur à chaque point scanné. Les boîtes noires visibles dans l'espace 3D représentent la position du scanner lors de chaque scan.

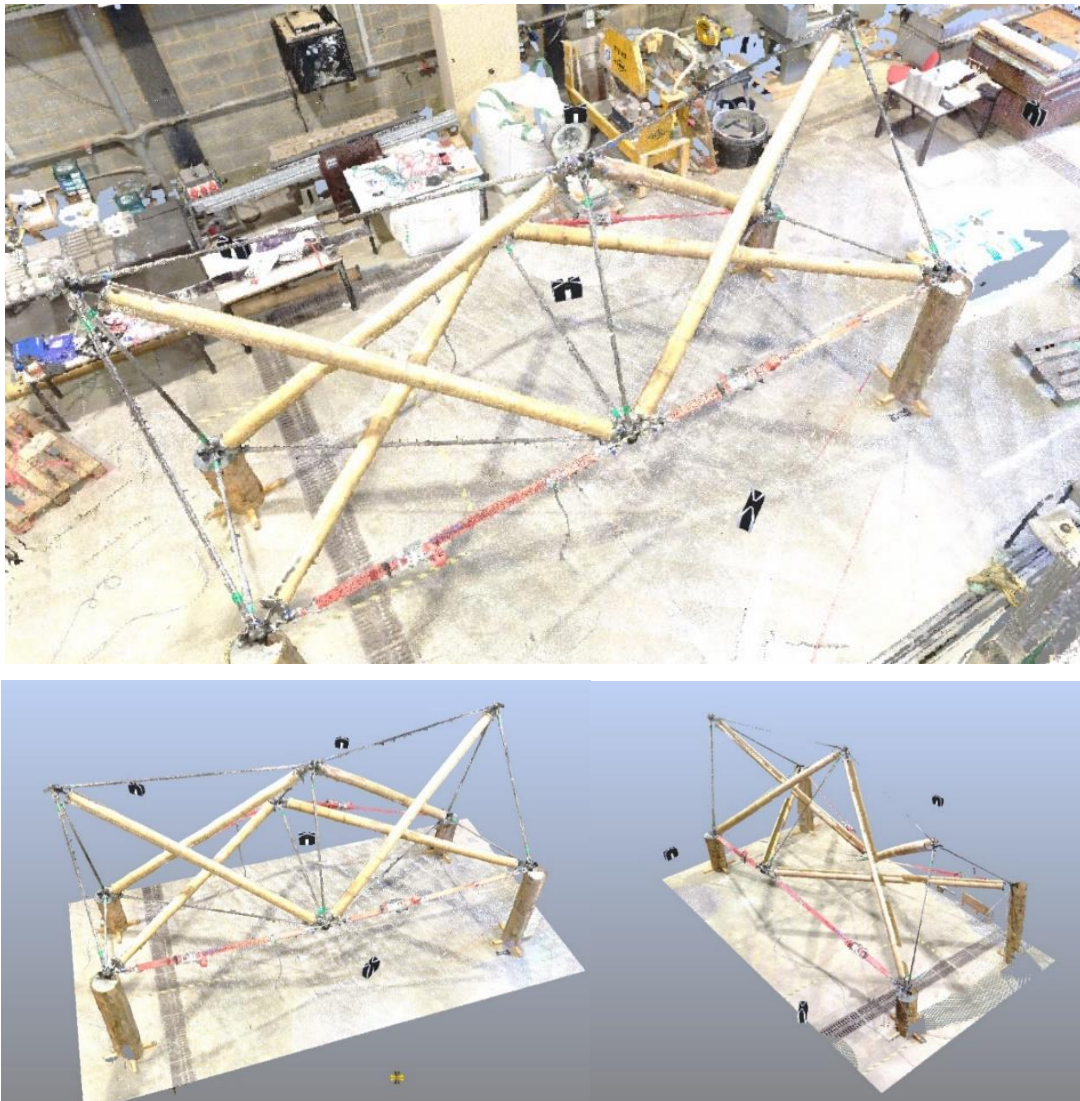
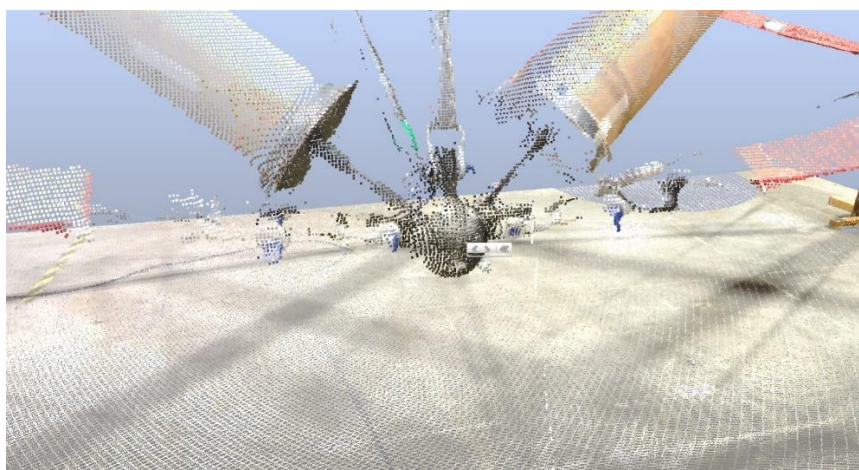


FIGURE 3.21 – Scène 3D de la structure à 2 modules [illustration de l'auteur]

Une fois la scène 3D assemblée, il est désormais possible d'identifier les éléments de la structure dans le nuage de points, notamment les nœuds (voir FIGURE 3.22).



(a)



(b)

FIGURE 3.22 – Nuage de points des nœuds (a) au milieu de la structure (b) sur appuis [illustration de l'auteur]

À la suite de cette identification des éléments, les positions des points de la surface du nœud peuvent être déterminées (voir FIGURE 3.23). Le nombre de points à sélectionner sur chaque boule est d'au moins 15 afin d'avoir une base de données suffisantes pour le calcul des centres des boules. Ces points doivent être espacés sur la surface de la boule afin d'avoir une bonne définition de cette dernière et ainsi, une meilleure précision de calcul de centres.

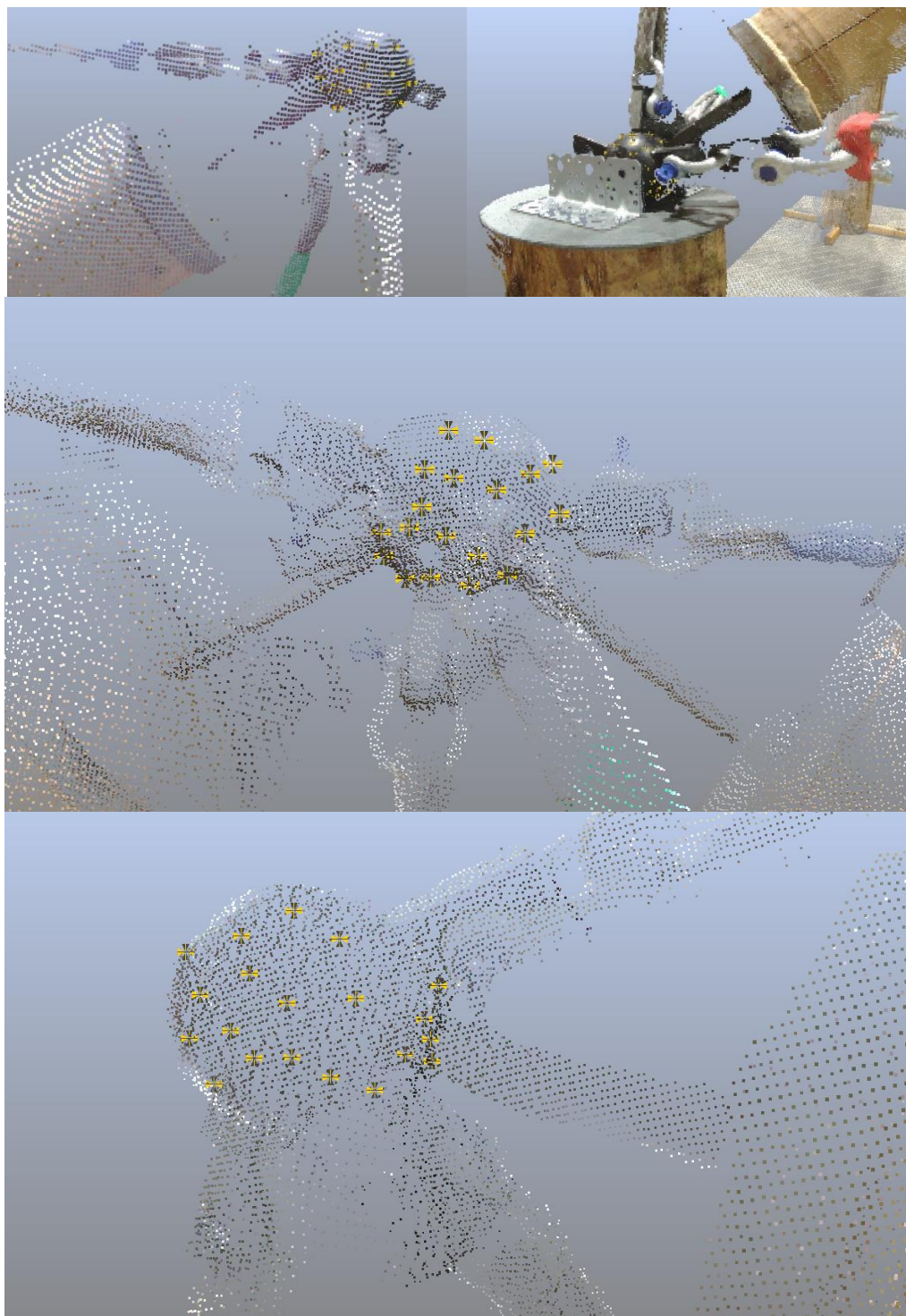


FIGURE 3.23 – Sélection de points sur la surface de nœuds [illustration de l’auteur]

Un guide d’utilisation détaillant chaque étape à réaliser dans le logiciel SCENE se trouve en ANNEXE D : MANUEL D’UTILISATION SCANNER FARO M70.

Le repère de coordonnées de la scène est défini selon l’origine du premier scan. Ce repère est ensuite modifié afin de correspondre à celui de la structure (voir section 3.2.4)

3.2.3 Calcul du centre des nœuds

Pour chaque nœud, le centre doit être déterminé en utilisant les coordonnées des points scannés à la surface de la boule. Pour ce faire, un code en langage *Python* est utilisé.

Deux approches différentes sont possibles et ont été implémentées pour résoudre ce problème. Elles sont décrites ci-dessous en développant leurs étapes de raisonnement.

Première approche : « Définition par 4 points » :

- Dans l'espace, 4 points⁵ suffisent à définir une unique sphère passant par ces points.
- En sélectionnant 4 points parmi ceux contenus dans la liste, une sphère caractérisée par son centre et son rayon peut être calculée en utilisant le système d'équations décrit ci-après.
- En sélectionnant 4 points parmi ceux contenus dans la liste, une sphère caractérisée par son centre et son rayon peut être calculée en utilisant le système d'équations décrit ci-après.
- 200 combinaisons aléatoires de 4 points parmi la liste donnent donc 200 sphères, toutes potentielles à la solution du problème.
- Un tri de ces sphères calculées est effectué. Le rayon réel de la boule est connu et est de 50mm. Si le rayon calculé pour une sphère n'est pas égal au rayon réel plus ou moins une tolérance de 3mm, la sphère est rejetée.
- La solution finale du problème est obtenue en faisant la moyenne des coordonnées des sphères non-rejetées.
- Ces étapes sont répétées pour chaque nœud de la structure afin de déterminer sa géométrie au moment du scan.

Le système d'équations utilisé par cette approche est celui de la définition d'une sphère dans l'espace. Les 4 points connus sont $p_1(x_1, y_1, z_1)$, $p_2(x_2, y_2, z_2)$, $p_3(x_3, y_3, z_3)$ et $p_4(x_4, y_4, z_4)$. Les 4 inconnues sont le rayon r et le centre (α, β, γ) .

$$\begin{cases} (x_1 - \alpha)^2 + (y_1 - \beta)^2 + (z_1 - \gamma)^2 = r^2 \\ (x_2 - \alpha)^2 + (y_2 - \beta)^2 + (z_2 - \gamma)^2 = r^2 \\ (x_3 - \alpha)^2 + (y_3 - \beta)^2 + (z_3 - \gamma)^2 = r^2 \\ (x_4 - \alpha)^2 + (y_4 - \beta)^2 + (z_4 - \gamma)^2 = r^2 \end{cases}$$

La solution à ce système s'obtient grâce à un solveur non-linéaire intégré dans la bibliothèque *numpy*.

Une illustration de cette approche peut se faire en 2D en considérant la définition d'un cercle unique passant par 3 points dans le plan. Ici les points connus sont en noir, une combinaison de 3 points donne le cercle pointillé bleu, une autre donne le cercle pointillé rouge et la solution est le cercle vert dont le centre est la moyenne des deux autres.

⁵ 3 points ou plus ne peuvent pas se trouver sur la même droite sinon aucune solution réelle n'existe.

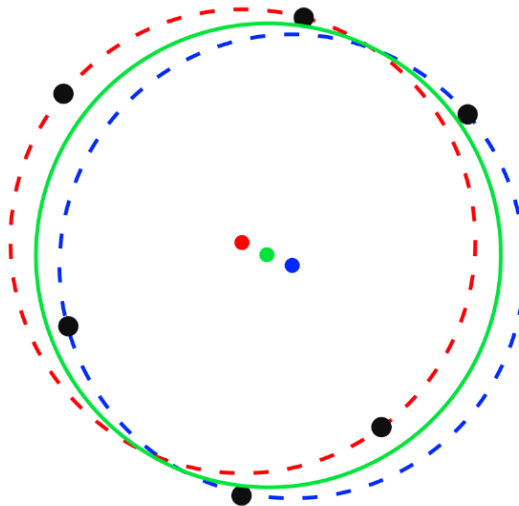


FIGURE 3.24 – Schéma méthode de la définition par 4 point représenté en 2D [illustration de l’auteur]

Le code pour la méthode « définition par 4 points » prend en entrée :

- Pour chaque nœud, un fichier texte comprenant une liste des coordonnées copiées-collées des points sélectionnés depuis le logiciel SCENE (voir FIGURE 3.27),
- `nbreNoeuds` : une variable indiquant le nombre de nœuds présents dans la structure scannée (et donc le nombre de fichiers contenant une liste de coordonnées),
- `nbreCalculs` : une variable indiquant le nombre de systèmes d’équation à résoudre pour chaque nœud (au plus haut, au plus précis), par défaut cette variable égale 200,
- `errLimite` : une variable indiquant la tolérance de l’acceptation des solutions trouvées (au plus faible, au plus précis), par défaut cette variable égale 3mm.

Le code donne en sortie :

- Un fichier texte comprenant une liste des coordonnées des nœuds de la structure (voir FIGURE 3.27),
- Pour chaque nœud, un nombre résultats acceptés comparé au nombre de résultats calculés.

Seconde approche : « Moindres carrés »

- Une seule sphère peut être définie dans l’espace dont sa surface est au plus proche possible des points connus.
- La distance de chaque point à la surface de la sphère est calculée.
- La somme des erreurs au carré pour chaque point est calculée.
- Un solveur intégré dans *scipy* permet de trouver la sphère qui minimise cette erreur et qui est la solution au problème.

Les données sont les n points connus $p_1(x_1, y_1, z_1)$, $p_2(x_2, y_2, z_2)$, ..., $p_n(x_n, y_n, z_n)$ et le rayon r . Le solveur cherche les coordonnées α , β et γ tel que la somme suivante est minimisée.

$$\sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - \alpha)^2 + (y_i - \beta)^2 + (z_i - \gamma)^2} - r)^2$$

Cette seconde méthode s’illustre en 2D comme suit.

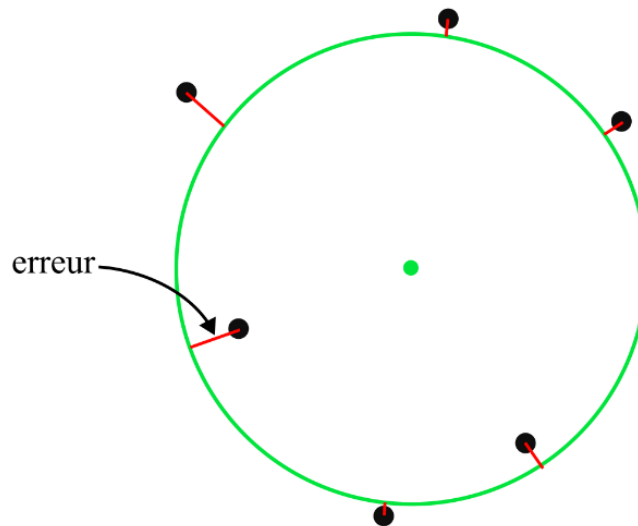


FIGURE 3.25 – Schéma méthode des moindres carrés représentée en 2D [illustration de l’auteur]

Cette seconde méthode a été implémentée par Jonas Feron.

Le code pour la méthode « moindres carrés » prend en entrée :

- Pour chaque nœud, un fichier texte comprenant une liste des coordonnées copiées-collées des points sélectionnés depuis le logiciel SCENE (voir FIGURE 3.27),
- nbreNœuds : une variable indiquant le nombre de nœuds présents dans la structure scannée (et donc le nombre de fichiers contenant une liste de coordonnées).

Le code donne en sortie :

- Un fichier texte comprenant une liste des coordonnées des nœuds de la structure (voir FIGURE 3.27).

Choix de la méthode :

La méthode choisie pour déterminer la géométrie de la structure est l’approche de la définition par 4 points d’une sphère dans l’espace pour une raison : la robustesse. En effet, si un point présent dans la liste a été mal choisi dans le nuage de points et qu’il ne correspond pas à la surface de la boule, comme sur la surface d’un gousset par exemple, il ne doit pas affecter le résultat.

Avec la méthode « définition par 4 points », si un mauvais point est pris en compte dans une des combinaisons de 4 points, la sphère résultante aura un rayon en dehors de la limite fixée par la tolérance. Aucune sphère calculée avec ce mauvais point n’est alors considérée lors du calcul du centre réel de la boule. Avec la méthode des moindres carrés, la grande erreur induite par un mauvais point est minimisée par le solveur. Cela implique le déplacement du centre réel de la boule vers la position de ce mauvais point.

Une illustration en 2D de cette différentiation est visible à la FIGURE 3.26. Pour la première méthode, le cercle (mauve) défini par le mauvais point n’est pas retenu et ne change donc pas la solution (cercle vert). Pour la deuxième méthode, la solution (cercle vert) prenant en compte le mauvais point s’éloigne de la solution plus réaliste (cercle gris).

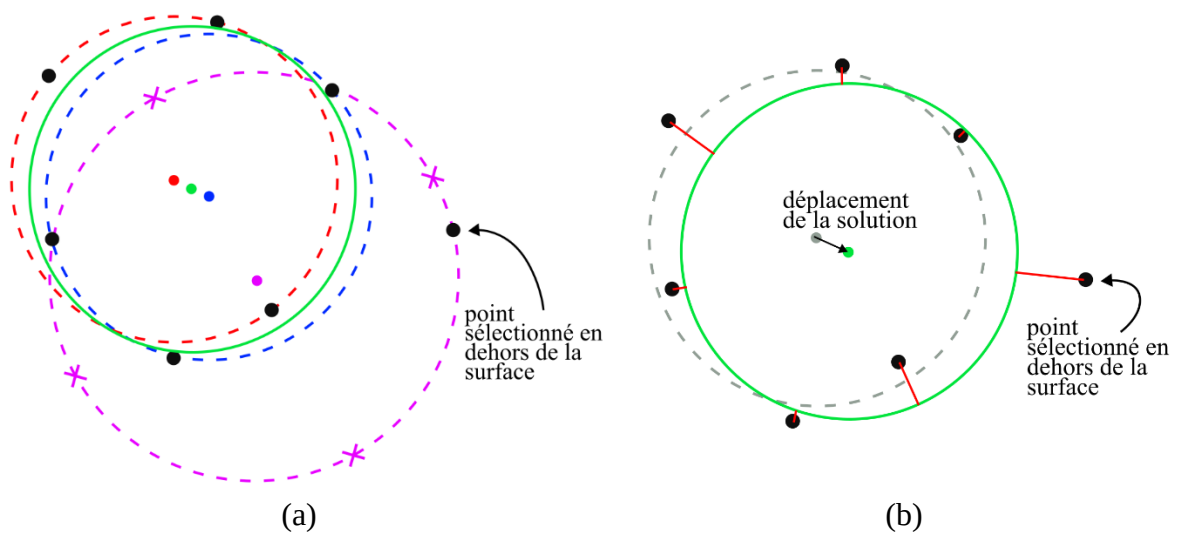


FIGURE 3.26 – influence d'un mauvais point pour l'approche : (a) définition par 4 points (b) moindres carrés [illustration de l'auteur]

Pour des listes de points sélectionnés sans erreur, les résultats des centres de boules des deux méthodes sont similaires⁶. La méthode des moindres carrés est donc utilisée comme vérification de la méthode « définition par 4 points ».

Un exemple de fichiers est visible à la FIGURE 3.27.

Points scannés au noeud 4 - Bloc-notes

Fichier	Edition	Format	Affichage	Aide
2.708395	-1.138266	3.081432		
2.728128	-1.146241	3.085938		
2.745717	-1.134131	3.079055		
2.757431	-1.135819	3.090805		
2.756695	-1.146468	3.108364		
2.738435	-1.157147	3.118867		
2.75661	-1.066947	3.109141		
2.716369	-1.158045	3.116964		
2.755094	-1.073791	3.093033		
2.743459	-1.062828	3.104829		
2.746779	-1.062798	3.129905		
2.729808	-1.059437	3.126428		
2.722763	-1.060251	3.101577		
2.705092	-1.060649	3.113233		
2.685205	-1.078237	3.130736		
2.683771	-1.074618	3.101491		
2.702245	-1.074699	3.088011		
2.694915	-1.117352	3.081882		
2.70013	-1.150396	3.104036		
STOP				

(a)

Résultats coordonnées des noeuds - Bloc-notes

Fichier	Edition	Format	Affichage	Aide
Coordonnées des noeuds de 0 à 9				
-224	-2155	1590		
-279	-350	3042		
-207	11	754		
2679	-1776	888		
2725	-1107	3117		
2685	485	1430		
5644	-2100	1489		
5689	-294	2932		
5536	51	628		

(b)

FIGURE 3.27- Exemple de fichier : (a) créé pour le code (ici pour le nœud 4) (b) résultat renvoyé par le code [illustration de l'auteur]

⁶ Maximum + ou – 1mm de différence dans les directions x, y ou z.

3.2.4 Comparaison des coordonnées numériques et expérimentales

Les coordonnées des points issues du logiciel SCENE sont exprimées dans un repère différent pour chaque scène assemblée car il est défini selon le positionnement du scanner lors du premier scan. Pour que ces coordonnées de points puissent être comparées entre elle et comparées au modèle numérique, il faut procéder à une transformation de repère. L'objectif est de transformer le repère de chaque résultat de test vers le même repère utilisé dans le logiciel numérique *Grasshopper*. Ce dernier étant défini par son origine au nœud 2 (nœud bloqué en x, y et z) et dont la direction x correspond à la direction longitudinale de la structure (voir FIGURE 3.28).

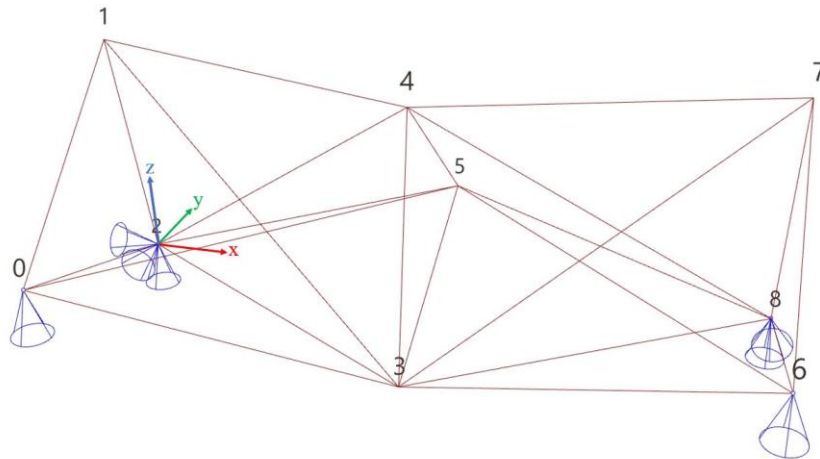


FIGURE 3.28 – Définition du repère dans le modèle numérique [illustration de l'auteur]

La situation initiale, visible à la FIGURE 3.29, est la suivante avec : en rouge pointillé la structure numérique et en vert continu la structure issue des nœuds expérimentaux obtenus précédemment.

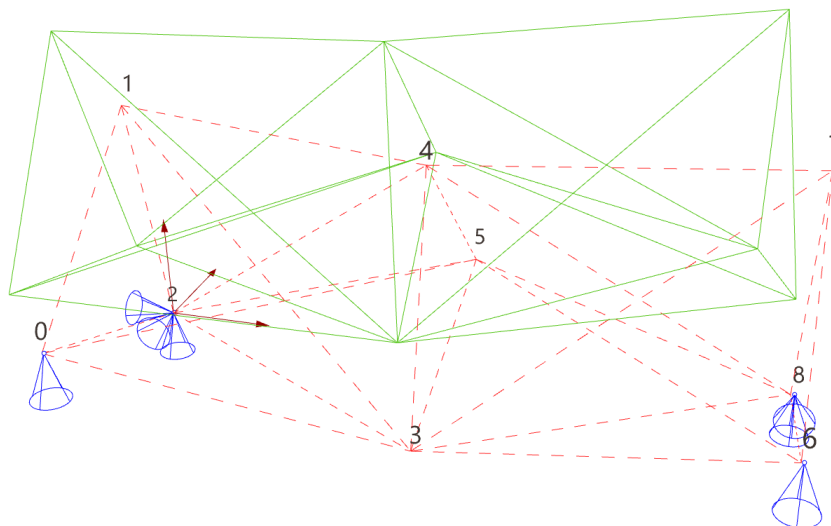


FIGURE 3.29 – Situation avant transformation de repère. Rouge pointillé = numérique. Vert continu = expérimental [illustration de l'auteur]

La transformation de repère est composée d'une translation de chaque nœud et d'une rotation autour du nœud bloqué en x, y et z selon chaque axe. En pratique, cette transformation est réalisée dans le logiciel *Grasshopper*. La translation se fait en soustrayant à chaque point les coordonnées du point numéro 2 de manière à obtenir le même point comme origine (voir FIGURE 3.30).

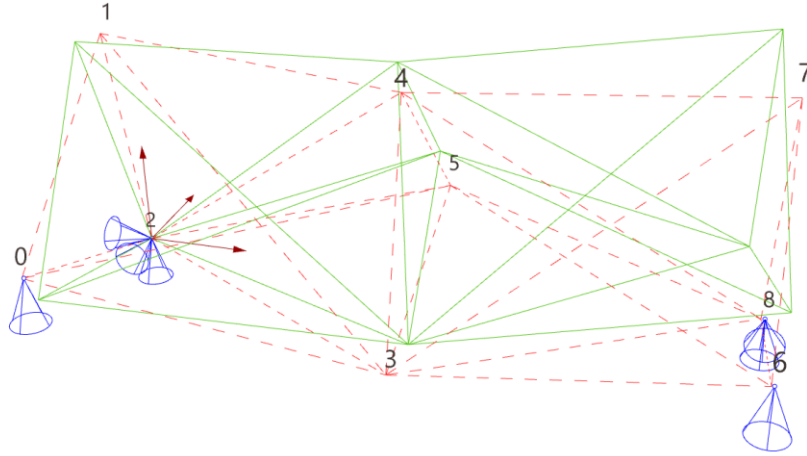


FIGURE 3.30 – Situation après translation. Rouge pointillé = numérique. Vert continu = expérimental
[illustration de l'auteur]

Ensuite, les points expérimentaux subissent une rotation autour de l'origine selon les axes x, y et z. Les rotations autour de chaque axe sont réalisées pour que les points expérimentaux respectent les conditions d'appuis. L'origine {0,0,0} étant au point numéro 2, les conditions à respecter pour les points expérimentaux afin de respecter les conditions d'appuis sont (voir FIGURE 3.31):

- Une hauteur en z fixée à 766mm, 766mm et 0mm pour les points 0, 6 et 8,
- Une position en y fixée à 0mm pour le point 8.

En pratique, un solveur évolutif *Galapagos* est utilisé dans *Grasshopper* pour trouver la bonne combinaison de rotations autour de x, y et z afin que les conditions soient respectées au mieux (voir FIGURE 3.32). Ce dernier trouve la combinaison qui minimise la somme S des erreurs au carré des positions par rapport aux conditions mentionnées.

$$\begin{aligned}
 err_{0,z} &= N0_{\{z\}} - 766 \\
 err_{6,z} &= N6_{\{z\}} - 766 \\
 err_{8,z} &= N8_{\{z\}} - 766 \\
 err_{8,y} &= N8_{\{y\}} - 0 \\
 S &= err_{0,z}^2 + err_{6,z}^2 + err_{8,z}^2 + err_{8,y}^2
 \end{aligned}$$

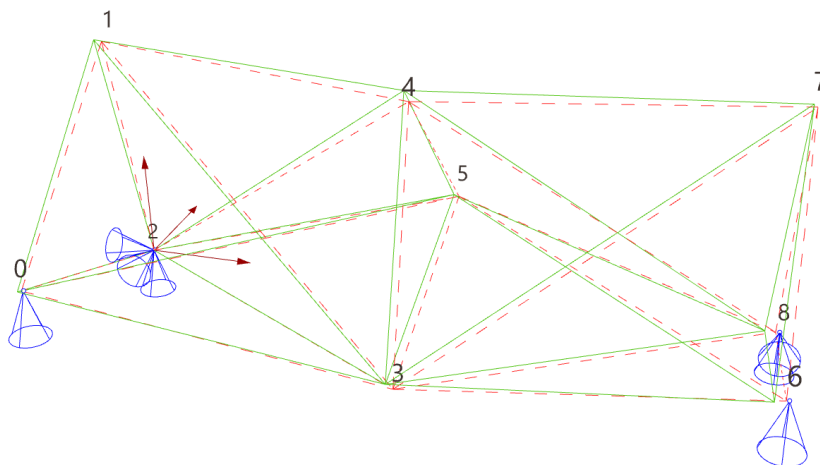


FIGURE 3.31 - Situation après rotations. Rouge pointillé = numérique. Vert continu = expérimental
[illustration de l'auteur]

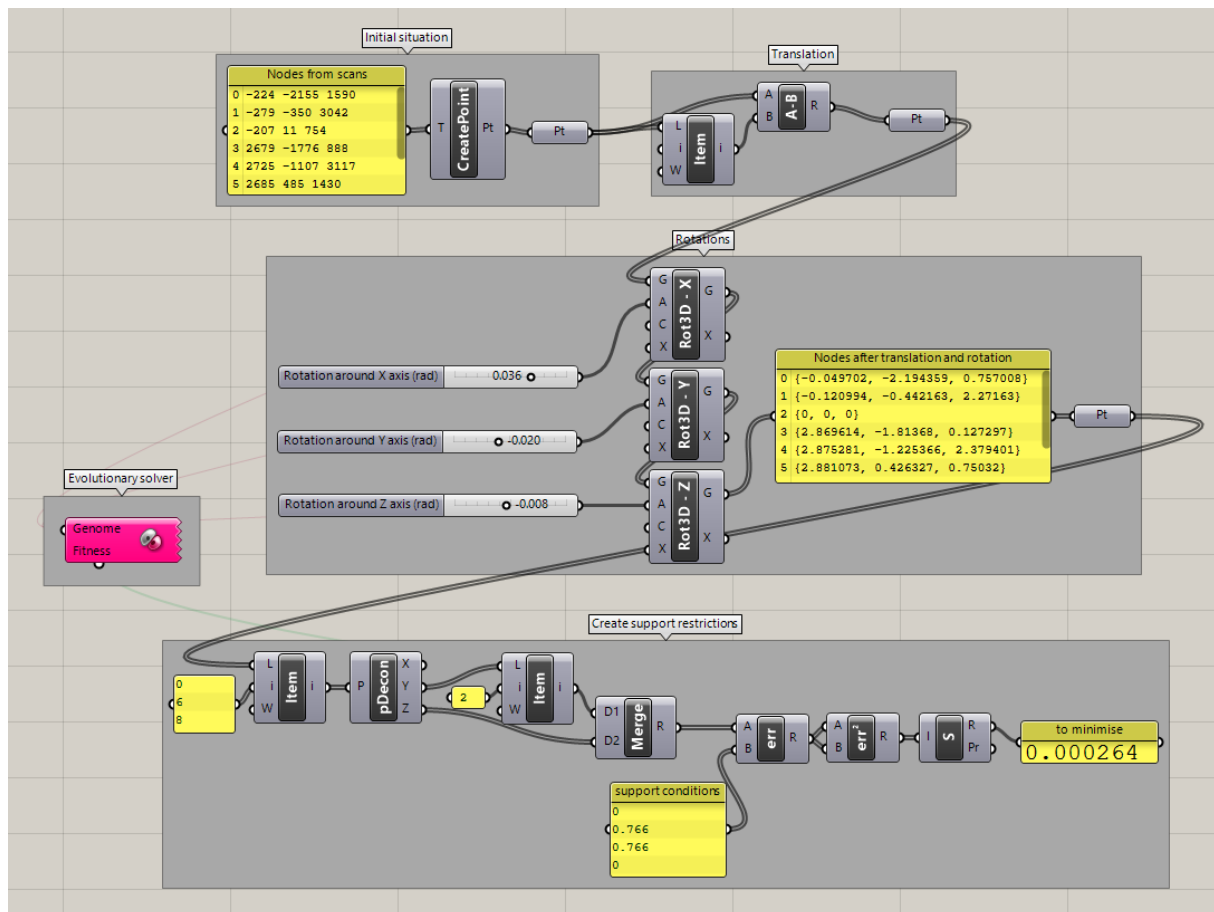


FIGURE 3.32 – Implémentation de la transformation de système de coordonnées dans Grasshopper [illustration de l'auteur]

Ces étapes sont réalisées pour chaque liste de nœuds résultants d'un scan d'une phase de test.

4 EXPÉRIENCES

L'objectif de ce chapitre est de comprendre ce qui se passe réellement dans une structure de tensegrité composée de plusieurs modules lors de la mise en prétension de celle-ci, ainsi que lorsqu'elle est sollicitée.

Les questions à l'origine de ces expériences sont :

- Comment se comporte une structure de tensegrité composée de plusieurs modules assemblés ?
- Quelle est l'influence d'un module sur un autre ?
- Est-il faisable en pratique de mettre une structure de tensegrité en prétension ?

La structure testée composée de 2 modules est visible à la Figure 4.1.

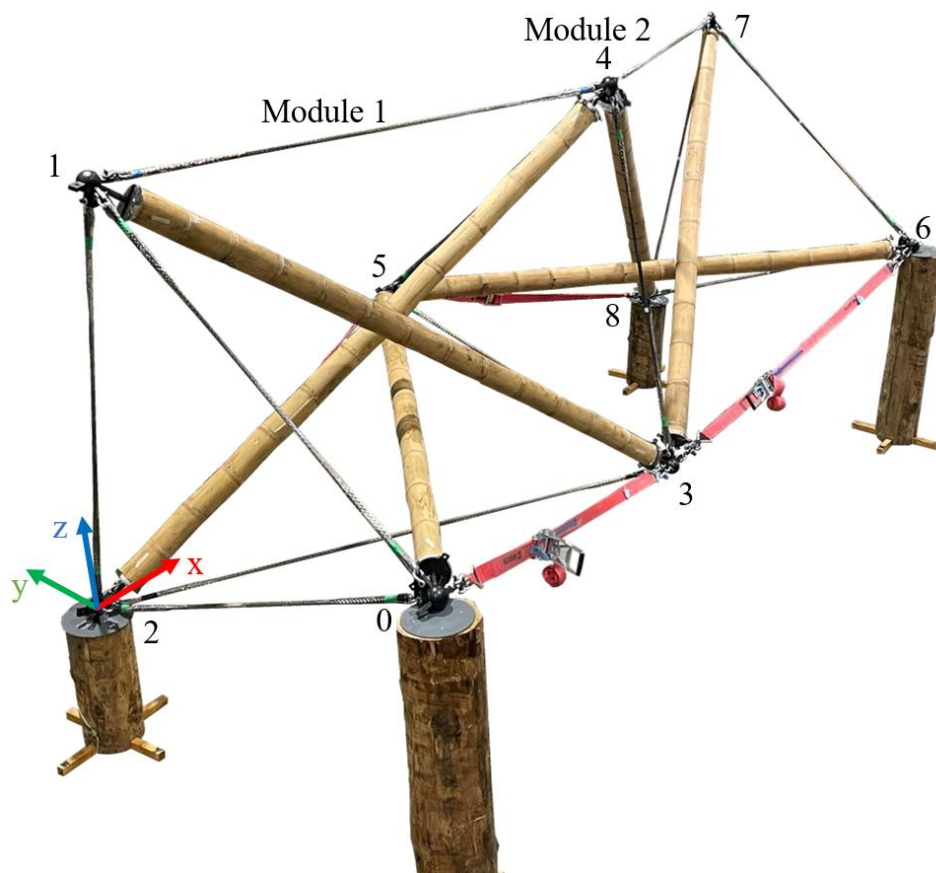


Figure 4.1 – Photo du dispositif expérimental [illustration de l'auteur]

Lors de ces expériences, l'introduction des efforts se fait par deux moyens :

- Raccourcissement de sangle à cliquet : l'introduction de précontrainte se fait en réduisant la longueur de deux sangles à cliquet par module.
- Application force verticale : le chargement de la structure se fait via un chargement nodal en suspendant un dispositif permettant d'y placer des poids (sacs de sable de 25kg et poids en fonte de 8kg), visible à la FIGURE 4.2.



FIGURE 4.2 – Dispositif de chargement d'un nœud [illustration de l'auteur]

L'introduction de précontrainte via les sangles à cliquet est soit contrôlée en force, en regardant la valeur de l'effort traversant le maillon correspondant à la sangle, soit en raccourcissement, en regardant la marque graduée se trouvant sur la sangle. Cependant, le niveau de raccourcissement des sangles est dicté par le cliquet. En effet, ce raccourcissement est fait par incrément de « clic », il est donc impossible de raccourcir la sangle précisément. De plus, le raccourcissement de la sangle par clic n'est pas constant et évolue en fonction de l'enroulement de la sangle dans le cliquet.

Pour la bonne réalisation de ces expériences, trois étapes sont nécessaires :

- Etape 1 : Préparation de l'expérience via le logiciel numérique et réalisation d'un protocole d'essai. Ce protocole d'essai contient l'ordre des étapes des essais, les positions des nœuds à chaque étape ainsi que les efforts attendus dans chaque élément de la structure.
- Etape 2 : La réalisation du test en suivant le protocole d'essai. A chaque étape, il est important de noter les efforts enregistrés par les maillons ainsi que de faire un scan 3D de la structure.
- Etape 3 : Traitement et analyse de chaque essai dans un fichier Excel. Chaque scan de la structure est traité afin de connaître la position des nœuds à chaque étape. Les efforts des maillons et les positions des nœuds sont ensuite comparés avec les résultats numériques attendus.

Les données mesurées sont :

- Les efforts dans les sangles à cliquet,
- La position des nœuds,
- Le raccourcissement des sangles.

Les variables étudiées sont :

- Les efforts,
- Les positions des nœuds,
- Les angles relatifs des deux modules (voir FIGURE 4.3),

- Les flèches/contre-flèches $Z - Z_{init}$ ⁷,
- Les diamètres des bases (voir FIGURE 4.3),
- Les angles de rotation β et γ des plans des bases (voir FIGURE 4.4).

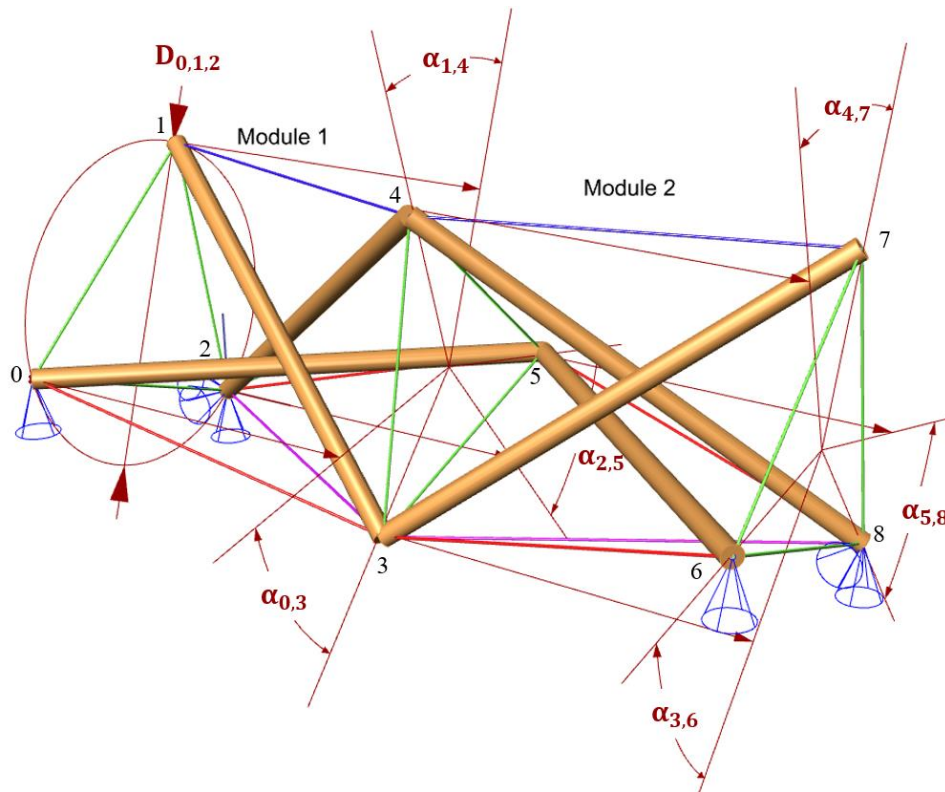


FIGURE 4.3 – Schéma des angles relatifs et diamètres mesurés [illustration de l'auteur]

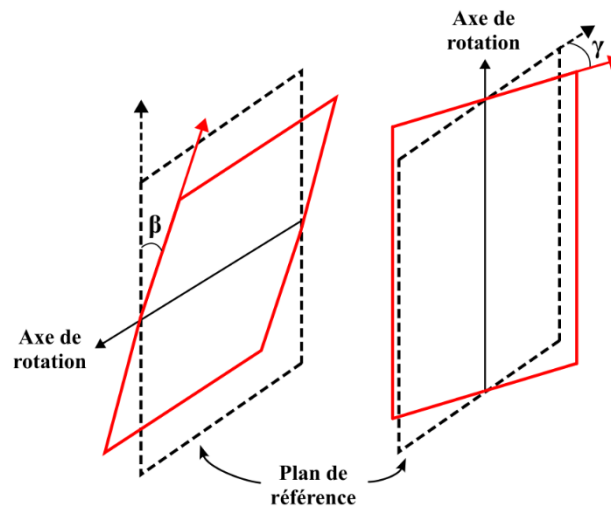


FIGURE 4.4 – Schéma des angles de rotation des plans β et γ par rapport au plan perpendiculaire à la direction de la structure (axe x) [illustration de l'auteur]

La variation de la géométrie implique une variation de l'espace intérieur de la structure, visible à la FIGURE 4.5.

⁷ Position Z du nœud comparé à la position $Z_{initiale}$ issue de la géométrie initiale expérimentale (voir TABLEAU 4.2).



FIGURE 4.5 - Espace intérieur de la structure [illustration de l'auteur]

Dans ce chapitre apparaissent les essais suivants :

- Mise en prétension de structure à 2 modules,
- Chargement uniforme de structure à 2 modules,
- Chargement unilatéral de structure à 2 modules,
- Essai de relaxation durant 5 jours.

4.1 Dispositif expérimental

Les expériences de mise en prétension, de chargement et de relaxation sont portées sur une structure à deux modules. L'origine du repère de la structure se trouve au nœud 2, bloqué selon les 3 axes. L'axe x est l'axe longitudinal de la structure et l'axe y est l'axe transversal. Le dispositif est visible à la Figure 4.1.

Les différents éléments composants la structure à 2 modules sont :

- 9 nœuds,
- 6 barres,
- 9 câbles transversaux,
- 2 câbles longitudinaux,
- 2 câbles additionnels,
- 4 sangles à cliquet.

La numérotation des nœuds sur la base comprenant l'origine est donc 0, 1 et 2. Celle des nœuds sur la base du milieu est 3, 4 et 5. Enfin, celle des nœuds sur la dernière base est 6, 7 et 8.

La numérotation des éléments (visible à la FIGURE 4.6) est donc :

Butons :

- B24 : Buton reliant les nœuds 2 et 4,
- B13 : Buton reliant les nœuds 1 et 3,
- B05 : Buton reliant les nœuds 0 et 5,
- B56 : Buton reliant les nœuds 5 et 6,
- B48 : Buton reliant les nœuds 4 et 8,
- B37 : Buton reliant les nœuds 3 et 7,

Câbles transversaux sur la base comprenant l'origine :

- CT12 : Câble transversal reliant les nœuds 0 et 1,
- CT01 : Câble transversal reliant les nœuds 1 et 2,
- CT02 : Câble transversal reliant les nœuds 0 et 2,

Câbles transversaux sur la seconde base :

- CT45 : Câble transversal reliant les nœuds 4 et 5,
- CT34 : Câble transversal reliant les nœuds 3 et 4,
- CT35 : Câble transversal reliant les nœuds 3 et 5,

Câbles transversaux sur la dernière base :

- CT78 : Câble transversal reliant les nœuds 7 et 8,
- CT67 : Câble transversal reliant les nœuds 6 et 7,
- CT68 : Câble transversal reliant les nœuds 6 et 8,

Câbles longitudinaux :

- CL14 : Câble longitudinal reliant les nœuds 1 et 4,
- CL47 : Câble longitudinal reliant les nœuds 4 et 7,

Câbles additionnels :

- CA23 : Câble additionnel reliant les nœuds 2 et 3,
- CA38 : Câble additionnel reliant les nœuds 3 et 8,

Sangles à cliquet :

- SAC03 : Sangle à cliquet reliant les nœuds 0 et 3,
- SAC25 : Sangle à cliquet reliant les nœuds 2 et 5,
- SAC58 : Sangle à cliquet reliant les nœuds 5 et 8,
- SAC36 : Sangle à cliquet reliant les nœuds 3 et 6.

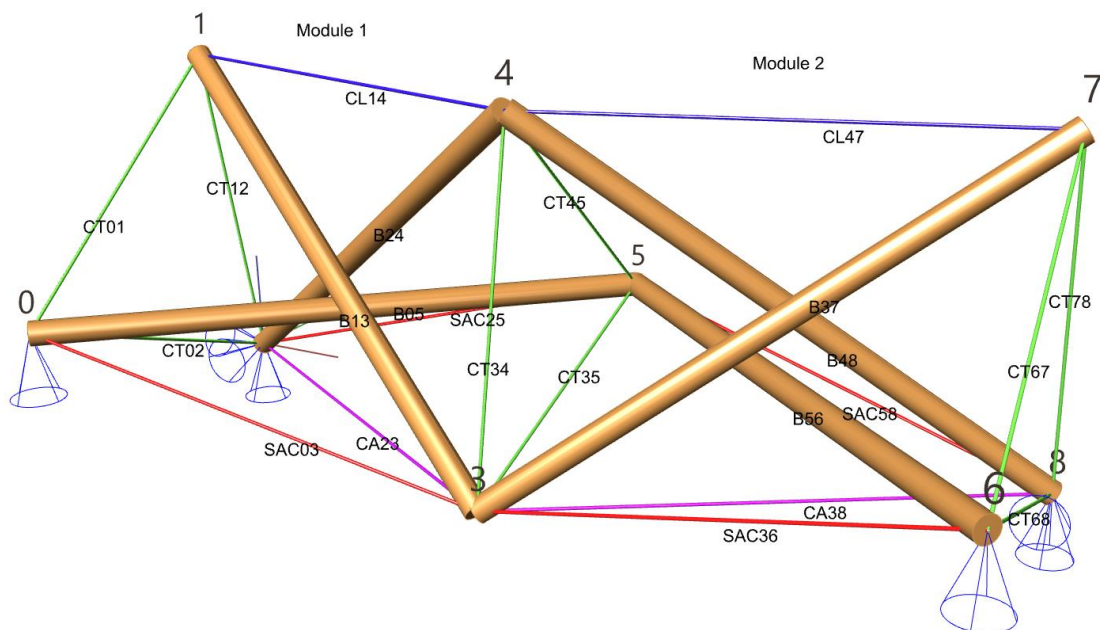


FIGURE 4.6 - Système de numérotation des éléments pour 2 modules [illustration de l'auteur]

Les valeurs utilisées pour le modèle numérique de la structure sont résumées au TABLEAU 4.1.

	Diamètre [mm]	Largeur [mm]	Épaisseur [mm]	Aire [mm ²]	E [GPa]
Buton	160	\	20	8796	8,67
Corde	20	\	\	314	9,00
Sangle	\	75	3,5	262	3,77

TABLEAU 4.1 – Résumé des propriétés des éléments du modèle numérique

4.2 Expériences menées

4.2.1 Mise en prétension de 2 modules

La mise en prétension de la structure à 2 modules est étudiée en 6 étapes :

- Etape 1 : Géométrie initiale de la structure posée sur appuis.
- Etape 2 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC25 jusqu'à $F_{SAC25} = 5,1kN$. Raccourcissement numérique de 36mm.
- Etape 3 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC03 jusqu'à $F_{SAC03} = 8,7kN$. Raccourcissement numérique de 36mm.
- Etape 4 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC58 jusqu'à $F_{SAC58} = 3,6 kN$. Raccourcissement numérique de 36mm.
- Etape 5 : Relaxation de la structure.
- Etape 6 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC36 jusqu'à obtenir la même longueur que SAC_{58} ⁸. Raccourcissement numérique de 36mm.

La géométrie de l'étape 1 correspond à la structure précontrainte afin d'avoir tous les câbles travaillant en tension sous poids-propre posée sur appuis. Numériquement, la prétension initiale provient d'un raccourcissement des sangles de 5mm.

L'étape 5 représente la structure laissée sur appuis pendant 15 heures sans aucune intervention externe. Une perte de tension dans les différentes sangles à cliquet est observée. Il est important de vérifier que la géométrie de la structure n'est pas modifiée. Un essai de relaxation de la structure est étudié à la section 4.2.4.

La comparaison des géométries de l'étape 1 numérique et expérimentale, provenant d'un premier scan, est détaillée aux TABLEAU 4.2, TABLEAU 4.3, TABLEAU 4.4 et TABLEAU 4.5. La FIGURE 4.7 permet de visualiser les deux géométries de l'étape 1.

La comparaison des géométries de l'étape 6 numérique et expérimentale est détaillée aux TABLEAU 4.6, TABLEAU 4.7, TABLEAU 4.8 et TABLEAU 4.9. La FIGURE 4.8 permet de visualiser les deux géométries de l'étape 6.

Les évolutions des différents paramètres lors de l'essai sont visibles aux FIGURE 4.9, FIGURE 4.10, FIGURE 4.11, FIGURE 4.12, FIGURE 4.13, FIGURE 4.14 et FIGURE 4.15.

⁸ Le contrôle en force n'étant pas possible étant donné la perte des efforts observés lors de la relaxation.

Résultats numériques Etape 1				Résultats expérimentaux Etape 1			Distance [mm]
Nœud	x [mm]	y [mm]	z [mm]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	
0	-1	-2163	766	-15	-2181	767	23
1	-5	-419	2256	-51	-428	2262	47
2	0	0	0	0	0	0	0
3	2943	-1725	7	2909	-1744	41	52
4	2943	-1295	2262	2910	-1279	2312	62
5	2943	442	762	2910	446	780	38
6	5886	-2163	766	5829	-2186	764	61
7	5890	-419	2256	5869	-446	2281	42
8	5885	0	0	5820	1	0	65

TABLEAU 4.2 – Position des nœuds – Etape 1

Elément	Résultats numériques Etape 1		Résultats expérimentaux Etape 1	
	L[mm]	F [kN]	L [mm]	F [kN]
B24	3931	-2,14	3931	
B13	3931	-1,22	3928	
B05	3931	-1,2	3932	
B56	3931	-1,2	3930	
B48	3931	-2,14	3931	
B37	3931	-1,22	3932	
CT12	2295	0,36	2303	
CT01	2295	0,26	2305	
CT02	2295	0,49	2312	
CT45	2296	1,46	2308	
CT34	2296	1,25	2318	
CT35	2295	0,19	2311	
CT78	2295	0,36	2326	
CT67	2295	0,26	2309	
CT68	2295	0,49	2317	
CL14	3075	0,95	3081	
CL47	3075	0,95	3074	
SAC25	3072	1,08	3046	1,09
SAC03	3071	0,94	3045	1,23
SAC58	3072	1,08	3045	0,83
SAC36	3071	0,94	3040	0,96
CA23	3411	0,66	3392	
CA38	3411	0,66	3394	

TABLEAU 4.3 – Longueurs et efforts internes des éléments – Etape 1

	Résultats numériques Etape 1	Résultats expérimentaux Etape 1
Nœuds	α [°]	α [°]
0-3	38,6	36,7
1-4	38,7	37,8
2-5	38,8	39,2
Moyenne M1	38,7	37,9
3-6	38,8	39
4-7	37,8	37,3
5-8	38,5	36,3
Moyenne M2	38,4	37,5

TABLEAU 4.4 – Angles relatifs – Etape 1

	Résultats numériques Etape 1			Résultats expérimentaux Etape 1		
Base	D [mm]	β [°]	γ [°]	D [mm]	β [°]	γ [°]
0-1-2	2650	-0,1	0,0	2663	-1,3	0,1
3-4-5	2650	0,0	0,0	2670	0,0	0,0
6-7-8	2650	0,1	0,0	2676	1,3	-0,2

TABLEAU 4.5 – Caractéristiques des bases – Etape 1

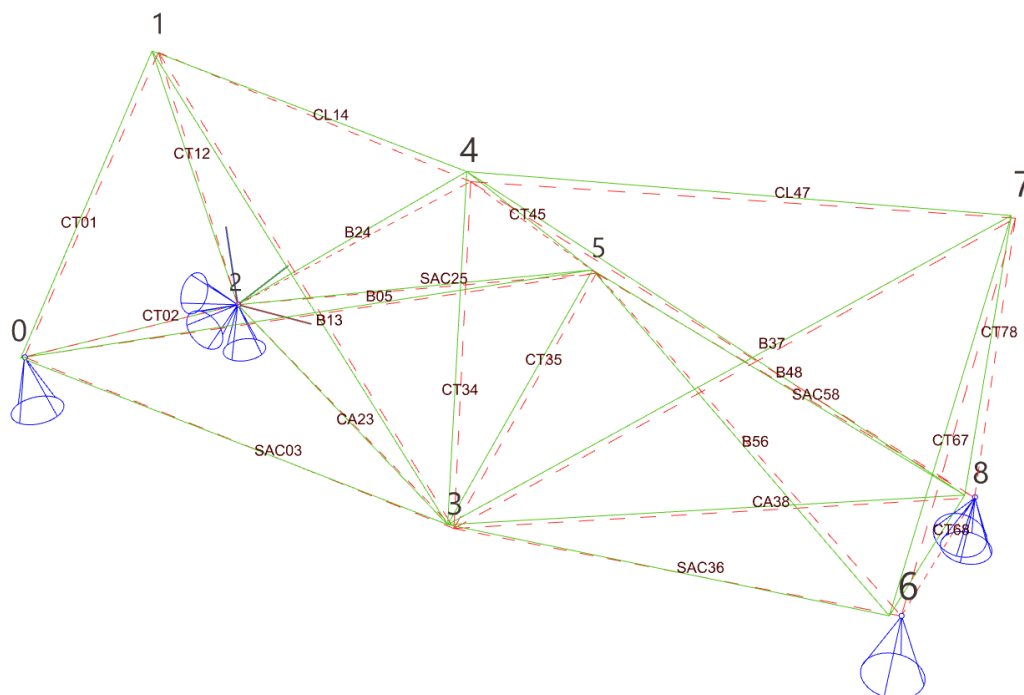


FIGURE 4.7 – Structure étape 1 : numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes

Résultats numériques Etape 6				Résultats expérimentaux Etape 6			Distance [mm]
Nœud	x [mm]	y [mm]	z [mm]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	
0	-14	-2165	766	-35	-2191	769	34
1	-46	-420	2260	-119	-429	2273	75
2	0	0	0	0	0	0	0
3	2928	-1756	65	2877	-1804	141	103
4	2928	-1240	2310	2879	-1197	2388	102
5	2928	441	739	2879	443	747	50
6	5870	-2165	766	5787	-2199	765	90
7	5902	-420	2260	5873	-457	2296	59
8	5856	0	0	5761	0	1	95

TABLEAU 4.6 – Position des nœuds – Etape 6

Elément	Résultats numériques Etape 6		Résultats expérimentaux Etape 6	
	L[mm]	F [kN]	L [mm]	F [kN]
B24	3930	-14,75	3928	
B13	3930	-13,82	3926	
B05	3931	-9,90	3929	
B56	3931	-9,90	3929	
B48	3930	-14,75	3929	
B37	3930	-13,82	3929	
CT12	2299	5,38	2317	
CT01	2298	3,74	2318	
CT02	2297	2,85	2322	
CT45	2301	8,42	2320	
CT34	2304	11,25	2328	
CT35	2299	4,91	2327	
CT78	2299	5,38	2343	
CT67	2298	3,74	2320	
CT68	2297	2,85	2328	
CL14	3085	10,69	3098	
CL47	3085	10,69	3085	
SAC25	3052	7,89	3008	6,11
SAC03	3052	7,72	3004	6,2
SAC58	3052	7,89	3009	6,38
SAC36	3052	7,72	3003	6,44
CA23	3415	4,14	3399	
CA38	3415	4,14	3404	

TABLEAU 4.7 – Longueurs et efforts internes des éléments – Etape 6

	Résultats numériques Etape 6	Résultats expérimentaux Etape 6
Nœuds	α [°]	α [°]
0-3	35,4	31,4
1-4	36,4	34,5
2-5	37,6	37,3
Moyenne M1	36,5	34,4
3-6	37,7	36,6
4-7	36,5	33,6
5-8	35,2	31,4
Moyenne M2	36,5	33,9

TABLEAU 4.8 – Angles relatifs – Etape 6

	Résultats numériques			Résultats expérimentaux		
Base	D [mm]	β [°]	γ [°]	D [mm]	β [°]	γ [°]
0-1-2	2653	-1,2	0,1	2678	-3,0	0,1
3-4-5	2657	0,0	0,0	2685	0,0	0,1
6-7-8	2653	1,2	-0,1	2691	2,9	-0,3

TABLEAU 4.9 – Caractéristiques des bases – Etape 6

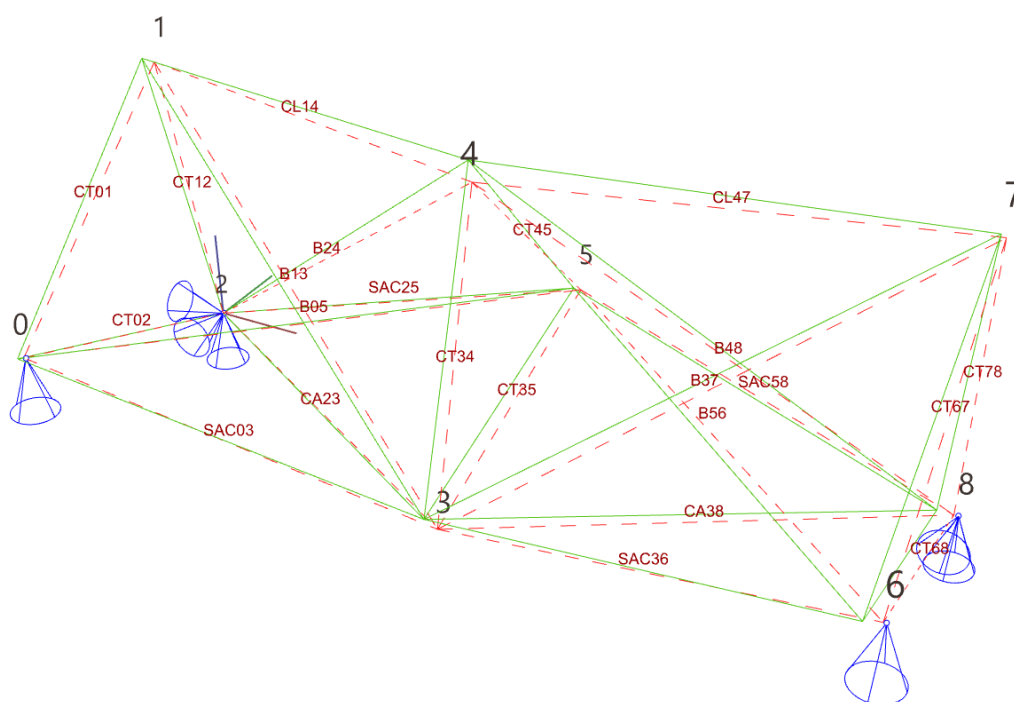


FIGURE 4.8 - Structure étape 6 : numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes

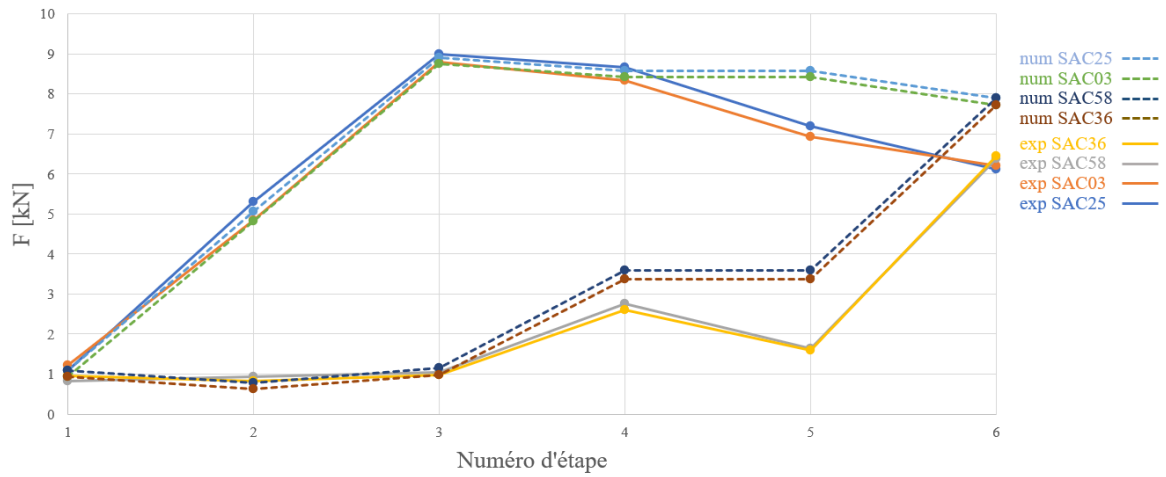


FIGURE 4.9 - Evolution des efforts dans les sangles : numérique en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

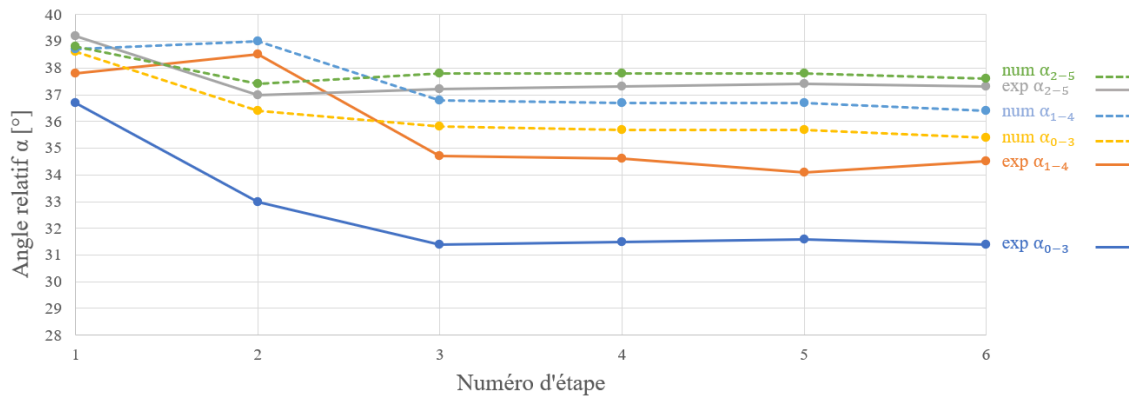


FIGURE 4.10 - Evolution des angles relatifs du module 1 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

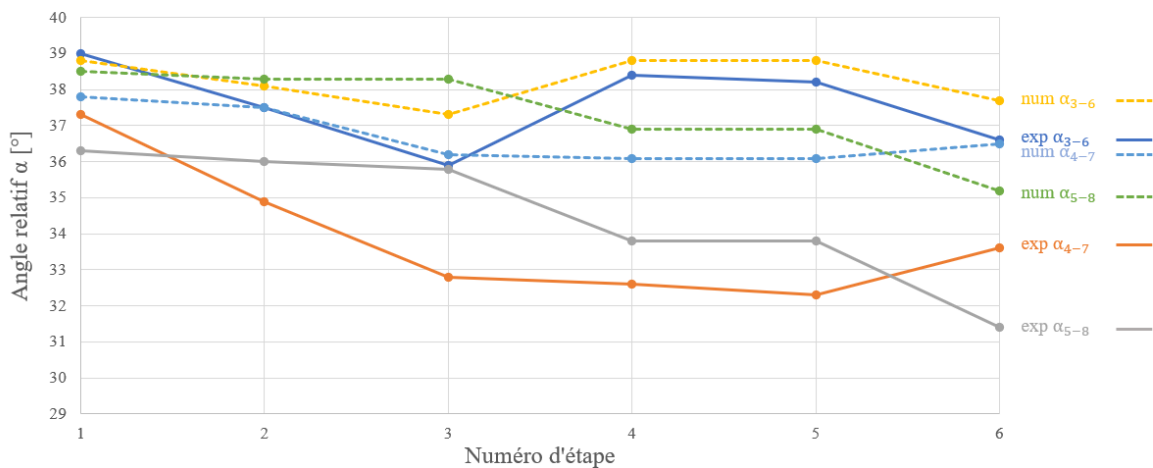


FIGURE 4.11- Evolution des angles relatifs du module 2 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

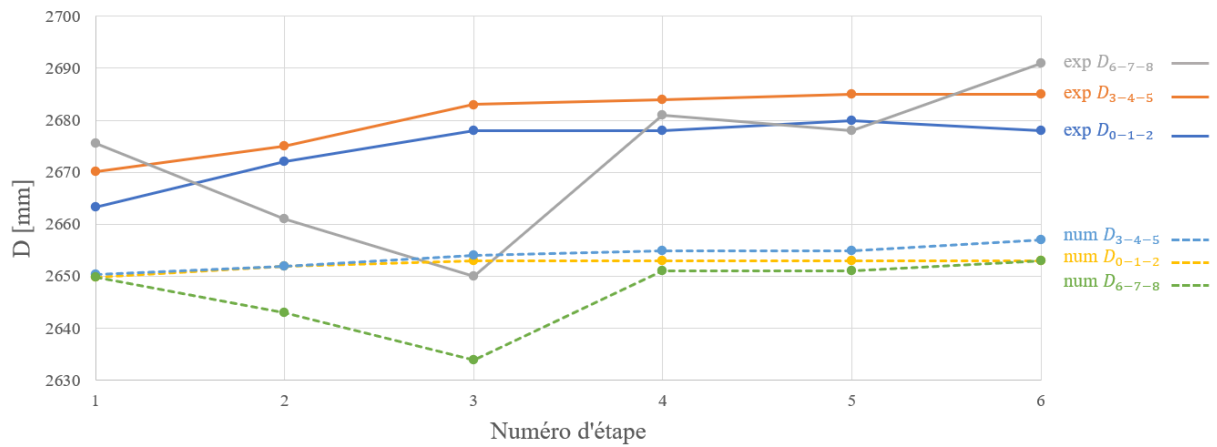


FIGURE 4.12 - Evolution des diamètres des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

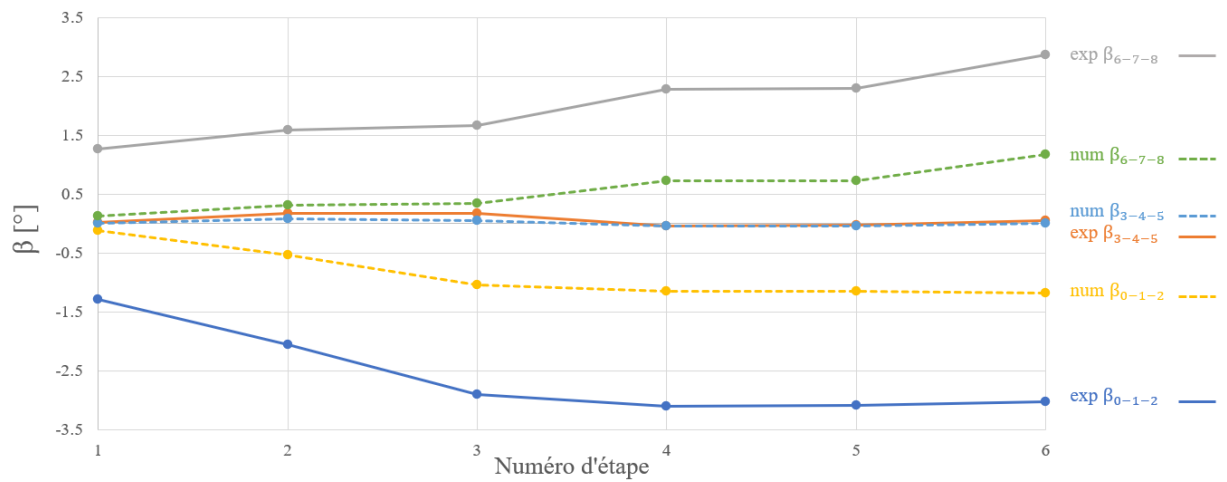


FIGURE 4.13- Evolution des angles β des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

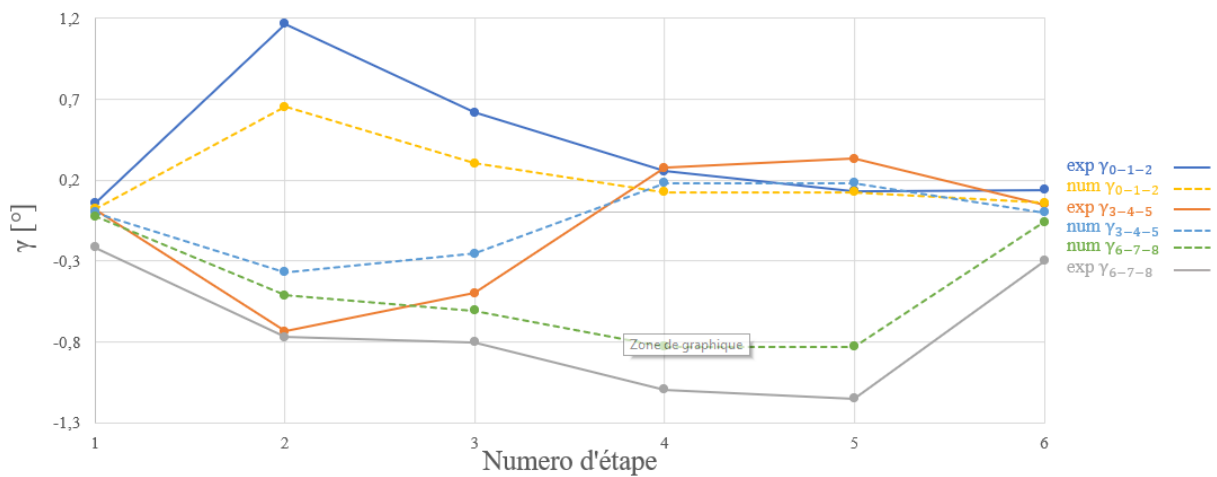


FIGURE 4.14 – Evolution des angles γ des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

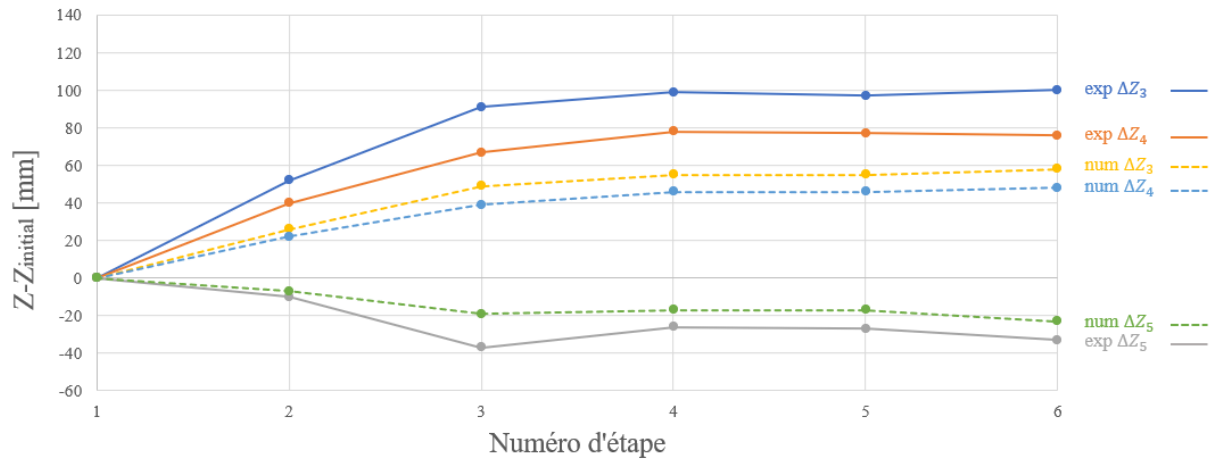


FIGURE 4.15 – Evolution de la coordonnée en z des nœuds de la base du milieu N3, N4 et N5 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

Analyse de l'évolution à chaque étape de l'essai :

Etape 1 : Analyse de la géométrie initiale expérimentale comparée à la géométrie initiale numérique

- La plus grande **distance** entre un nœud numérique et expérimental est celle du N8 et vaut 65mm. La moyenne des distances est de 43mm.
- Les **efforts** atteints dans les sangles sont similaires.
- Les **longueurs des boutons** sont correctes⁹.
- Les **longueurs des cordes longitudinales** sont correctes.
- Les **longueurs des cordes additionnelles** sont en moyenne 18 mm trop courtes, soit une erreur de 0,52%.
- Les **longueurs des cordes transversales** sont en moyenne 17 mm trop grandes, soit une erreur de 0,7%. Par conséquent, les longueurs des sangles doivent être plus courtes afin d'atteindre la situation de précontrainte souhaitée.
- Les **diamètres D** des bases sont donc en moyenne 20mm plus grands.
- Les **longueurs des sangles à cliquet** sont en moyenne 27 mm trop courtes. Les conséquences de ces longueurs trop courtes sont :
 - La longueur de la structure est 65mm plus petite, différence de la coordonnée x entre le N8 numérique et expérimental.
 - La contreflèche de la structure est plus grande.
- La **contreflèche** implique que :
 - La coordonnée en Z du N3 est 34 mm trop grande, l'angle relatif α_{0-3} est donc plus petit.
 - La coordonnée en Z du N4 est 50 mm trop grande, l'angle relatif α_{1-4} est donc plus petit.
 - La coordonnée en Z du N5 est 18 mm trop grande, l'angle relatif α_{2-5} est donc plus grand.

⁹ Le terme « correct » correspond à une tolérance de 0,5%.

- Les **angles β** des bases 0-1-2 et 6-7-8 sont plus grands, les inclinaisons des bases sont plus grandes, conséquence de la contre-flèche trop importante. Cette non-verticalité du plan est également visible sur la FIGURE 4.17.
- L'**angle relatif moyen** expérimental est $0,8^\circ$ plus petit, l'espace intérieur de la structure expérimentale est donc plus grand, la structure « s'ouvre ».

Les analyses précédentes sont représentées à la FIGURE 4.16. La structure expérimentale est représentée en lignes rouges continues.

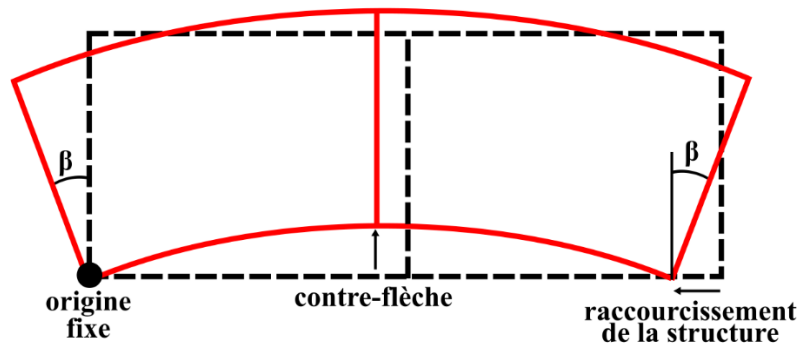


FIGURE 4.16 – Schéma simplifié de la géométrie initiale expérimentale (en rouge) en vue latérale [illustration de l'auteur]

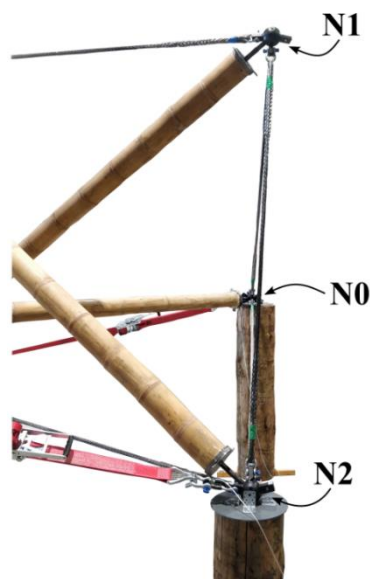


FIGURE 4.17 – Inclinaison β du plan de la base 0-1-2 [illustration de l'auteur]

Etape 1 à 2 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC25 jusqu'à $F_{SAC25} = 5,1kN$

- Les **efforts** dans les SAC25 et SAC03 augmentent de la même façon.
- Les **efforts** dans les SAC36 et SAC58 diminuent légèrement. La structure se déforme ce qui modifie les équilibres des forces aux nœuds.
- Les **angles relatifs** α_{0-3} et α_{2-5} diminuent alors que l'angle relatif α_{1-4} augmente. La structure se « tord », la base du milieu subit une rotation selon l'axe x.
- La **coordonnée en z** des nœuds N3 et N4 augmente alors que celle du nœud N5 diminue. Cela confirme le phénomène de torsion de la structure. La contre-flèche augmente.

- Les **diamètres D** des bases 0-1-2 et 3-4-5 augmentent, cela correspond bien à l'écrasement longitudinal du module 1. Le diamètre D de la base 6-7-8 diminue, conséquence de l'augmentation du diamètre de la base 3-4-5, ces deux bases étant communes au module 2 pas encore prétendu.
- Les **angles β** des bases 0-1-2 et 6-7-8 augmentent (en valeurs absolues), l'inclinaison des bases augmente. Il s'agit d'une conséquence de l'augmentation de la contre-flèche.
- L'**angle γ** de la base 0-1-2 augmente, la base subit une rotation selon l'axe. Les angles γ des bases 3-4-5 et 6-7-8 deviennent négatifs, ces bases subissent donc une rotation selon l'axe z inverse de la base 0-1-2.

Etape 2 à 3 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC03 jusqu'à $F_{SAC03} = 8,7 kN$.

- Les **efforts** des SAC25 et SAC03 augmentent de la même façon.
- Les **angles relatifs** α_{0-3} et α_{1-4} diminuent alors que l'angle relatif α_{2-5} augmente légèrement. Cela s'explique par le fait que la structure se redresse, la base du milieu subit une rotation selon l'axe x.
- La **coordonnée en z** des nœuds N3 et N4 augmente alors que celle du N5 diminue. La contre-flèche augmente.
- Les **diamètres D** des bases 0-1-2 et 3-4-5 augmentent, celui de la base 6-7-8 diminue.
- Les **angles β** des bases 0-1-2 et 6-7-8 augmentent (en valeurs absolues), l'inclinaison des bases augmentent.
- L'**angle γ** de la base 0-1-2 diminue alors que l'angle γ de la base 3-4-5 augmente, les bases tendent à redevenir parallèles.

Etape 3 à 4 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC58 jusqu'à $F_{SAC58} = 3,6 kN$.

- Les **efforts** dans les SAC36 et SAC58 augmentent de la même façon.
- Les **efforts** dans les SAC03 et SAC25 diminuent légèrement. La géométrie de la structure varie donc les équilibres des forces aux nœuds varient.
- Les **angles relatifs**
- La **coordonnée en z** des N3, N4 et N5 augmentent. La contre-flèche augmente.
- La **coordonnée en z** du nœud N6 augmente, le nœud se soulève de l'appui. Il n'est donc pas bloqué selon z. Cette condition est également mise à jour dans le modèle numérique.
- Les **angles β** des bases 0-1-2 et 6-7-8 augmentent (en valeurs absolues), conséquence de l'augmentation de la contre-flèche.
- L'**angle γ** de la base 3-4-5 augmente fortement du au rapprochement de N5 et N8.

Etape 4 à 5 : Relaxation de la structure

- Les **efforts** des SAC25 et SAC03 ont diminué de 1,5 kN, soit 17%.
- Les **efforts** des SAC58 et SAC36 ont diminué de 1 kN, soit 40%.
- La **géométrie** de la structure n'est pas affectée par la relaxation.

Etape 5 à 6 : Structure précontrainte par raccourcissement de SAC36 jusqu'à obtenir la même longueur que SAC58

- Les efforts numériques et expérimentaux ne correspondent plus car le numérique ne prend pas en compte la relaxation.
- Les **efforts** des SAC36 et SAC58 augmentent similairement.

- Les **efforts** des SAC03 et SAC25 diminuent similairement.
- Les **efforts** des 4 sangles correspondent, la prétension est donc bien répartie.
- Les **angles relatifs** α_{3-6} et α_{5-8} diminuent, la base du milieu subit une rotation selon x et le module 2 s'ouvre.
- La **coordonnée en z** du nœud N6 diminue, le nœud est reposé sur l'appui.
- Le **diamètre D** de la base 6-7-8 augmente, cela correspond à l'écrasement longitudinal du module 2.
- L'**angle β** de la base 6-7-8 augmente, cela correspond bien au rapprochement des nœuds N3 et N6.

Conclusion de l'essai de mise en prétension :

- La mise en prétension de la structure à 2 modules est réalisable.
- Les tensions des sangles du module 1 diminuent lors de la mise en prétension des sangles du module 2, et inversement. **La mise en prétension d'un module diminue la prétension de ses modules voisins.** Il s'agit d'une observation très importante pour la mise en prétension de structure de tenségrité composées de plusieurs modules. Il est donc nécessaire de prévoir cette baisse de tension lors de la prétension des sangles d'un module afin d'obtenir la structure prétendue finale souhaitée.
- Les tensions dans les 4 SAC sont plus faibles que prévu numériquement dû à la relaxation des cordes et des sangles lors de l'étape 4. Cette relaxation n'est pas implémentée numériquement.
- Les valeurs numériques et expérimentales ne sont pas exactement similaires pour la plupart des étapes mais les évolutions entre celles-ci le sont. Le comportement d'une structure expérimentale de plusieurs modules correspond au comportement du modèle numérique, l'essai est considéré comme réussi.
- La géométrie expérimentale finale de la structure précontrainte est proche de la géométrie numérique finale, l'essai est considéré comme réussi.
- L'angle β de la base du milieu 3-4-5 reste proche de 0 tout au long de l'essai dû à la symétrie de la structure.
- Les angles γ des différentes bases varient beaucoup lors de l'essai dû à la position des sangles et à la séquence de prétension. Les angles γ de la structure précontrainte finale retourne proche de 0.
- Le câble CT68 est comprimé lors des étapes 2 et 3. Le programme numérique réagit bien à ce phénomène en ne considérant pas le câble.

4.2.2 Chargement uniforme de 2 modules

Le chargement uniforme de la structure est étudié en différent 3 étapes :

- Etape 1 : Structure avec précontrainte initiale de 6 kN¹⁰.
- Etape 2 : Chargement de 160 kg aux N3 et N5.
- Etape 3 : Chargement de 150 kg aux N3 et N5, soit 310kg au total aux N3 et N5.

La comparaison des géométries numérique et expérimentale, provenant d'un premier scan, de la structure précontrainte de 6 kN est détaillée aux TABLEAU 4.10, TABLEAU 4.11, TABLEAU

¹⁰ Structure expérimentale finale de l'essai Mise en prétension de 2 modules et adaptation du modèle numérique afin de diminuer les tensions dans les SAC (relaxation).

4.12 et TABLEAU 4.13. La FIGURE 4.18 permet de visualiser les deux géométries de l'étape 1. Les évolutions des différents paramètres lors de l'essai sont visibles aux FIGURE 4.19, FIGURE 4.20, FIGURE 4.21, FIGURE 4.22, FIGURE 4.23, FIGURE 4.24 et FIGURE 4.25.

Nœud	Résultats numériques Etape 1			Résultats expérimentaux Etape 1			Distance [mm]
	x [mm]	y [mm]	z [mm]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	
0	-11	-2165	766	-35	-2191	769	36
1	-36	-420	2259	-119	-429	2273	85
2	0	0	0	0	0	0	0
3	2932	-1749	52	2877	-1804	141	118
4	2932	-1253	2299	2879	-1197	2388	118
5	2932	442	744	2879	443	747	53
6	5874	-2165	766	5787	-2199	765	93
7	5899	-420	2259	5873	-457	2296	58
8	5863	0	0	5761	0	1	102

TABLEAU 4.10 – Position des nœuds – Etape 1 de l'essai de chargement uniforme

Elément	Résultats numériques Etape 1		Résultats expérimentaux Etape 1	
	L[mm]	F [kN]	L [mm]	F [kN]
B24	3930	-11,61	3928	0
B13	3931	-10,68	3926	0
B05	3931	-7,52	3929	0
B56	3931	-7,52	3929	0
B48	3930	-11,61	3929	0
B37	3931	-10,68	3929	0
CT12	2298	4,18	2317	0
CT01	2297	2,82	2318	0
CT02	2296	2,17	2322	0
CT45	2300	6,57	2320	0
CT34	2302	8,85	2328	0
CT35	2297	3,55	2327	0
CT78	2298	4,18	2343	0
CT67	2297	2,82	2320	0
CT68	2296	2,17	2328	0
CL14	3083	8,28	3098	0
CL47	3083	8,28	3085	0
SAC25	3056	6,03	3008	6,11
SAC03	3056	5,87	3004	6,2
SAC58	3056	6,03	3009	6,38
SAC36	3056	5,87	3003	6,44
CA23	3414	3,44	3399	0
CA38	3414	3,44	3404	0

TABLEAU 4.11 - Longueurs et efforts internes des éléments – Etape 1 de l'essai de chargement uniforme

	Résultats numériques Etape 1	Résultats expérimentaux Etape 1
Nœuds	α [°]	α [°]
0-3	36,1	31,4
1-4	36,9	34,5
2-5	37,9	37,3
Moyenne M1	37	34,4
3-6	37,9	36,6
4-7	37	33,6
5-8	36	31,4
Moyenne M2	38,4	37,5

TABLEAU 4.12 – Angles relatifs – Etape 1 de l'essai de chargement uniforme

	Résultats numériques			Résultats expérimentaux		
Base	D [mm]	β [°]	γ [°]	D [mm]	β [°]	γ [°]
0-1-2	2652	0,9	0,0	2678	3,0	0,1
3-4-5	2655	0,0	0,0	2685	0,0	0,1
6-7-8	2652	0,9	0,0	2691	2,9	0,3

TABLEAU 4.13 - Caractéristiques des bases - Etape 1 de l'essai de chargement uniforme

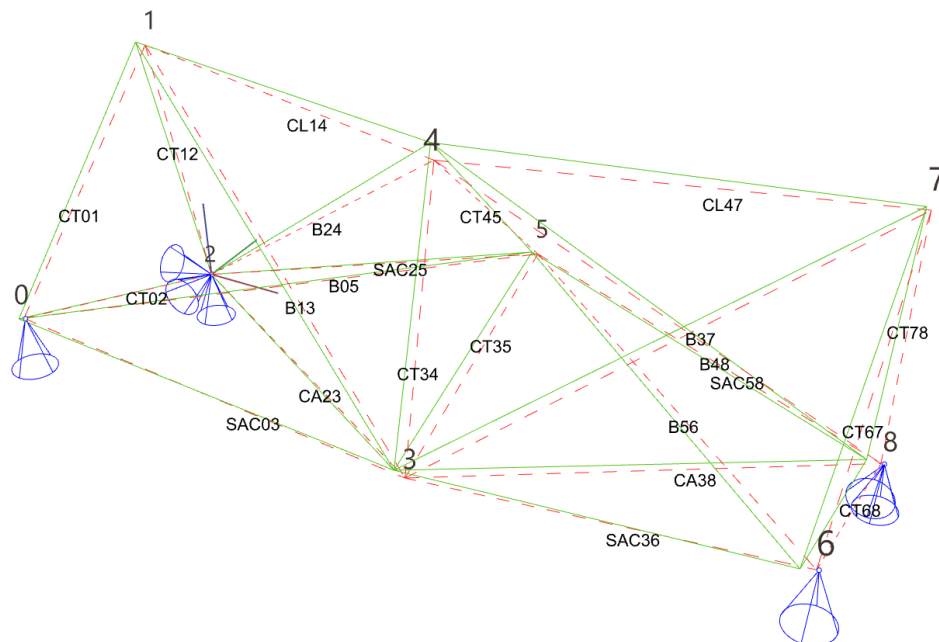


FIGURE 4.18 – Structure précontrainte de 6kN (étape 1): numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes [illustration de l'auteur]

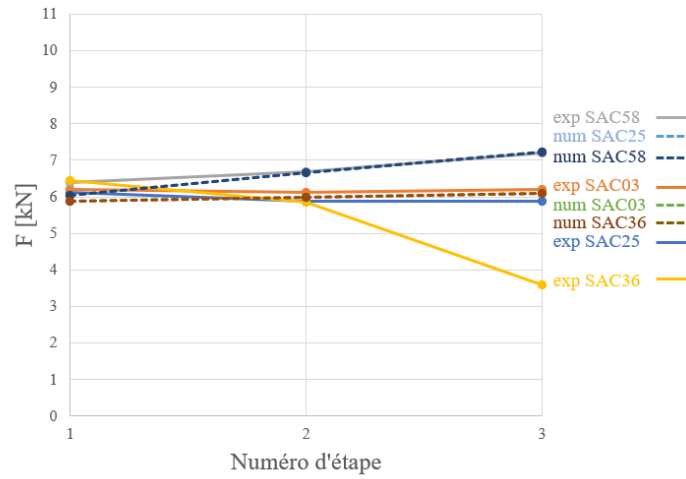


FIGURE 4.19 - Evolution des efforts dans les sangles : numérique en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

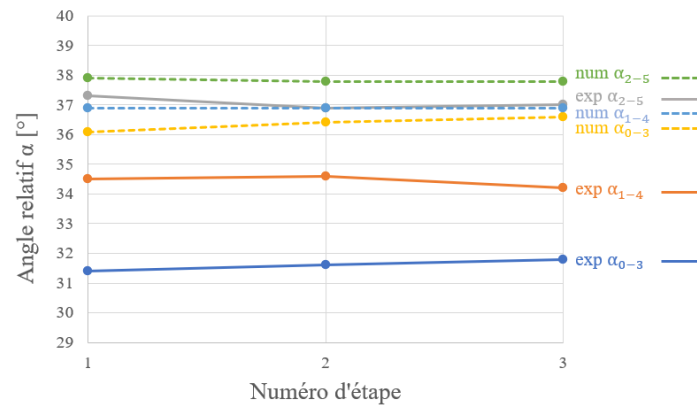


FIGURE 4.20 - Evolution des angles relatifs du module 1 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

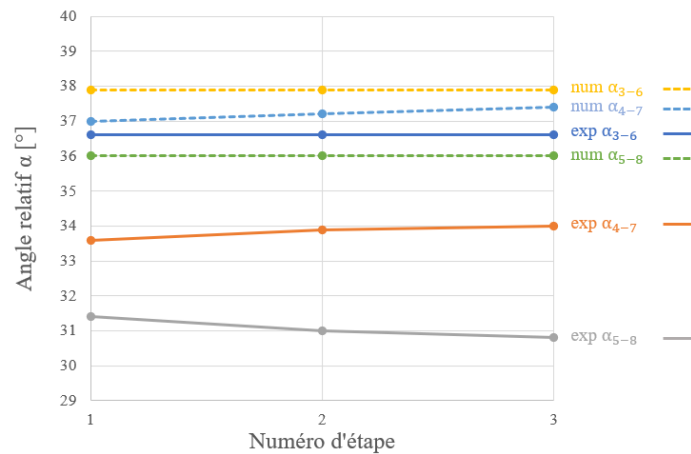


FIGURE 4.21 - Evolution des angles relatifs du module 2 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

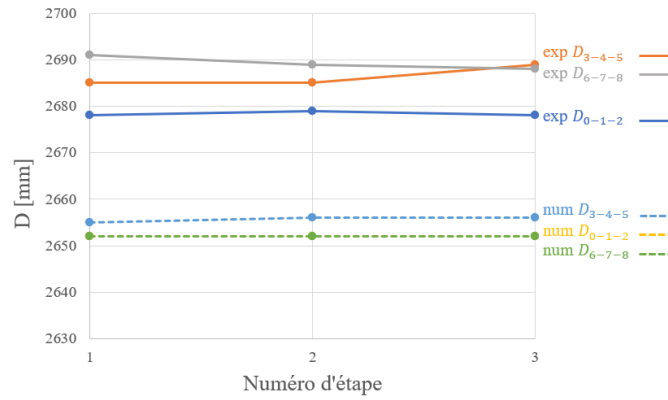


FIGURE 4.22- Evolution des diamètres des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

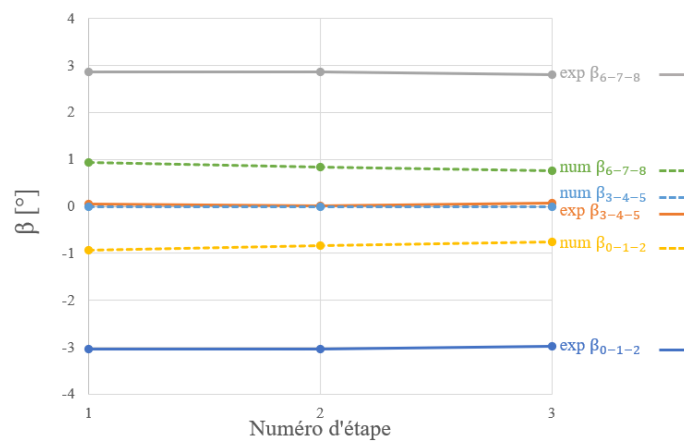


FIGURE 4.23 - Evolution des angles β des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

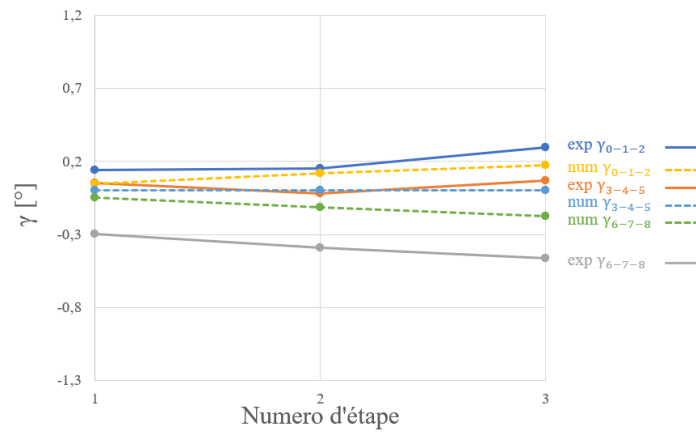


FIGURE 4.24 - Evolution des angles γ des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

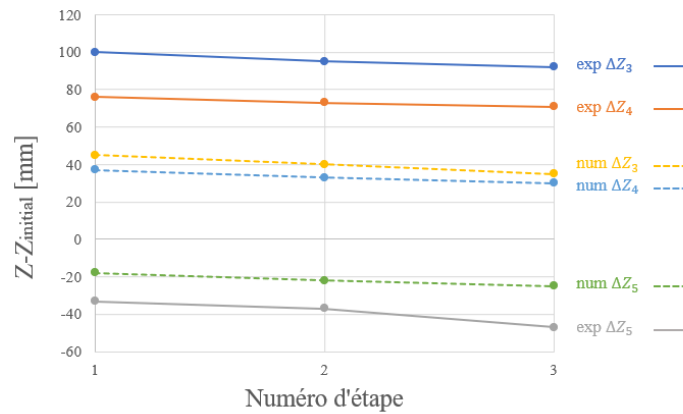


FIGURE 4.25 - Evolution de la coordonnée en z des nœuds de la base du milieu N3, N4 et N5 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

Analyse de l'évolution à chaque étape de l'essai :

Etape 1 : Analyse de la géométrie structure prétendue de 6kN expérimentale comparée à la géométrie structure prétendue de 6kN numérique

- Les **distances** les plus élevées entre un nœud numérique et expérimental sont celles des nœuds N3 et N4, principalement dues à la contre-flèche trop importante et la longueur trop courte des sangles à cliquet.
- Les **efforts** dans les sangles à cliquet sont corrects.
- Les **longueurs des boutons** sont correctes.
- Les **longueurs des cordes transversales** sont en moyenne 26mm trop grandes.
- Les **longueurs des sangles** à cliquet sont en moyenne 50mm trop petites, conséquence des longueurs trop longues des cordes transversales.
- Les **diamètres** des bases est en moyenne 32 mm trop grand comparé au numérique.
- L'**angle relatif moyen** est 2,5° plus petit, l'espace intérieur de la structure expérimentale est donc plus grand, la structure « s'ouvre ».

Etape 1 à 2 : Chargement de 160 kg aux N3 et N5

- Les **efforts** dans les sangles varient peu, à l'exception de la SAC58 qui se tend. La tension dans la SAC25 n'augmente pas, ce qui est contraire à la prévision numérique.
- La **géométrie** est peu impactée par ce chargement.
- Les coordonnées en z des nœuds N3 et N4 diminuent légèrement, la contre-flèche diminue.

Etape 2 à 3 : Chargement de 150 kg aux N3 et N5, soit 360kg au total à chaque nœud

- L'**effort** de la SAC58 augmente, comme prévu par le numérique.
- L'**effort** de la SAC36 est erroné dû à un problème de connectique du capteur de force, cette valeur est donc à rejeter.
- La **géométrie** est peu impactée par ce chargement.

Conclusion de l'essai de chargement uniforme :

- Le comportement de la structure correspond généralement au numérique.
- La géométrie et les efforts dans la structure sont peu impactés par ce chargement de 300kg aux nœuds N3 et N5, il serait nécessaire d'augmenter considérablement la charge pour distinguer des variations.

4.2.3 Chargement unilatéral de 2 modules

Le chargement unilatéral de la structure est étudié en 2 étapes :

- Etape 1 : Structure avec précontrainte initiale de 6 kN.
- Etape 2 : Structure avec chargement de 300 kg au N3.

La structure avec chargement unilatéral est comparée à la structure avec précontrainte de 6 kN détaillée à la section 4.2.2.

Les évolutions des différents paramètres sont visibles aux FIGURE 4.26, FIGURE 4.27, FIGURE 4.28, FIGURE 4.29, FIGURE 4.30, FIGURE 4.31 et FIGURE 4.32.

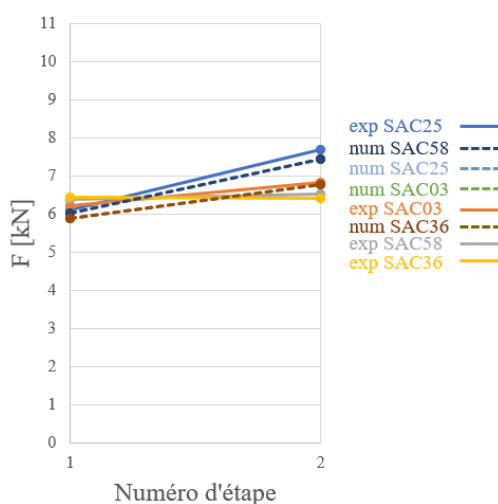


FIGURE 4.26 - Evolution des efforts dans les sangles : numérique en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

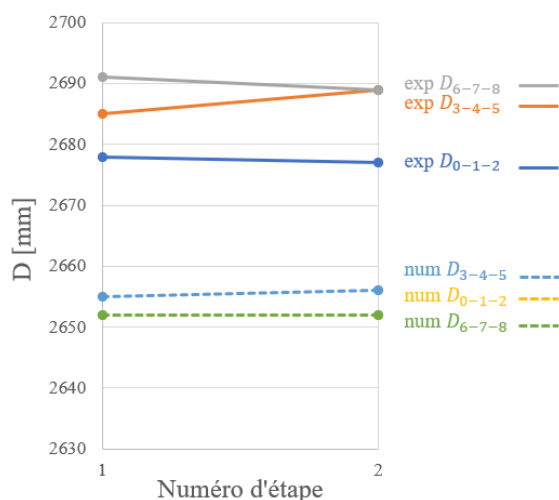


FIGURE 4.27 - Evolution des diamètres des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

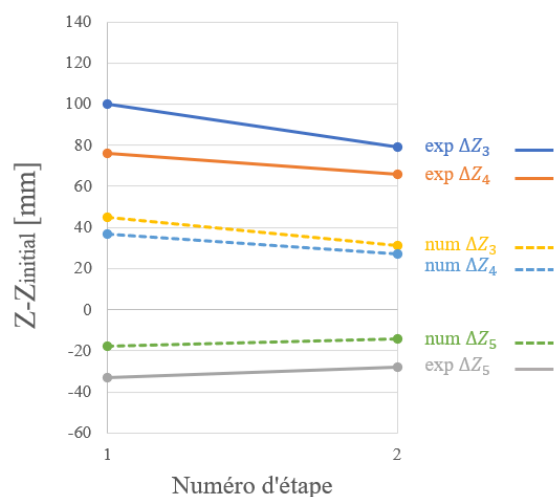


FIGURE 4.28 - Evolution de la coordonnée en z des nœuds de la base du milieu N3, N4 et N5 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

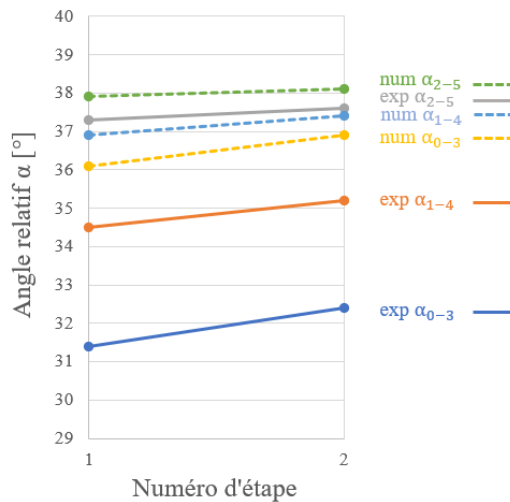


FIGURE 4.29 - Evolution des angles relatifs du module 1 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

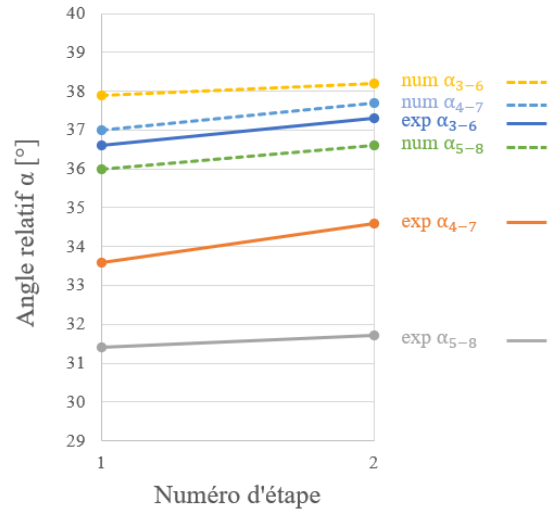


FIGURE 4.30 - Evolution des angles relatifs du module 2 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

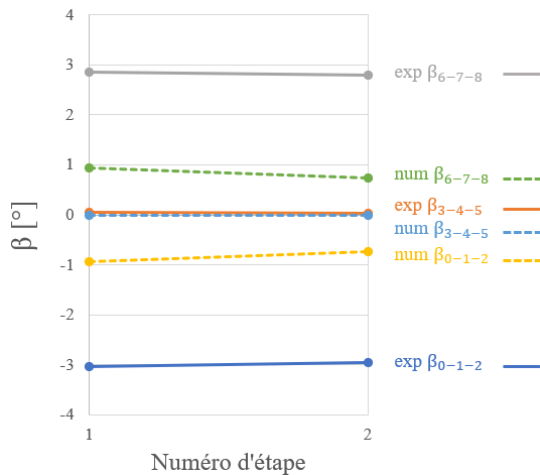


FIGURE 4.31 - Evolution des angles β des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

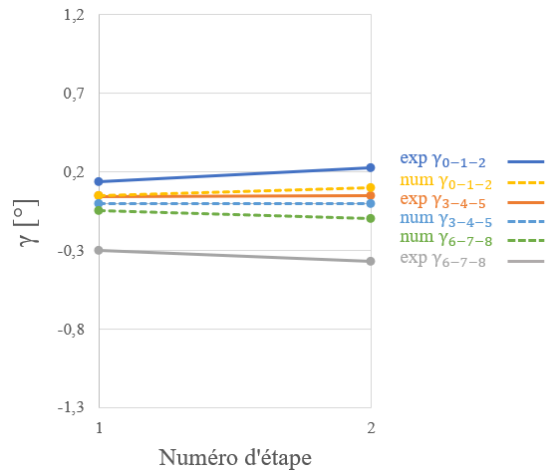


FIGURE 4.32 - Evolution des angles γ des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues

Analyse de l'évolution à chaque étape de l'essai :

Etape 1 à 2 :

- Les angles relatifs augmentent. La base du milieu subit une rotation autour de la direction longitudinale. Cela a pour conséquence de réduire l'espace entre les boutons, la structure se « ferme ».
- Les coordonnées en z des nœuds N3 et N4 diminuent, la contre-flèche diminue.

Conclusion de l'essai de chargement unilatéral :

- Le comportement de la structure expérimentale correspond au comportement numérique.
- Le chargement unilatéral de la structure au nœud N3 a tendance à fermer la structure.

4.2.4 Essai de relaxation de 2 modules

Un effet de relaxation est observé lors de la mise en tension des sangles et des cordes. Cet essai a pour but de comparer la géométrie avant et après relaxation.

La relaxation de la structure est étudiée en 2 étapes :

- Etape 1 : Structure avec précontrainte initiale de 10 kN¹¹.
- Etape 2 : Structure précontrainte après 5 jours.

La comparaison des positions des nœuds à l'étape 1 numérique et expérimentale est visible à la TABLEAU 4.14. Une visualisation de ces géométries se trouve à la FIGURE 4.33.

La comparaison des géométries numérique et expérimentales sont visibles aux TABLEAU 4.15, TABLEAU 4.16 et TABLEAU 4.17. La géométrie numérique ne varie pas entre les deux étapes, la relaxation n'étant pas pris en compte par l'outil numérique. Les géométries expérimentales des étapes 1 et 2 sont détaillées dans les différents tableaux.

Une visualisation de l'évolution des efforts dans les SAC au cours du temps est disponible à la FIGURE 4.34

Nœud	Résultats numériques Etape 1			Résultats expérimentaux Etape 1			Distance [mm]
	x [mm]	y [mm]	z [mm]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	
0	-16	-2166	766	-41	-2197	768	40
1	-56	-420	2261	-144	-433	2274	90
2	0	0	0	0	0	0	0
3	2924	-1763	79	2868	-1822	169	121
4	2924	-1227	2322	2868	-1171	2413	121
5	2924	441	734	2870	445	737	54
6	5865	-2166	766	5770	-2207	765	103
7	5905	-420	2261	5876	-463	2297	63
8	5849	0	0	5743	-2	3	106

TABLEAU 4.14 - Position des nœuds – Etape 1 de l'essai de relaxation

¹¹ La précontrainte de la structure est augmentée à 10 kN en raccourcissant chaque sangle de 10mm.

	Résultats numériques Etapes 1 et 2		Résultats expérimentaux Etape 1		Résultats expérimentaux Etape 2	
Elément	L [mm]	F [kN]	L [mm]	F [kN]	L [mm]	F [kN]
B24	3930	-18,22	3927		3923	
B13	3930	-17,29	3929		3927	
B05	3930	-12,68	3931		3927	
B56	3930	-12,68	3930		3925	
B48	3930	-18,22	3929		3927	
B37	3930	-17,29	3928		3928	
CT12	2300	6,68	2319		2318	
CT01	2298	4,8	2322		2320	
CT02	2298	3,66	2328		2323	
CT45	2303	10,54	2328		2329	
CT34	2306	13,83	2337		2338	
CT35	2300	6,54	2336		2336	
CT78	2300	6,68	2344		2342	
CT67	2298	4,8	2324		2320	
CT68	2298	3,66	2333		2331	
CL14	3088	13,33	3105		3102	
CL47	3088	13,33	3092		3092	
SAC25	3047	10,06	2996	10,12	2995	8,2
SAC03	3047	9,88	2994	10,09	2988	8,5
SAC58	3047	10,06	2998	10,40	2995	7,5
SAC36	3047	9,88	2988	9,81	2984	7,45
CA23	3416	4,79	3402		3398	
CA38	3416	4,79	3407		3404	

TABLEAU 4.15 - Longueurs et efforts internes des éléments – Etapes 1 et 2 de l'essai de relaxation

	Résultats numériques Etapes 1 et 2	Résultats expérimentaux Etape 1	Résultats expérimentaux Etape 2
Nœuds	α [°]	α [°]	α [°]
0-3	34,6	29,9	29,9
1-4	35,9	33,3	33,0
2-5	37,3	36,6	36,7
Moyenne M1	35,9	33,3	33,2
3-6	37,4	36	36
4-7	36,0	32,6	32,8
5-8	34,5	29,6	29,3
Moyenne M2	36	32,7	32,7

TABLEAU 4.16 - Angles relatifs – Etapes 1 et 2 de l'essai de relaxation

	Résultats numériques Etape 1 et 2			Résultats expérimentaux Etape 1			Résultats expérimentaux Etape 2		
Base	D [mm]	β [°]	γ [°]	D [mm]	β [°]	γ [°]	D [mm]	β [°]	γ [°]
0-1-2	2654	-1,4	0,1	2682	-3,7	0,2	2679	-3,7	0,3
3-4-5	2659	0,0	0,0	2695	0,0	0,1	2695	0,0	0,1
6-7-8	2654	1,4	-0,1	2695	3,4	-0,5	2692	3,5	-0,6

TABLEAU 4.17 - Caractéristiques des bases - Etapes 1 et 2 de l'essai de relaxation

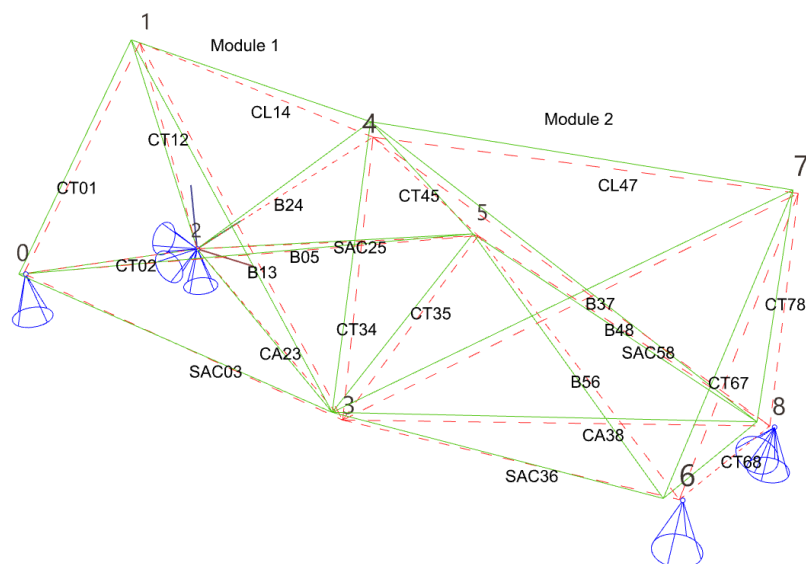


FIGURE 4.33 – Structure précontrainte de 10kN : numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes [illustration de l'auteur]

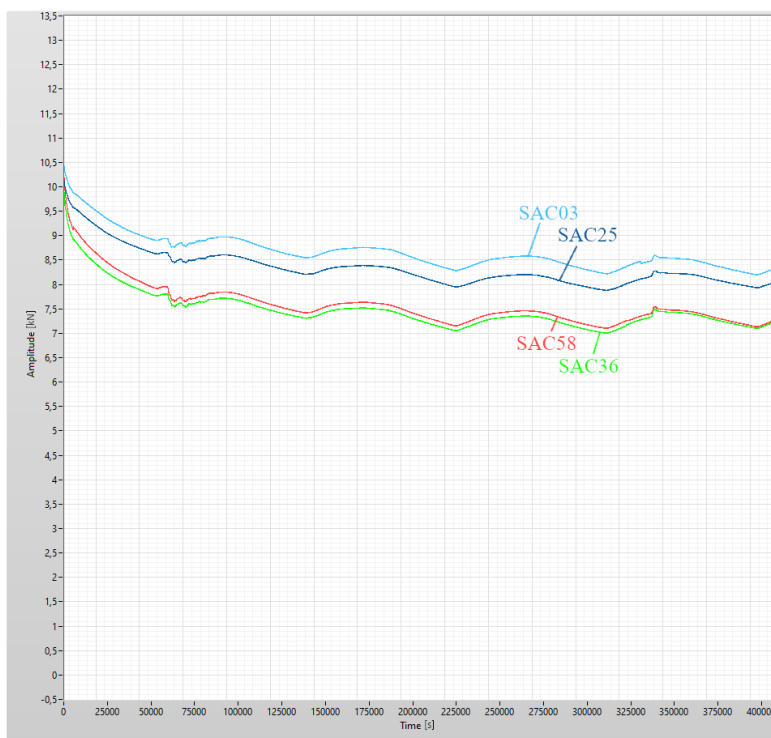


FIGURE 4.34 - Evolution des efforts dans les sangles

Analyse de l'évolution à chaque étape de l'essai :

Etape 1 à 2 :

- Les **efforts** dans les SAC du module 1 diminuent en moyenne de 1,7 kN, soit une perte de tension de 17%.
- Les **efforts** dans les SAC du module 2 diminuent en moyenne de 2,6 kN, soit une perte de tension de 26%.
- La **géométrie** de la structure est peu impactée par la relaxation.

Conclusion de l'essai de relaxation :

- La relaxation des sangles et des cordes a un énorme impact sur les efforts de la structure.
- La variation de géométrie de la structure n'est pas notable, il s'agit d'une relaxation de contrainte caractéristique des matériaux viscoélastiques.
- L'évolution des efforts lors des 5 jours d'essai (voir FIGURE 4.34) montre l'influence de la température sur la structure. Les efforts oscillent sur une période de 24 heures.

4.3 Conclusion des expériences

Les évolutions des efforts internes et des géométries expérimentale et numérique sont très proches, en considérant les erreurs initiales expérimentales (principalement les longueurs des cordes transversales). Cela permet une première validation du programme numérique dans le cas des structures de tenségrité composées de **plusieurs modules**.

La mise en prétension de la structure composée de 2 modules via deux sangles à cliquet placées à la place des câbles longitudinaux inférieurs est validée. Différents points sont à retenir :

- L'influence de la prétension d'un module sur l'autre doit être considéré afin d'avoir la structure finale prétendue souhaitée. La prétension d'un module réduit la prétension du module voisin. Cette influence prédite par le modèle numérique s'est mesurée dans le modèle expérimental. Cette confrontation permet de valider la capacité de la méthode numérique à calculer et prédire le comportement d'une structure de tenségrité composée d'un assemblage de modules.
- L'introduction de prétension par des éléments longitudinaux inférieurs permet d'avoir une contre-flèche importante. Le choix de l'emplacement des systèmes de précontrainte est à considérer pour la réalisation d'une structure surtout pour une passerelle où cet effet est bénéfique.
- L'emplacement des éléments par lesquels la prétension est introduite est importante. Ces éléments doivent être placés symétriquement par rapport au plan vertical longitudinal. Sans cela, la déformation de la structure prétendue n'est pas symétrique. Il est important de prendre en compte ce phénomène lors du design d'une structure de tenségrité composée de plusieurs modules assemblés. Les raccourcissements de chaque sangle d'un module doivent donc être identiques.

L'application de charge réalisée sur la structure à 2 modules ne permet pas l'étude du comportement expérimental de celle-ci. En effet, il est nécessaire d'augmenter le chargement pour déceler des variations notables. Il est important de garder à l'esprit que les modules de la structure à 2 modules sont conçus pour la structure à 5 modules, ayant donc une portée bien plus importante. La structure à 2 modules est donc surdimensionnée pour ce chargement.

L'utilisation de matériaux viscoélastiques n'est pas idéale. Le phénomène de relaxation implique une nécessité de remettre de la prétension dans la structure après un certain délai. La géométrie de la structure est donc sujette à modification lors de la remise en prétension de la structure, ce qui pose problème dans le cadre d'une utilisation à moyen et long terme.

En ce qui concerne la conception de la structure, tous les éléments ont répondu à leurs objectifs permettant de valider la bonne conception de la structure.

- Les nœuds permettant l'assemblage de tous les éléments sont bien rotulés et résistent aux efforts. Les centres de ces nœuds ont bien pu être déterminés.
- Les conditions d'appuis sont correctement réalisées. Les déplacements des nœuds sont bien bloqués dans les directions souhaitées et sont libres dans les autres directions. Les rotations des nœuds sur appuis sont libres, les appuis sont donc bien rotulés.
- Le basculement des appuis est bien empêché lors de la déformation de la structure.
- Les boutons ont résisté à une charge estimée de 18kN. Aucun flambement de ces éléments n'a été observé.
- L'utilisation des sangles limite l'introduction de précontrainte dans les modules.
- L'attache des cordes par épissure résiste aux efforts sans glissement.

5 CONCLUSION

Ce chapitre aborde les pistes d'amélioration de la structure. Il conclue également ce mémoire en présentant notre vision sur ce projet et sur l'avenir de la tenségrité en général.

5.1 Pistes d'amélioration

Structure à 5 modules :

Seuls deux modules sur cinq ont été construits afin de valider le protocole de déploiement et la résistance des éléments. La livraison des 3 derniers modules est prévue pour septembre 2022.

Éléments et matériaux utilisés sur la structure :

L'un des aspects importants d'une structure de tenségrité est la précontrainte à y introduire. L'élément sangle à cliquet utilisé est bien en dessous des attentes en ce qui concerne la prétension qu'il peut introduire. Bien qu'augmentée par un bras de levier, cette faible précontrainte diminue la capacité portante de la passerelle et donc son efficacité. Il est important d'utiliser un système plus puissant permettant de précontraindre la structure. Les pistes du treuil manuel, palan à chaînes et du tendeur sur câble sont à réétudier pour trouver la meilleure solution tout en gardant les avantages d'un élément pouvant être définitif sur la structure. De plus, la faible rigidité des sangles induit une grande déformation de la structure et donc, la compression de la corde longitudinale supérieure lors d'un faible chargement. Il serait donc intéressant d'utiliser un système de mise en prétension plus rigide.

Les cordes peuvent être plus rigidifiées en les prétendant avec une sollicitation initiale de plus de 10 kN. On remarque que les cordes utilisées lors des essais de traction en laboratoire, donc prétendues avec $F=80$ kN, sont 2 fois plus rigides que les cordes utilisées sur la structure. Pour cela, comme l'utilisation de la machine MTS n'est pas envisageable dû aux longueurs importantes des cordes, il serait possible de les prétendre en levant une masse importante (plusieurs tonnes) par le pont roulant du LEMSC en mettant chaque corde en série avec ce dernier. Un grand avantage des épissures étant la capacité d'ajustement des longueurs de ces dernières, l'allongement des cordes suite à une prétension plus importante peut être réintroduit dans les épissures déjà faites. Cela permet donc de bien récupérer les cordes déjà utilisées, sans devoir en recommander.

Il a également été remarqué lors du scan de la structure que les longueurs étaient légèrement trop grandes. Il serait donc intéressant de diminuer ces longueurs en ajustant les épissures de ces cordes.

Propriétés des éléments :

Une meilleure caractérisation des éléments composant la structure permettrait d'améliorer le modèle numérique de la structure et donc, d'améliorer la précision de la comparaison entre les modèles numérique et expérimental.

Les bambous des boutons n'ont pas été caractérisés. Leurs propriétés ont été estimées grâce à une étude réalisée à l'Université de Larenstein aux Pays-Bas. Afin de les caractériser, des échantillons de chaque bambou ont été conservés pour pouvoir les tester au laboratoire. Un bouton complet a aussi été prévu pour réaliser un test au flambement, permettant de définir expérimentalement la résistance au flambement des boutons.

L'analyse de la relaxation des éléments composés de fibre, c'est-à-dire les sangles et les cordes, doit être approfondie afin de mieux prédire le comportement de ces éléments sur la structure.

En effet, ce phénomène induit une grande perte de tension dans la structure au fil du temps, ce qui n'est pas désiré.

Acquisition des données :

Lors des essais expérimentaux, il a été observé à plusieurs reprises des inconsistances dans les données acquises. Les capteurs de force fabriqués avec des maillons et des jauges de déformations sont considérés précis étant donné la conception soignée, les calibrages en laboratoires et les comportements très similaires entre eux. L'élément où l'imprécision survient est très probablement les câbles reliant ces capteurs au système d'acquisition et plus précisément les connections. Il est arrivé à plusieurs reprises que les valeurs d'efforts sautent à $\pm 0,5$ kN lorsqu'un élément de la connectique est touché. À l'avenir, il est nécessaire de réaliser ces connections plus sûrement et en les protégeant d'avantage pour s'assurer une meilleure précision dans la mesure d'efforts d'une structure à 5 modules.

Pour caractériser et étudier la structure expérimentale il est important de connaître les efforts parcourant tous les éléments. Cependant, seules les tensions de 2 éléments par modules ont pu être mesurées pour cette structure. Il est prévu de pouvoir équiper la structure de capteurs de forces en compression aux extrémités de certains boutons. Cela permettrait de s'assurer que la structure se comporte comme le modèle numérique mais surtout avoir une mesure directe de l'effort traversant le bouton. En effet, ce dernier est l'élément ayant le taux de travail le plus élevé et il serait important de s'assurer qu'il ne soit pas sollicité au-delà de sa résistance lorsque la passerelle 5 modules sera chargée. À l'avenir, un programme développé par Jonas FERON permettra de calculer tous les efforts internes d'une structure en connaissant sa géométrie déformée ainsi que quelques efforts en se basant sur les équilibres de force aux nœuds. Cela permettra notamment de connaître les efforts dans les boutons sans ajouter de capteurs supplémentaires aux 10 capteurs de tension actuels.

Enfin, le système d'acquisition actuel doit être démarré avant le montage de la structure et ne peut pas être arrêté tant que les efforts internes sont mesurés. En effet, le système ne peut pas obtenir la tension présente actuellement dans un maillon mais uniquement la variation de tension. C'est pourquoi les maillons sont branchés et zérotés lorsqu'ils sont libres de charge. Si la structure tend à rester construite sur le moyen ou long terme, il est nécessaire d'avoir un outil externe à la structure pouvant mesurer la tension dans les câbles (tensiomètre pour câble portable) et/ou intégrer des capteurs professionnels permettant l'acquisition de données après être déconnectés puis reconnectés.

Calcul du centre des nœuds :

Les deux méthodes permettant de calculer le centre d'un nœud en connaissant les points à sa surface ont permis d'obtenir des résultats réguliers et précis. Il est possible d'allier la robustesse de la méthode « Définition par 4 points » et la rapidité et l'unicité de la solution de méthode « Moindres carrés » en implémentant la méthode des « Carrés les moins coupés » (*least trimmed squares*). Cette méthode, une fois implémentée, calculerait une solution similairement à celle des « Moindres carrés » sans être indûment affectée par la présence de valeurs aberrantes.

Tablier :

Les nœuds aux extrémités de la structure sont prévus pour utiliser des appuis plus complexes permettant de changer l'orientation de la structure. Cette nouvelle orientation permettrait de poser un éventuel tablier au-dessus de la structure. À l'avenir, l'objectif est de passer le tablier à l'intérieur de la structure. Ceci n'est pas encore possible étant donné le trop petit espace intérieur de cette structure qui n'est qu'un modèle à échelle presque réelle.

5.2 Conclusion générale

Ce travail de fin d'étude a pour but de concrétiser les recherches menées depuis plusieurs années au sein de l'EPL concernant les structures de tensegrité. L'avancée de cette année a été de concevoir une structure composée de plusieurs modules, d'inventer une procédure de déploiement et de tester un premier prototype en laboratoire afin de le confronter à un modèle numérique.

Un premier prototype de structure en tensegrité composé de 2 modules a donc été construit. Ce prototype a permis la mise en pratique des solutions proposées aux différentes difficultés de telles structures, notamment celles des nœuds et de la mise en précontrainte de la structure. Les nœuds permettent la connexion de tous les éléments et le chargement de la structure et la précontrainte est introduite via des sangles à cliquet placées au niveau des câbles longitudinaux inférieurs. Ce modèle a également permis la validation du protocole de déploiement, notamment l'assemblage de deux modules, et la réalisation d'une première série de tests.

Le résultat principal des essais réalisés est l'influence d'un module sur un autre lors de sa mise en prétension. En effet, l'essai de mise en prétension a permis de mettre en évidence le fait qu'en prétendant un module d'une structure composée de plusieurs modules, ses modules voisins perdent de la précontrainte. La mise en prétension de certains modules doit donc être plus importante qu'en situation de structure précontrainte finale.

Le déploiement et l'assemblage des modules de tensegrité ont démontré l'avantage qu'ont ces structures. En effet, une structure de tensegrité possède une géométrie complexe qui ne tient pas en équilibre tant que tous les éléments ne sont pas reliés entre eux. Il était donc important d'inventer un système de déploiement à suivre étape par étape pour obtenir une passerelle performante en quelques instants. Il est maintenant possible d'imaginer de telles structures dans des situations où une passerelle temporaire est nécessaire et montée facilement comme sur des chantiers ou lors d'évènements.

Le prochain défi est de continuer ce projet en construisant 3 autres modules pour terminer la réalisation de la passerelle d'une portée de 14,7m composée de 5 modules. Celui-ci montrera la beauté d'une structure de tensegrité avec ses butons flottant sur une longue portée. De plus, l'association de bambou et de cordes marines en fait une structure autant unique par sa forme que par sa conception. Il en résultera un bel objet structurel et architectural qui enfonce les portes pour l'avenir de la tensegrité structurelle à l'EPL, et peut-être au-delà.

ANNEXE A

NOTE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT

ANNEXE A : NOTE DE CALCUL DU DIMENSIONNEMENT

A.1 Bambou des boutons

Cette section détaille le calcul de la résistance du bouton au flambement.

Bambou utilisé :

	Valeur	Unité
Diamètre	160	mm
Epaisseur	20	mm
Longueur flambement	4000	mm

Propriétés mécaniques du bambou Guadua :

	Symbole	Valeur	Unité
Densité	ρ	650	kg/m ³
Module d'élasticité moyen	$E_{0,mean}$	13000	MPa
Module d'élasticité caractéristique	$E_{0,k}$	8666	MPa
Résistance caractéristique à la flexion	$f_{m,0,k}$	85,5	MPa
Résistance caractéristique à la compression axiale	$f_{c,0,k}$	57	MPa

Compression simple avec flambement :

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{1,3} = \frac{57 \cdot 1}{1,3} = 43,85 MPa$$

$$f_{m,0,d} = \frac{f_{m,0,k} \cdot k_{mod}}{1,3} = \frac{85,5 \cdot 1}{1,3} = 65,77 MPa$$

$$A = 8796 mm^2 \quad I = 21990500 mm^4$$

$$\lambda = L_f \cdot \sqrt{\frac{A}{I}} = 4000 \cdot \sqrt{\frac{8796}{21990500}} = 80$$

$$\lambda_{réel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,k}}} = \frac{80}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{57}{8700}} = 2,03$$

$$k = 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (\lambda_{réel} - 0,3) + \lambda_{réel}^2) = 2,73$$

$$k_c = \frac{1}{k + (k^2 - \lambda_{réel}^2)^{0,5}} = 0,22$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{68000}{8796} = 7,73 MPa$$

$$\text{Taux de travail} = \frac{\sigma_{Ed}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} = \frac{7,73}{0,22 \cdot 43,85} = 0,8$$

Flexion due à la courbure du bouton :

$$M_{Ed(ELU)} = N_{Ed} \cdot e = 3,4 kNm$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed} \cdot y}{I} = \frac{3,4 \cdot 10^6 \cdot 80}{21990500} = 12,37 MPa$$

$$\text{Taux de travail} = \frac{\sigma_{Ed}}{f_{m,0,d}} = \frac{12,37}{65,77} = 0,19$$

La somme des taux de travail vaut donc 0,99. La résistance théorique des bambous est donc de 68 kN.

A.2 Plaque butée des bambous

La plaque rigide permet de transmettre la force de butée du bambou vers la tige filetée renforcée. Ses dimensions sont décrites à la Figure A.1. Elle travaille en flexion et sa résistance est vérifiée par calcul en éléments finis.

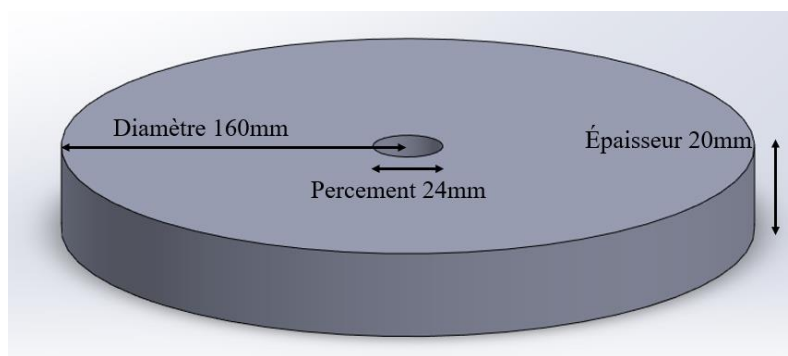


FIGURE A.1 – Dimensions de la plaque rigide

Les appuis sont considérés rotulés au contact entre la plaque et l'écrou (le manchon) et la force de butée du bambou est répartie sur la surface de contact entre le bambou et la plaque. L'effort de 66kN appliqué sur une surface de 8796mm² représente 7,503MPa de contrainte de compression.

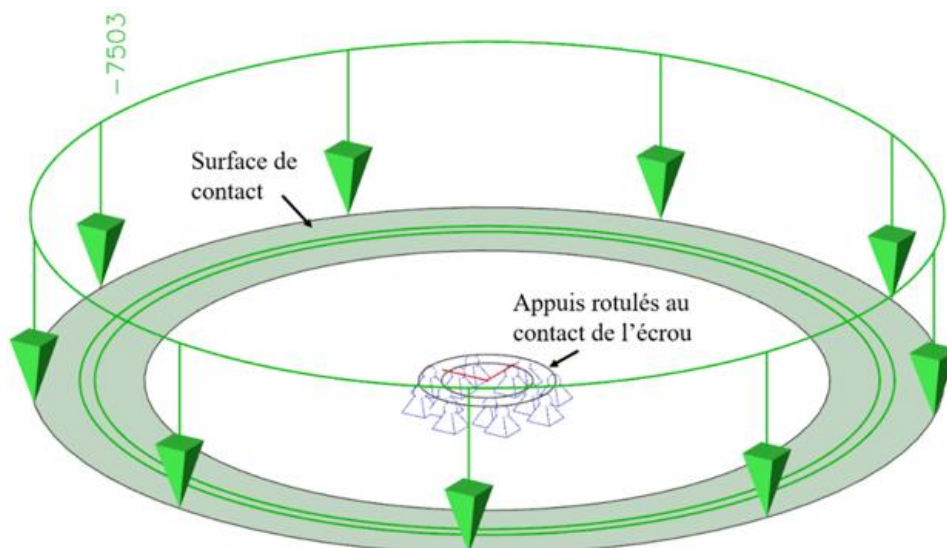


FIGURE A.2 – Hypothèse d'appuis et de chargement

Le calcul en éléments finis avec un maillage généré de 5mm de large donne une sollicitation de Von Mises de $296\text{MPa} < 355\text{MPa}$. La déformation maximale est de 1mm. Elle est négligeable pour considérer un raccourcissement de l'élément buton.

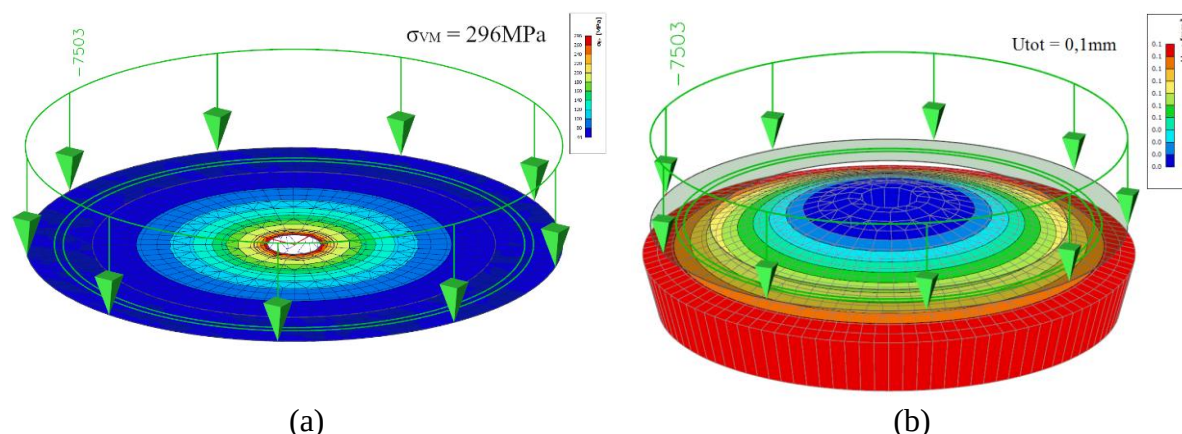


FIGURE A.3 – Résultats (a) contrainte principale (b) déformation

A.3 Tige filetée des boutons

La tige filetée est de classe 8.8, ce qui signifie que la contrainte admissible est $\sigma_{adm}=640\text{MPa}$.

A.3.1 Flexion composée

La tige filetée est renforcée avec des manchons afin de résister à un effort de flexion composée induite par une force de 66 kN avec une excentricité de 10mm.

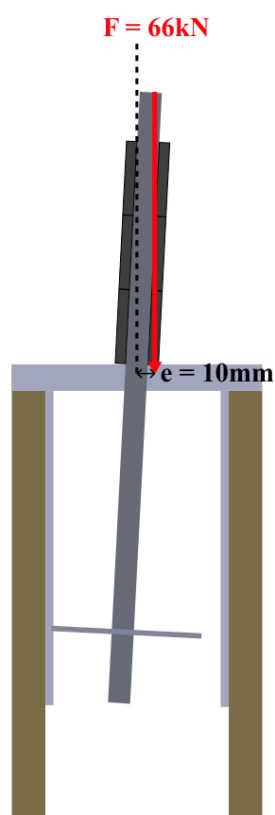


FIGURE A.4 – Schéma excentricité tige filetée

$$N_{Ed} = 66\text{kN}$$

$$e = 10\text{ mm}$$

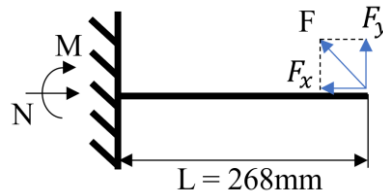
$$A = \frac{\pi 24^2}{4} = 452,4 \text{ mm}^2 \quad I = \frac{\pi 24^4}{64} = 16285,6 \text{ mm}^4$$

$$M_{Ed} = N_{ed}e = 660 \text{ kNmm} \quad y = \frac{24}{2} = 12 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}y}{I} = \frac{66000}{452,4} + \frac{660000 * 12}{16285,6} = 632 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 640 \text{ MPa}$$

A.3.2 Flexion lors du déploiement

Lors du déploiement, la structure est posée sur le sol. La tige filetée est ainsi mise en flexion due à la réaction d'appui. Il est nécessaire qu'elle résiste à cette flexion sans les manchons de renfort.



$$A = \pi * 7^2 = 153,9 \text{ mm}^2 \quad I = \frac{\pi 14^4}{64} = 1885,7 \text{ mm}^4$$

$$F = 640 \text{ N} \quad F_x = F_y = F \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 452,5 \text{ N}$$

$$M = F_y L = 452,5 * 268 = 121270 \text{ Nmm}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{My}{I} = \frac{452,5}{153,9} + \frac{121270 * 7}{1885,7} = 453 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 640 \text{ MPa}$$

A.4 Goussets

A.4.1 Goussets principaux

La sollicitation maximale appliquée aux goussets principaux est $N_{Ed}=61\text{kN}$. La géométrie du gousset est :

- Longueur $L = 70\text{mm}$
- Hauteur $H = 40\text{mm}$
- Epaisseur $t = 20\text{mm}$
- Diamètre alésage $d_0 = 17\text{mm}$
- Diamètre goupille $d = 16\text{mm}$
- Distance centre alésage à extrémité plaque $e_1 = 30\text{mm}$
- Distance centre alésage à extrémité plaque $e_2 = 20\text{mm}$
- Epaisseur cordon de soudure $a = 4\text{mm}$

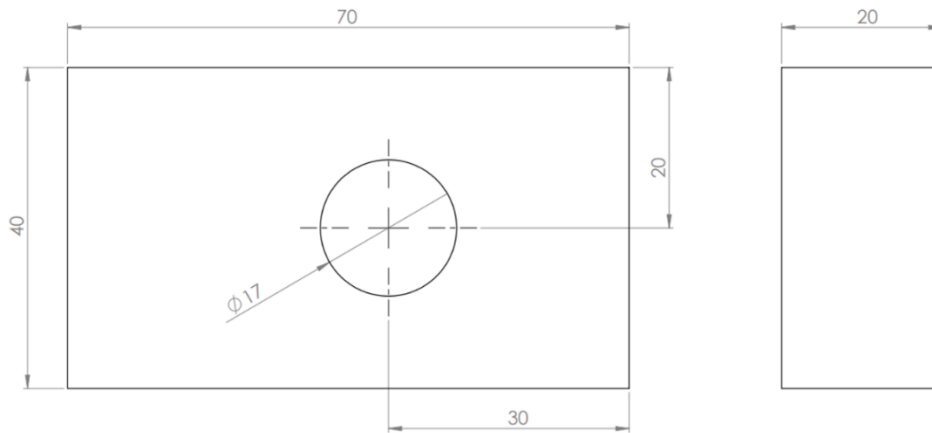


FIGURE A.5 – Dimensions Goussets principaux

1) Résistance à la traction :

Section brute :

$$N_{Ed} < N_{Pl,Rd} = \frac{H \cdot t \cdot f_y}{1} = 284 \text{ kN}$$

Section nette :

$$N_{Ed} < N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot (H - d_0) \cdot t \cdot f_u}{1,25} = 169 \text{ kN}$$

2) Capacité portante :

$$N_{Ed} < N_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{1,25} = 122,4 \text{ kN}$$

avec $\alpha = \frac{d}{3 \cdot e_1} = 0,588$ et $k = \min\left(2,5; \frac{2,8 \cdot e_2}{d} - 1,7\right) = 1,59$

3) Cordon de soudure

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{N_{Ed}}{2\sqrt{2} \cdot a \cdot (H + t)} = 89,9 \text{ MPa}$$

Critère de Von Misses :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} \leq \frac{f_u}{0,8 \cdot 1,25}$$

$$179,7 \text{ MPa} \leq 510 \text{ MPa}$$

Tension :

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{1,25} = 259,2 \text{ MPa}$$

Les goussets principaux résistent à une sollicitation maximale de 122,4 kN.

A.4.2 Goussets triples

Les goussets triples ont la même résistance théorique que les goussets principaux.

A.4.3 Goussets additionnels

La sollicitation maximale appliquée aux goussets principaux est $N_{Ed}=19\text{kN}$. La géométrie du gousset est :

- Longueur $L = 50\text{mm}$
- Hauteur $H = 30\text{mm}$
- Epaisseur $t = 10\text{mm}$
- Diamètre alésage $d_0 = 13\text{mm}$
- Diamètre goupille $d = 12\text{mm}$
- Distance centre alésage à extrémité plaque $e_1 = 16\text{mm}$
- Distance centre alésage à extrémité plaque $e_2 = 15\text{mm}$
- Epaisseur cordon de soudure $a = 4\text{mm}$

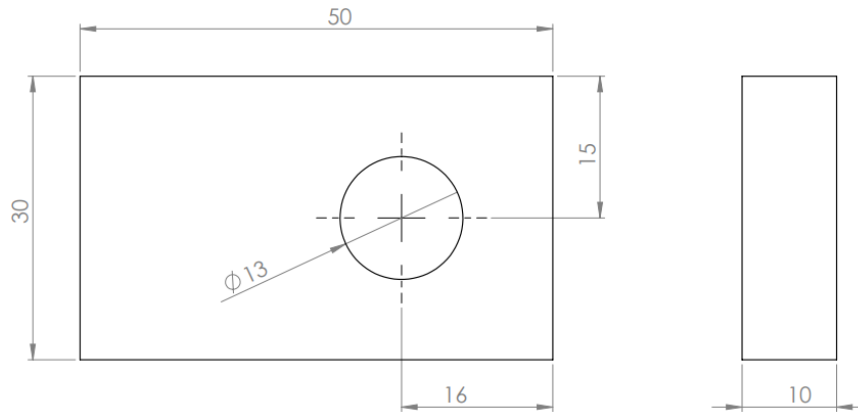


FIGURE A.6 – Dimensions goussets additionnels

1) Résistance à la traction :

Section brute :

$$N_{Ed} < N_{Pl,Rd} = \frac{H \cdot t \cdot f_y}{1} = 106,5\text{kN}$$

Section nette :

$$N_{Ed} < N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot (H - d_0) \cdot t \cdot f_u}{1,25} = 62,4\text{kN}$$

2) Capacité portante :

$$N_{Ed} < N_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{1,25} = 30,75\text{kN}$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{d}{3 \cdot e_1} = 0,41 \text{ et } k = \min\left(2,5; \frac{2,8 \cdot e_2}{d} - 1,7\right) = 1,53$$

3) Cordon de soudure

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{N_{Ed}}{2\sqrt{2} \cdot a \cdot (H + t)} = 42 \text{ MPa}$$

Critère de Von Misses :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot \tau_{\perp}^2} \leq \frac{f_u}{0,8 \cdot 1,25}$$

$$89,9 \text{ MPa} \leq 510 \text{ MPa}$$

Tension :

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{1,25} = 367,2 \text{ MPa}$$

Les goussets principaux résistent à une sollicitation maximale de 30,75 kN.

A.5 Appuis

A.5.1 Hauteurs d'appuis

Les hauteurs des appuis sont déterminées par 2 paramètres :

- L'encombrement du chargement suspendu aux nœuds bas
- La différence de hauteur entre les deux nœuds

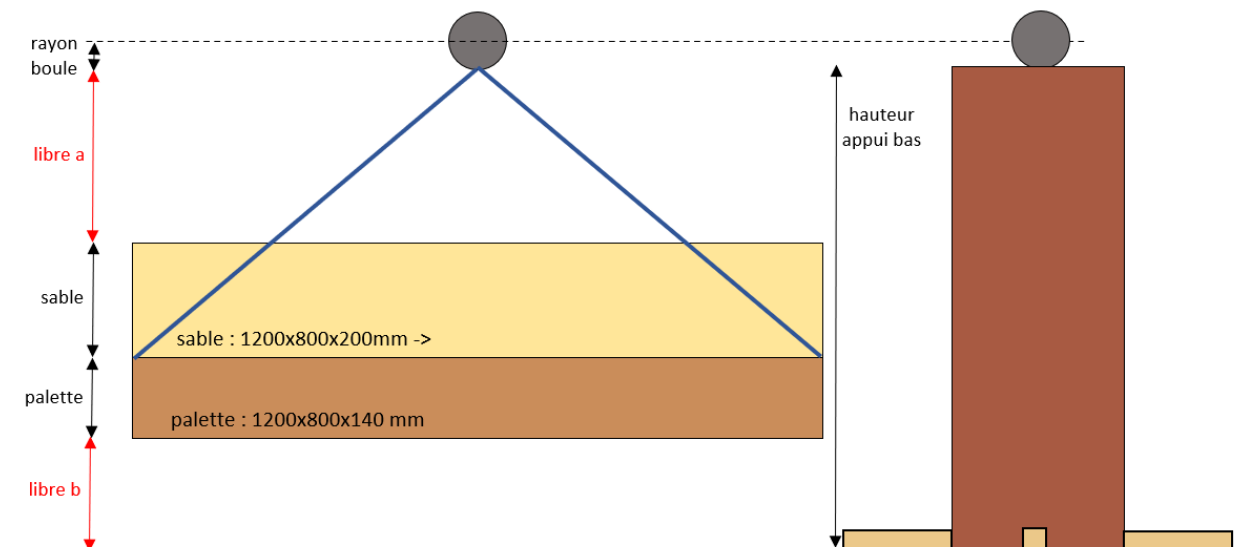


FIGURE A.7 – Schéma hauteur appuis

Encombrement chargement suspendu	
boule	50 mm
espace libre a	300 mm
sable	200 mm
palette	140 mm
espace libre b	120 mm

La hauteur du nœud bas doit donc être de 810mm, la hauteur de l'appui est de 760mm.

La différence de hauteur entre les appuis hauts et bas doit être de 780mm, la hauteur de l'appui haut doit donc être de 1590mm.

A.5.2 Basculement

Le basculement des appuis est étudié afin de ne pas avoir d'effondrement de la structure lorsqu'elle est précontrainte et chargée.

Les appuis sont dimensionnés pour la structure à 5 modules tel que:

Cas de charge	Charge au nœud [kg]	Chargement	Réaction aux appuis		Déplacement du nœud	
			Appuis bas [kN]	Appuis haut [kN]	Appuis bas [mm]	Appuis haut [mm]
ELS	300	Complet	7,8	4,2	52	26
ELU	450	Complet	11,6	6,1	78	41

Le coefficient d'adhérence (plus grand que le coefficient de frottement) utilisé est $\mu_0 = 0,14$.

Le dépassement des pieds en bois x vaut 200mm. On considère une contrainte admissible en flexion des pieds en bois $\sigma_{adm} = 60 \text{ MPa}$, valeur provenant des tests réalisés chaque année dans le cadre du projet P4.

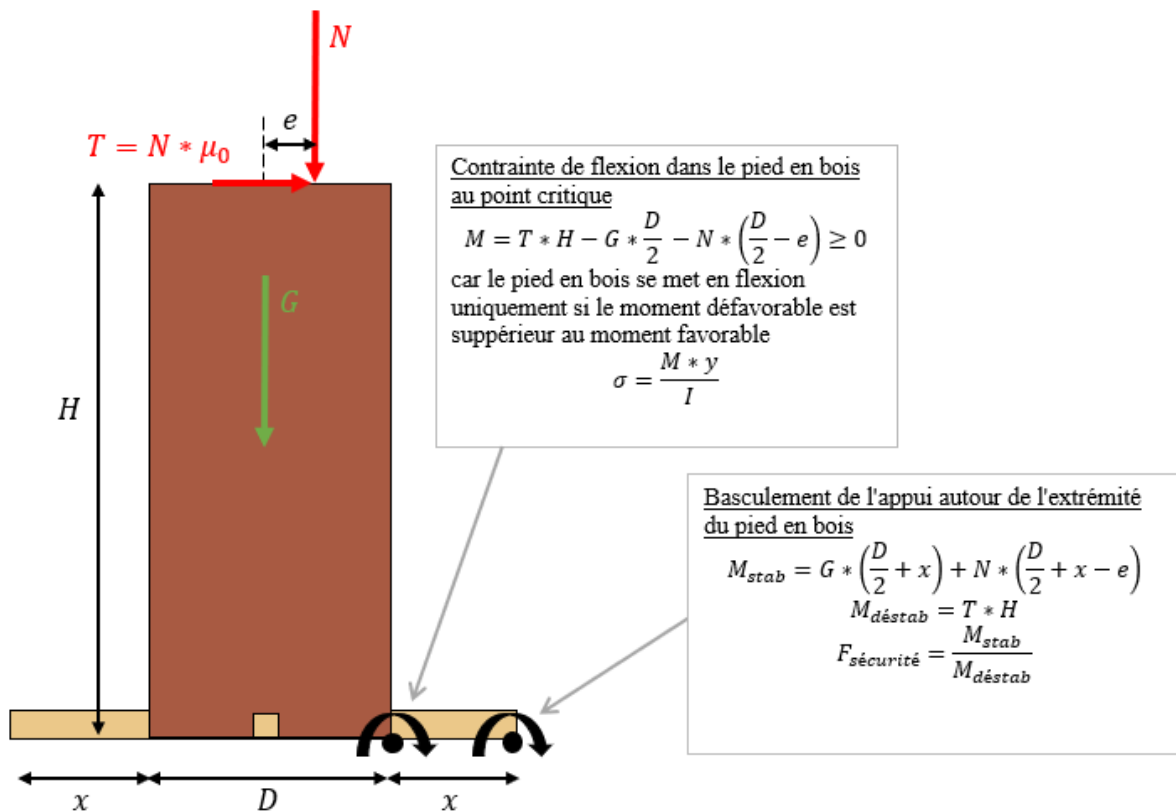


FIGURE A.8 – Schéma basculement appuis

Les appuis sont calculés à l'ELU.

Appuis bas :

$$N = 11,6 \text{ kN} \quad \mu_0 = 0,14$$

$$H = 760 \text{ mm} \quad D = 280 \text{ mm}$$

$$\rho_{\text{bois}} = 465 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad G = 0,22 \text{ kN}$$

$$T = N * e = 11,6 * 78 = 1,62 \text{ kN}$$

$$M_{\text{stab}} = 3,11 \text{ kNm} \quad M_{\text{déstab}} = 1,23 \text{ kNm}$$

$$F_{\text{sécurité}} = 2,5$$

Flexion du bois au pied

$$c = 45 \text{ mm} \quad I = 341719 \text{ mm}^4$$

$$M = 0,48 \text{ kNm} \quad \sigma = 32 \text{ MPa} < \sigma_{\text{adm}}$$

Appuis hauts :

$$N = 6,1 \text{ kN} \quad \mu_0 = 0,14$$

$$H = 1540 \text{ mm} \quad D = 280 \text{ mm}$$

$$\rho_{\text{bois}} = 465 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad G = 0,44 \text{ kN}$$

$$T = N * e = 6,1 * 41 = 0,85 \text{ kN}$$

$$M_{\text{stab}} = 1,97 \text{ kNm} \quad M_{\text{déstab}} = 1,32 \text{ kNm}$$

$$F_{\text{sécurité}} = 1,5$$

Flexion du chevron au pied

$$c = 45 \text{ mm} \quad I = 341719 \text{ mm}^4$$

$$M = 0,65 \text{ kNm} \quad \sigma = 43 \text{ MPa} < \sigma_{\text{adm}}$$

A.5.3 Poinçonnement plaque d'acier en tête d'appui

Une plaque en acier S235 est fixée en haut de l'appui afin d'éviter que la boule ne s'enfonce dans le bois. Le poinçonnement de cette plaque est calculé ci-dessous.

La dureté de Brinell HB pour les aciers doux est de 120.

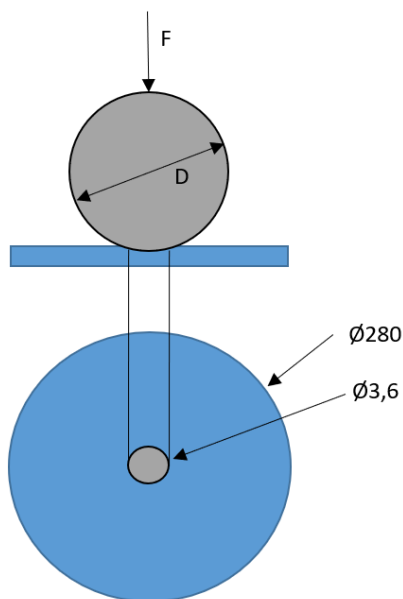


FIGURE A.9 - Schéma du poinçonnement de la plaque (pas à l'échelle)

$$F = 12000 \text{ N} \quad D = 100 \text{ mm}$$

$$HB = 120 = \frac{2F}{g\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Ce qui donne un diamètre d'empreinte laissée par la boule $d=3,6\text{mm}$.

A.6 Plaque de déploiement

La plaque de déploiement est en acier S235 doit résister aux efforts induits par la tension des cordes temporaires lors du déploiement d'un module. La force F est estimée à 800N .

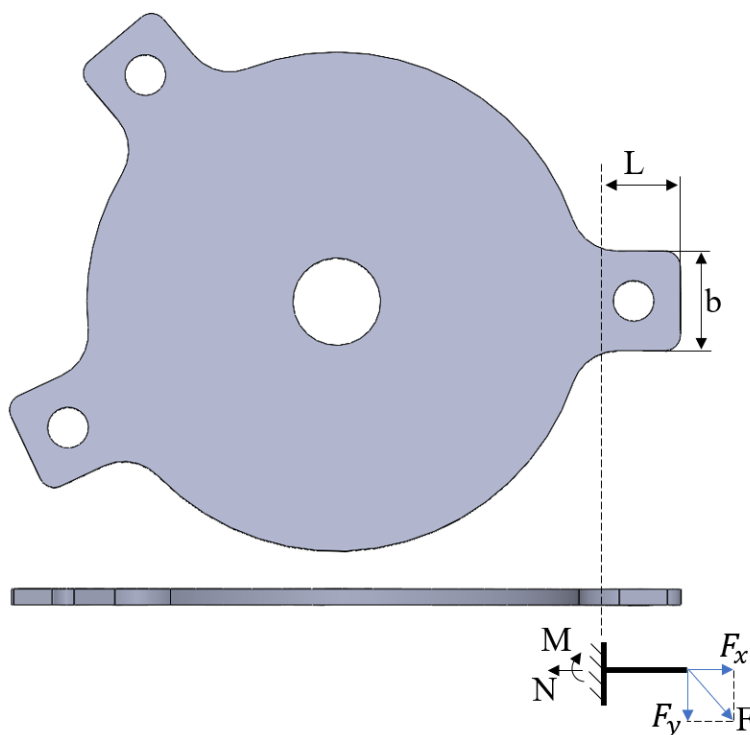


FIGURE A.10 – Schéma plaque de déploiement sollicitée

$$L = 22 \text{ mm} \quad b = 32 \text{ mm} \quad e = 5 \text{ mm}$$

$$A = 160mm^2 \quad I = 333mm^4$$

$$F_x = F_y = F \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = 566N \quad M = 560 * 22 = 12320 Nmm$$

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{My}{I} = \frac{566}{160} + \frac{12320 * 5/2}{333} = 3,5 + 93,3 = 96,9 MPa < \sigma_{adm} = 235$$

ANNEXE B

PROTOCOLE DE DÉPLOIEMENT

ANNEXE B : PROTOCOLE DE DÉPLOIEMENT

L'objectif de ce document est de décrire étape par étape le déploiement de la passerelle de tenségrité. Cette passerelle est composée de 5 modules et a une longueur totale de 14,7 mètres ainsi qu'une hauteur de 2,254 mètres.

La stratégie de déploiement de la structure est la suivante : déployer le premier module (c'est-à-dire la mise à sa bonne forme géométrique sans prétension), mettre la prétension initiale¹² dans le premier module, déployer le second module, assembler le second au premier module, mettre la prétension initiale dans le second module, déployer le troisième module, assembler le troisième au second module, mettre la prétension initiale dans le troisième module, etc. Une fois tous les modules assemblés, la structure est déplacée à l'endroit souhaité où 4 appuis seront installés à l'avance.

La rotation relative entre les bases de la structure est alternée, c'est-à-dire la rotation entre les bases est alternativement de $+39^\circ$ et -39° . Cela implique qu'il doit y avoir deux types de modules, sensiblement identiques mais déployés "en miroir".

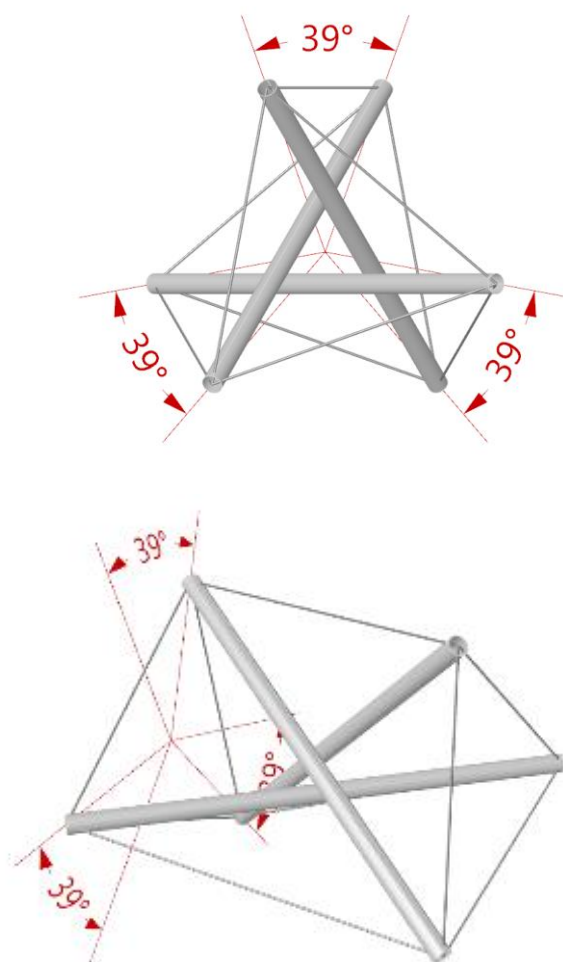


FIGURE B.1 - Simplex type MO1 ($+39^\circ$)

¹² Prétension à introduire pour rigidifier le module. Elle correspond à la précontrainte minimal pour que la structure supporte son poids propre une fois posée sur les appuis.

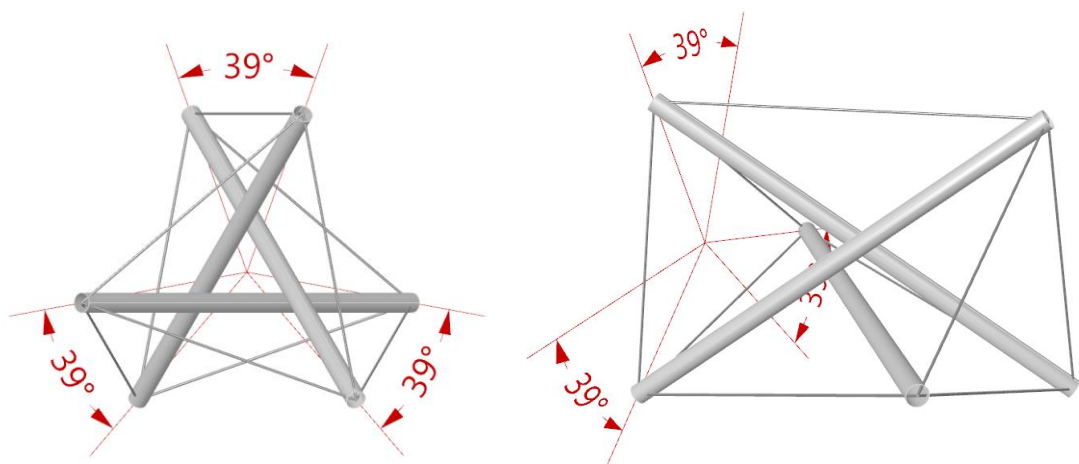


FIGURE B.2 - Simplex type MO2 (-39°)

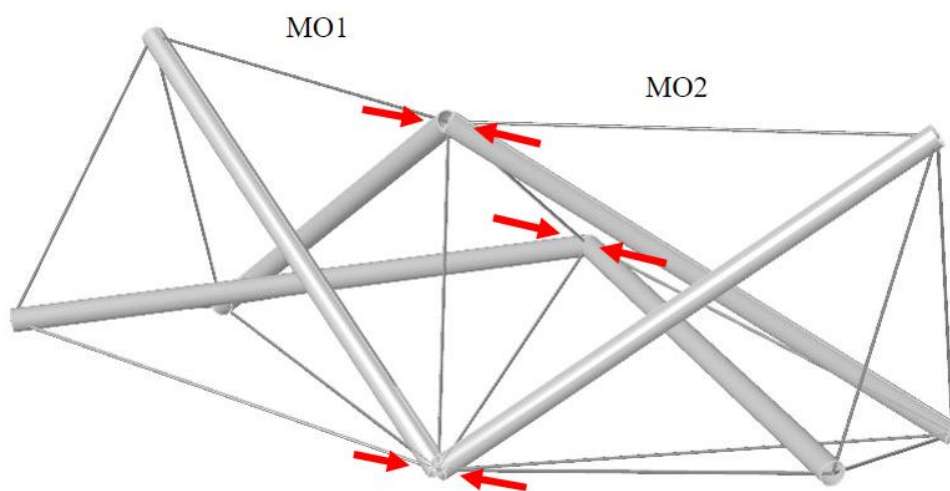


FIGURE B.3 - Connexion de deux modules

B.1 Description générale des composants de la structure

La structure est composée de plusieurs types éléments :

- 18 nœuds composés de 9 types de « boules », notées BT1, BT2, BT3, BT4, BT5, BT6, BT7, BT8, BT9.

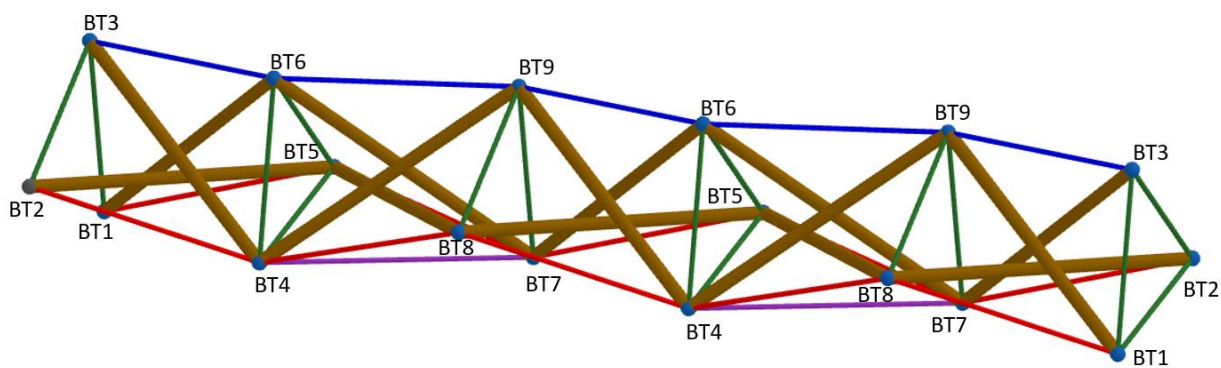


FIGURE B.4 - Emplacement de chaque type de nœud

Chaque module est composé des éléments suivants :

- 15 **butons** en bambous, 3 par modules notés BAMB1, BAMB2, BAMB3,
- 10 **sangles d'arrimage à cliquet**, 2 par modules notées SAC1, SAC2,
- 18 **cordes transversales**, 3 par module notées CT1, CT2, CT3,
- 5 **cordes longitudinales**, 1 par module notées CL,
- 5 **cordes additionnelles**, 1 par module notée CA.

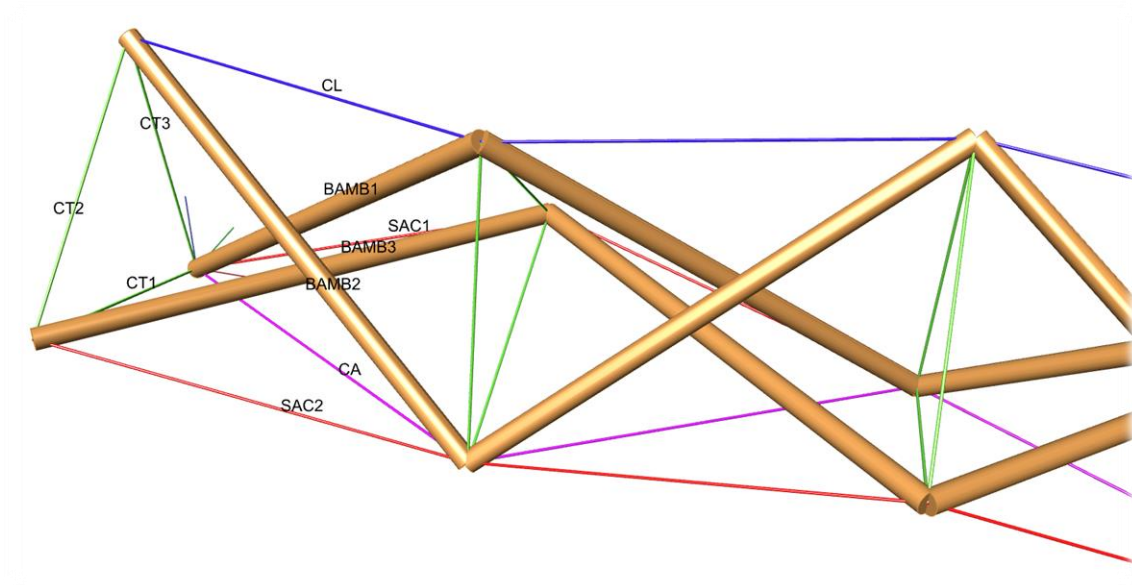


FIGURE B.5 – Éléments définitifs du déploiement d'un module

Les éléments ne servant qu'au déploiement sont :

- 3 **cordes transversales temporaires**, notées CTT1, CTT2 et CTT3
- 2 **cordes longitudinales temporaires**, notées CLT1 et CLT2.
- 1 **système de poulies**, noté SP, composé de 2 poulies doubles et d'une corde de 30m.

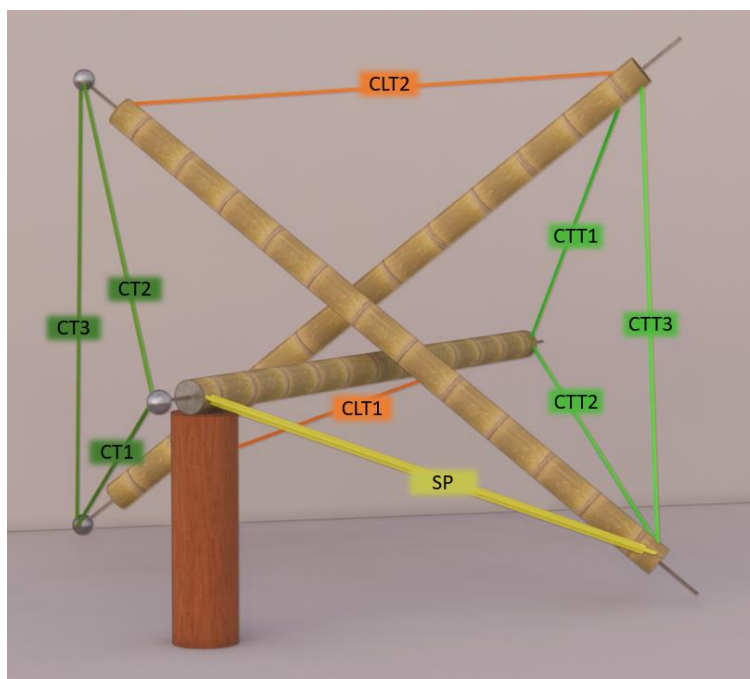


FIGURE B.6 – Éléments temporaires au déploiement d'un module



FIGURE B.7 – Système de poulies

Les **nœuds** sont utilisés afin de connecter tous les éléments entre eux. Il existe 9 types dépendant de l'emplacement du nœud dans la structure afin de permettre le chargement vertical du nœud, l'accroche de cordes additionnelles, etc. Les connexions des éléments aux nœuds sont indiquées sur la FIGURE B.8, représentant un nœud de type BT7. Le diamètre de la boule au cœur du nœud est de 100mm. Les types de nœuds à utiliser pour le déploiement de chaque module sont résumés dans le tableau de correspondance à la fin du protocole.

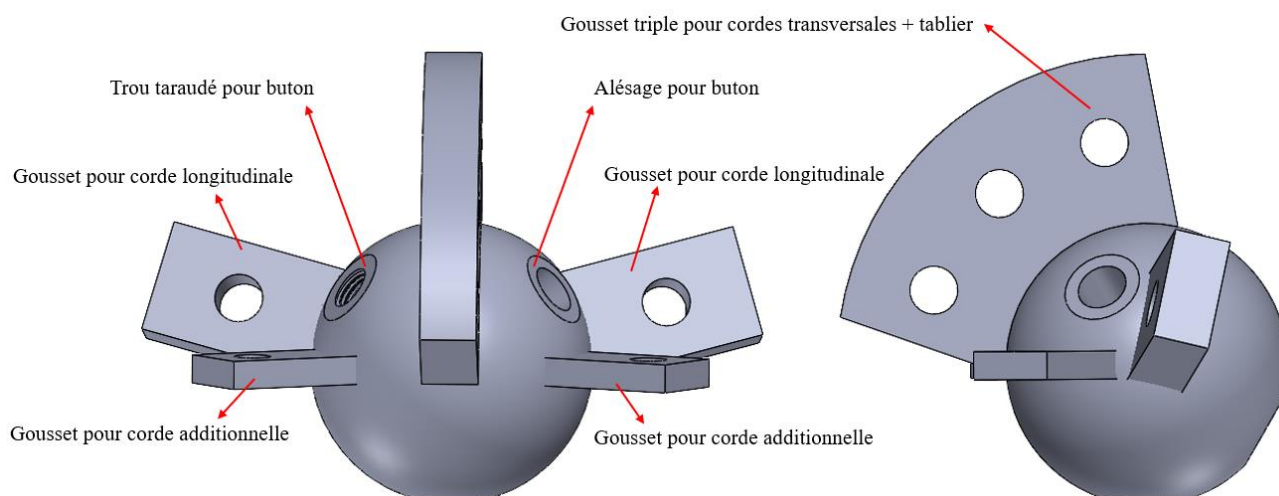


FIGURE B.8 - Nœud de type BT7 : description de chaque élément

Les **butons** de la passerelle sont composés d'un bambou, d'un embout en acier enfilé dans le bambou à chaque extrémité ainsi que d'une tige filetée liant l'embout au nœud. La tige filetée est renforcée par des manchons vissés. D'un côté, la tige filetée est enfilée dans un alésage simple traversant le nœud. De l'autre, le nœud doit être vissé sur la tige filetée grâce au trou taraudé prévu à cet effet.

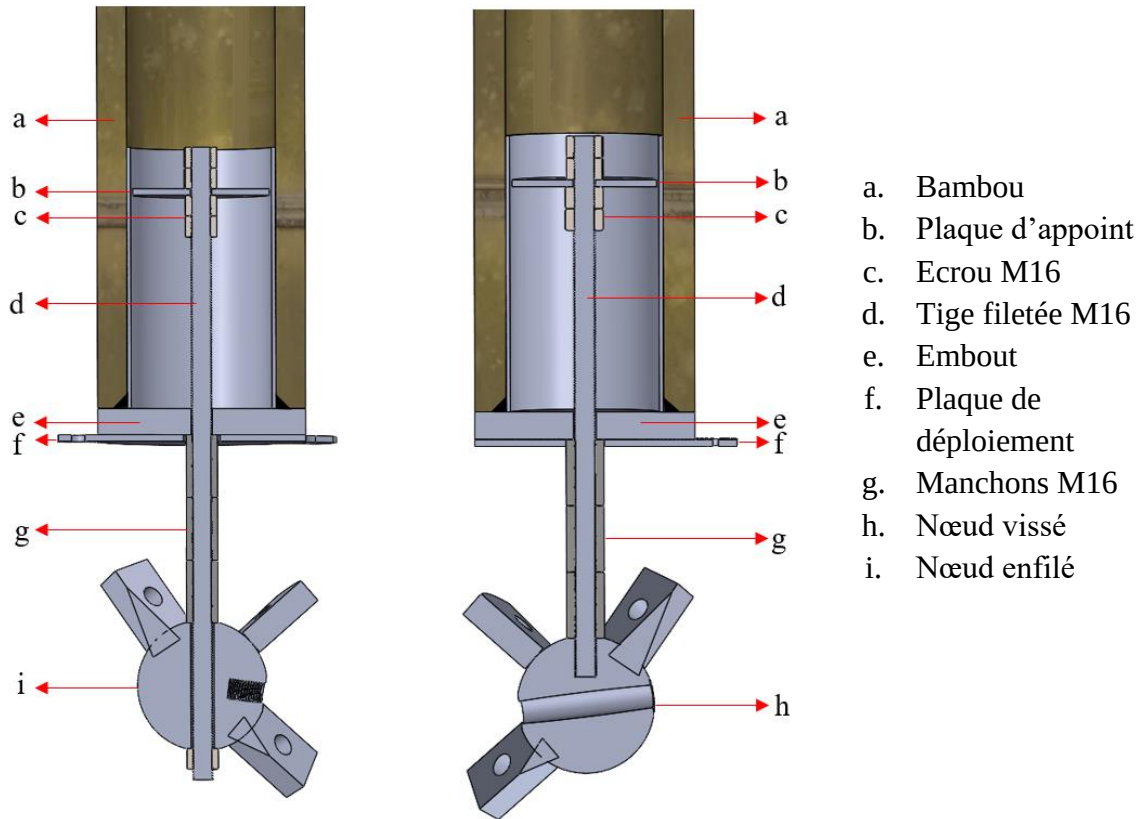


FIGURE B.9 – Vue en coupe d'un embout dans le bambou

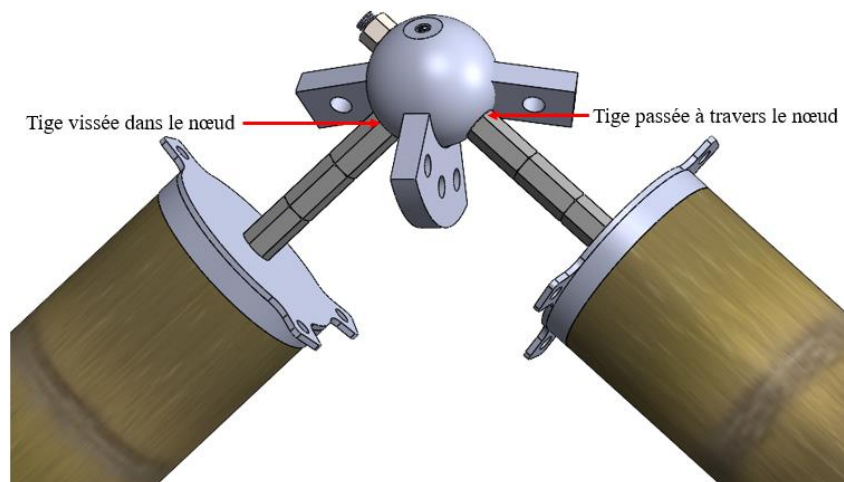


FIGURE B.10 - Connexion boule/butons

La **plaque de déploiement** composant les embouts aux extrémités des boutons est un point central du déploiement de la structure. Elle permet d'attacher les cordes temporaires aux extrémités du boutons qui n'est pas encore connecté à un nœud. Elle est libre de rotation autour des manchons.

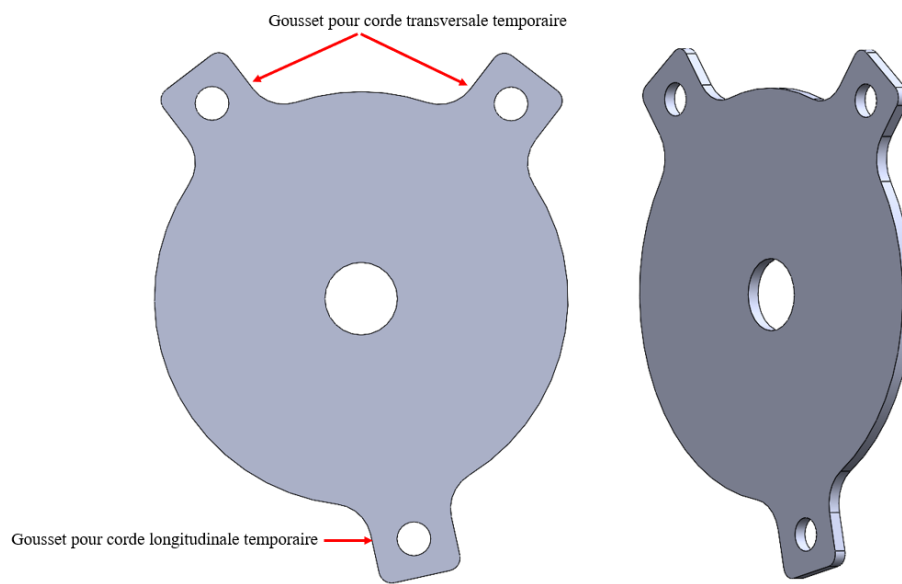


FIGURE B.11 - Plaque de déploiement

B.2 Déploiement d'un module

Les modules d'orientation MO1 sont le premier, le troisième et cinquième module de la structure. Les modules d'orientation MO2 sont les deuxième et quatrième modules. Les modules MO1 et les modules MO2 correspondent chacun à un protocole de déploiement différent.

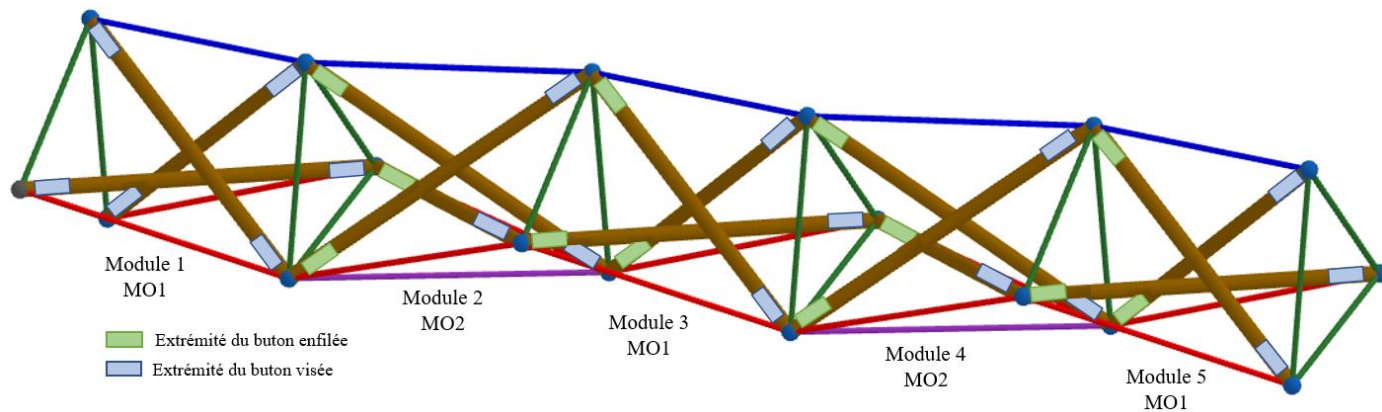


FIGURE B.12 - Types de chaque module de la structure

Les boutons d'un même module sont numérotés BAMB1, BAMB2, BAMB3.

Les nœuds sont numérotés de la façon suivante :

- 1A/2A/3A pour l'extrémité du bouton 1/2/3 **sans** boule.
- 1B/2B/3B pour l'extrémité du bouton 1/2/3 **avec** boule vissée.

Pour la bonne compréhension de ce protocole :

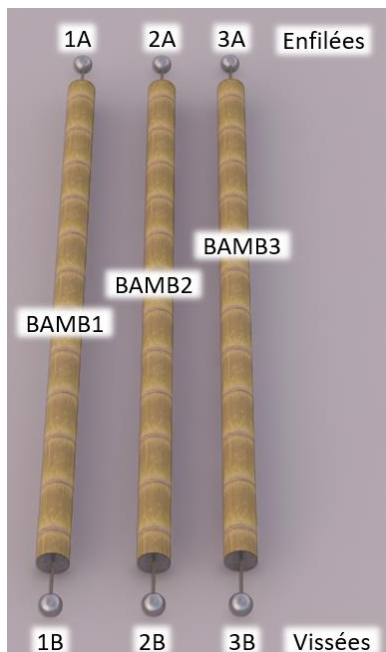
- Les flèches en rouge signifient une force appliquée par une personne 
- Les flèches en vert signifient une réaction d'appui de la structure 

Premièrement, le cas particulier du déploiement du premier module est détaillé. Ensuite, les étapes de déploiement de modules d'orientation 1 et 2 sont décrites.

B.2.1 Déploiement du premier module

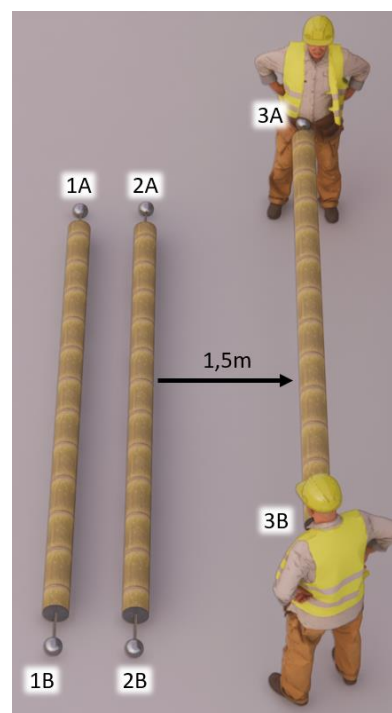
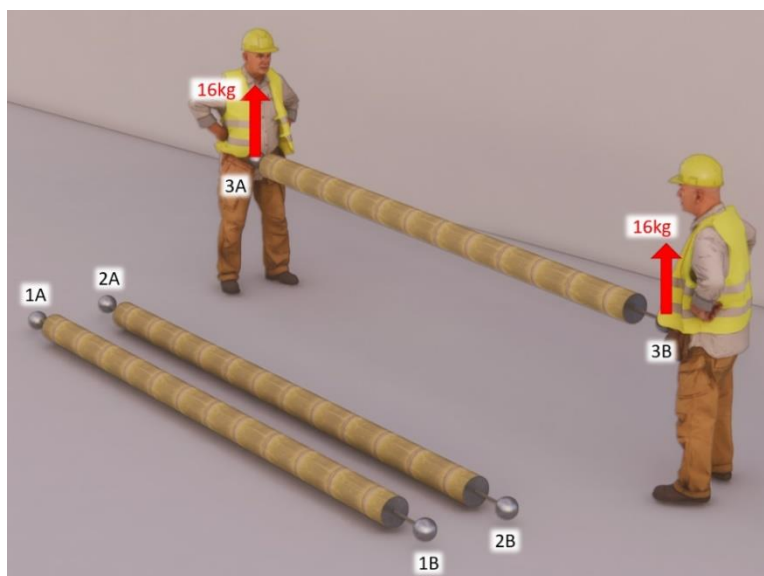
Le premier module à déployer ne s'assemble pas avec un précédent. C'est pourquoi il est directement déployé avec les nœuds et cordes transversales définitives aux deux bases.

Etape n°1 : Position initiale des bambous



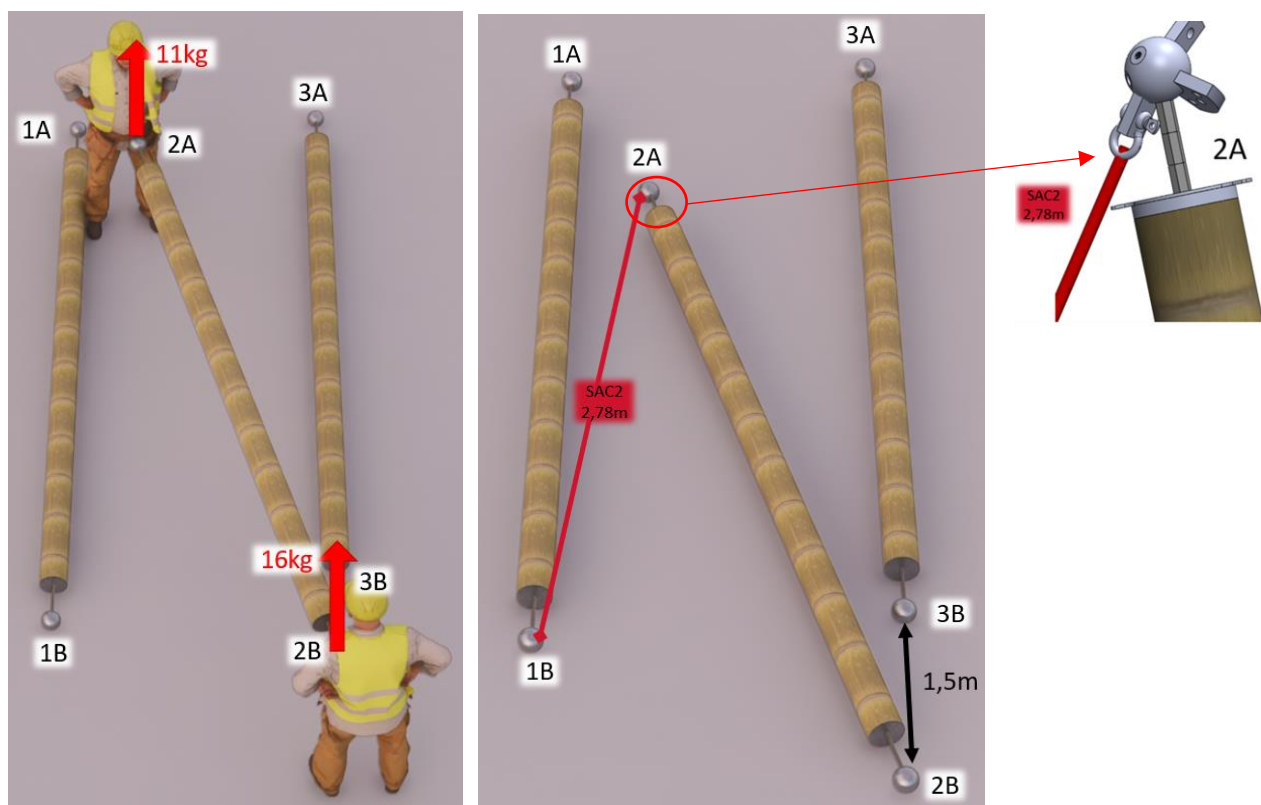
Disposer les 3 boutons les uns à côtés des autres dans l'ordre BAMB1, BAMB2 et BAMB3 en regardant du côté des boules vissées.

Etape n°2 : Écartement du bambou 3



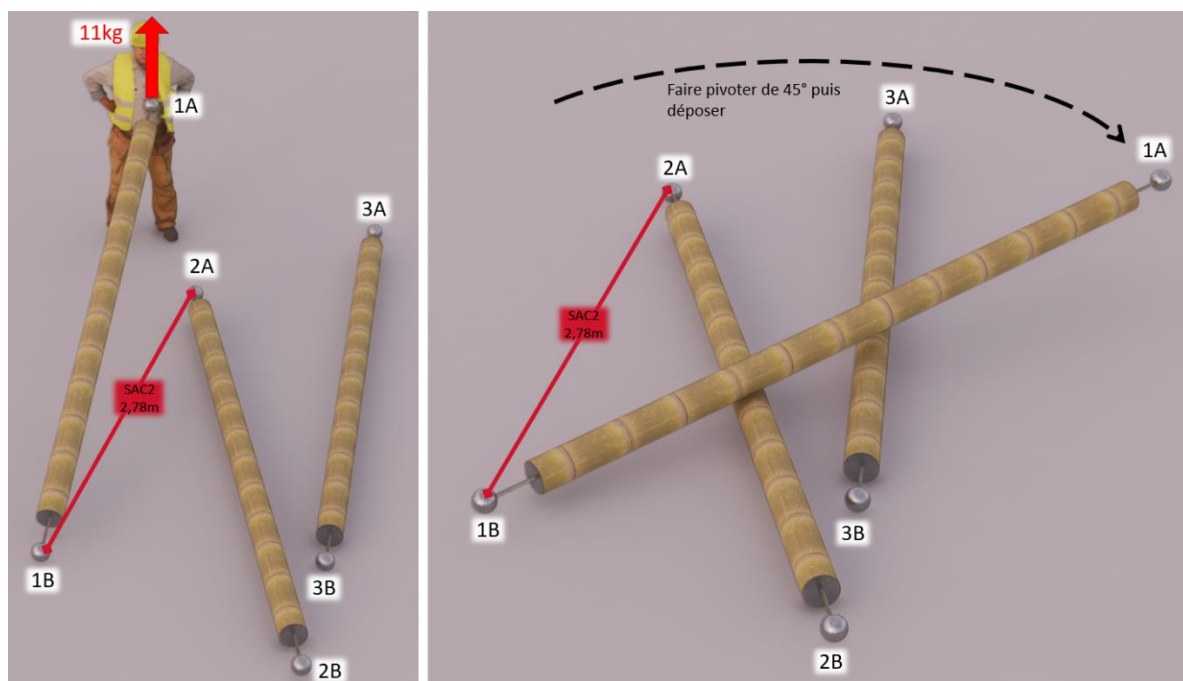
Soulever le bouton BAMB3 et le déplacer à 1,5m vers l'extérieur.

Etape n°3 : Accroche de la première sangle



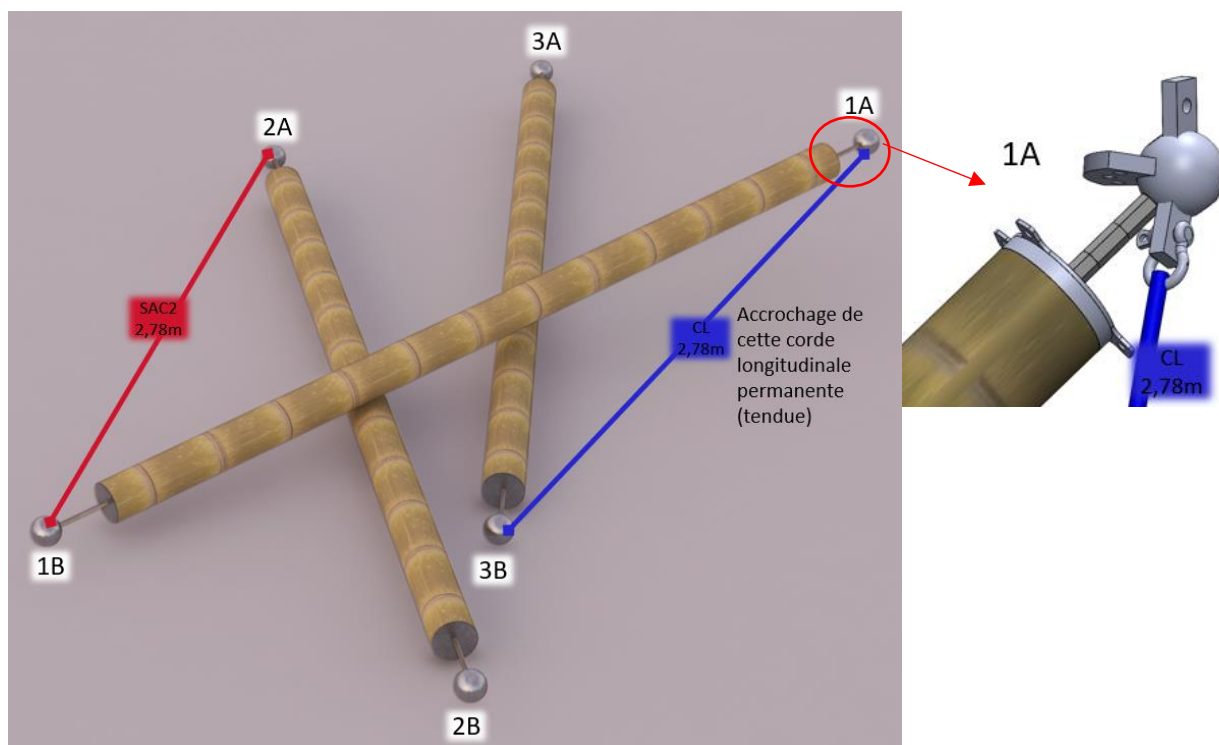
Soulever le bouton BAMB2 afin de placer le nœud 2B dans la continuité du bouton BAMB3 et à 1,5m du nœud 3B. Rapprocher le nœud 2A du nœud 1B tel que la sangle à cliquet SAC2 (2,78m) puisse être accrochée directement aux goussets des nœuds.

Etape n°4 : Pivot du bambou 1



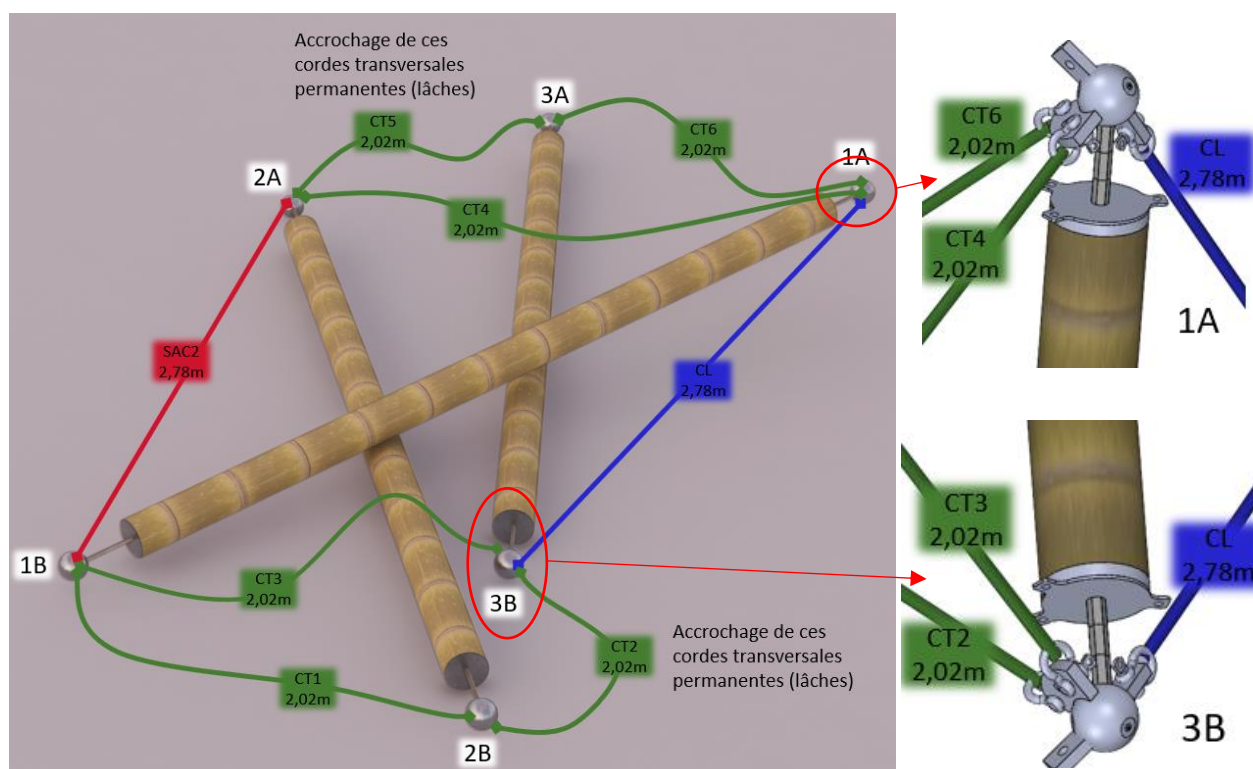
Soulever le nœud 1A afin de pivoter le bouton n°1 de 45° et de le poser au-dessus des boutons BAMB2 et BAMB3.

Etape n°5 : Accroche de la corde longitudinale



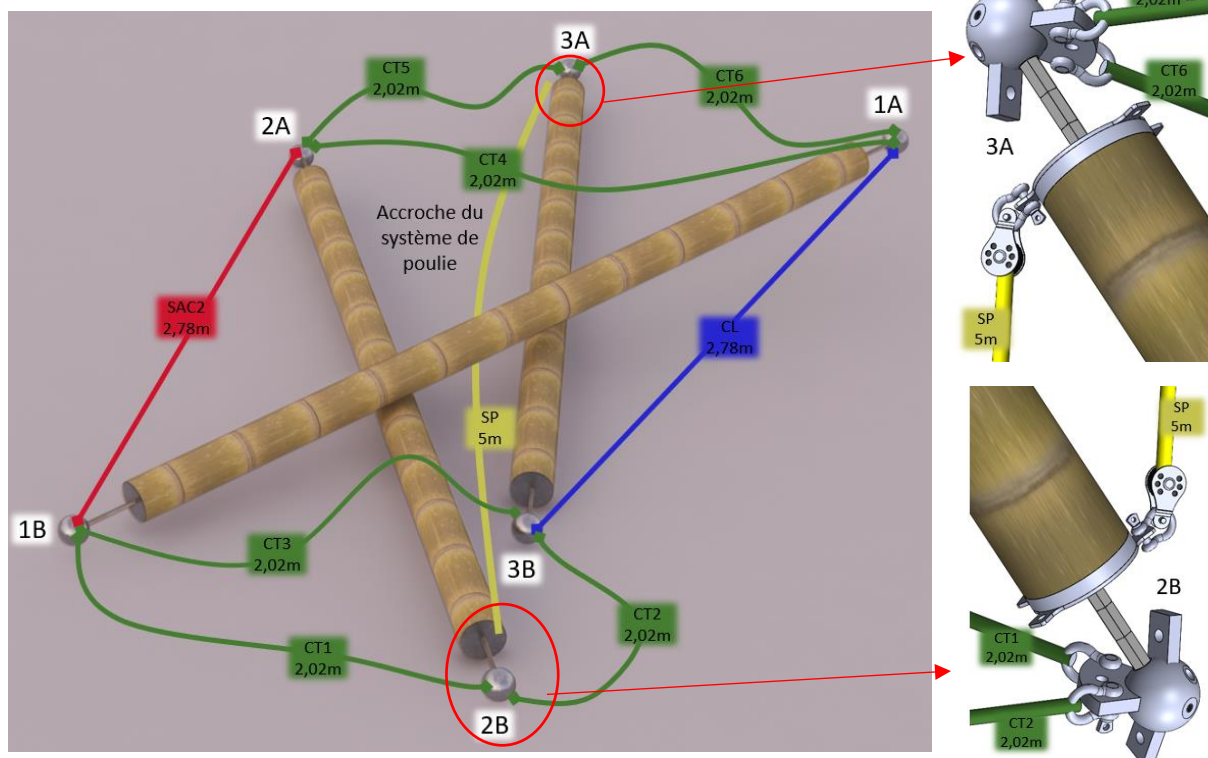
Accrocher la corde longitudinale CL (2,78m) entre les nœuds 1A et 3B aux goussets.

Etape n°6 : Accroche des cordes transversales



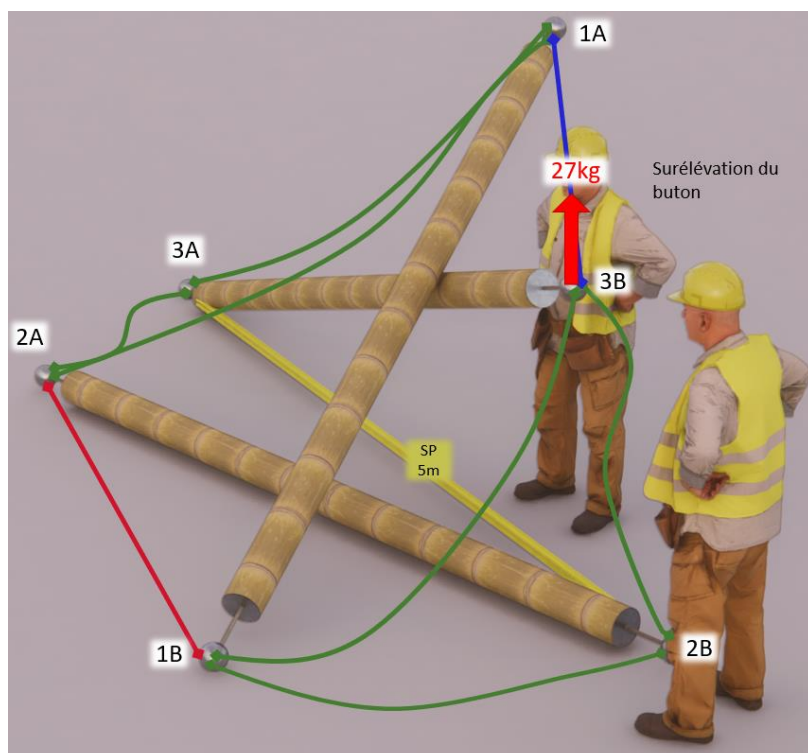
Accrocher les cordes transversales CT1 (2,02m) entre les nœuds 1B et 2B, CT2 (2,02m) entre les nœuds 2B et 3B, CT3 (2,02m) entre les nœuds 3B et 1B, CT4 (2,02m) entre les nœuds 1A et 2A, CT5 (2,02m) entre les nœuds 2A et 3A, CT6 (2,02m) entre les nœuds 3A et 1A. Des annotations sont inscrites sur les goussets pour réaliser les bonnes connections.

Etape n°7 : Accroche du système poulies



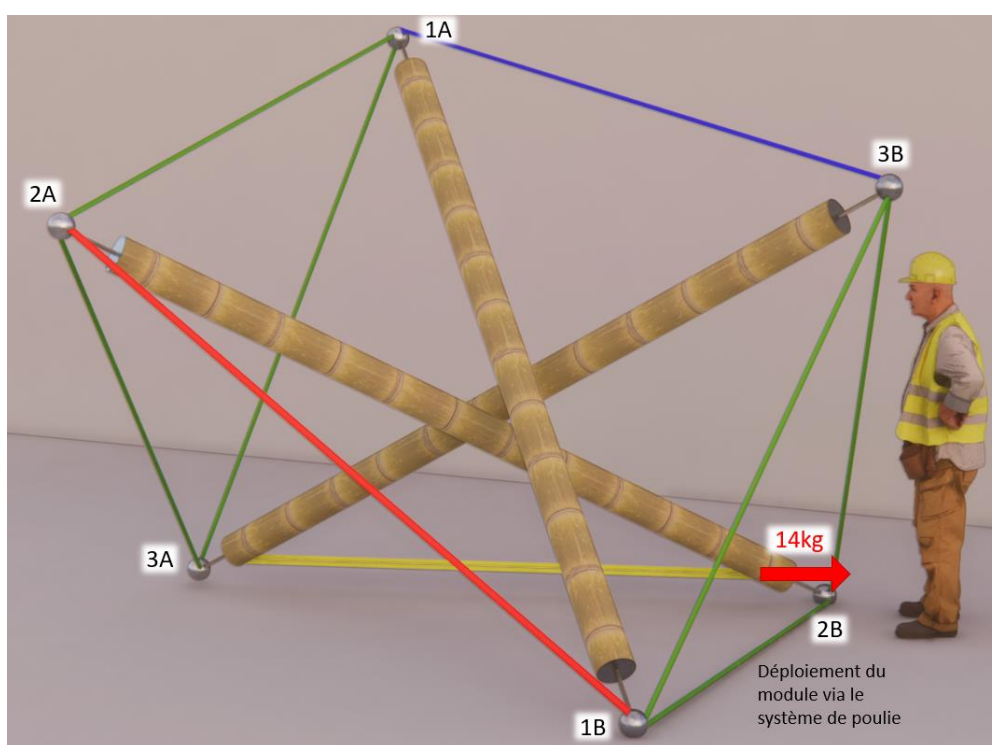
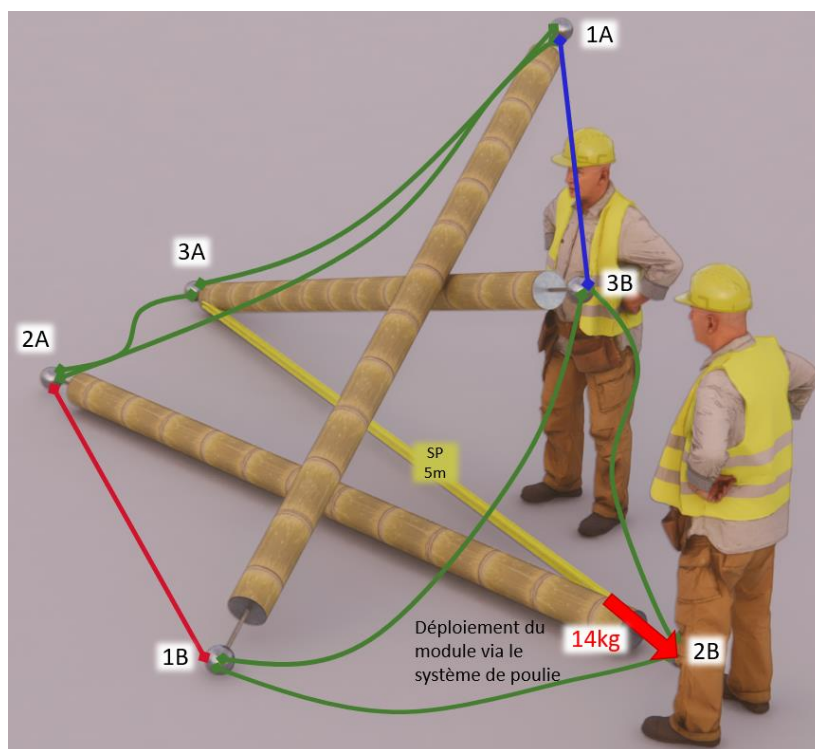
Accrocher le système de poulies entre les plaques de déploiement des nœuds 3A et 2B.

Etape n°8 : Élévation du bambou 3



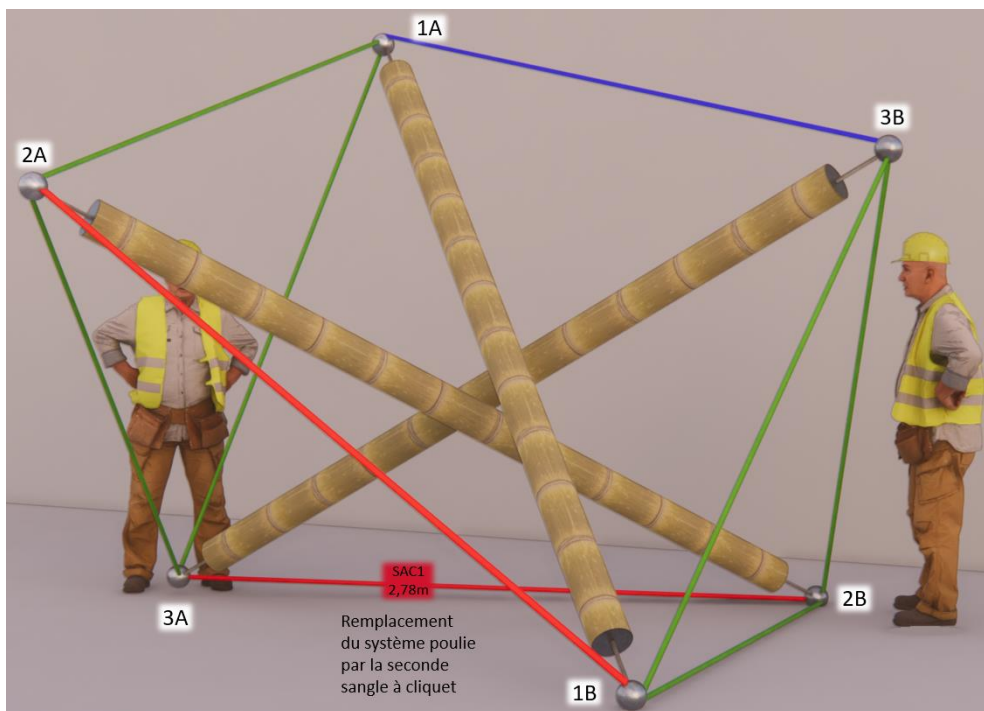
Soulever le nœud 3B du BAMB3 à une hauteur d'au moins 0,5m afin de diminuer l'effort de traction nécessaire à l'élévation du module par le système de poulies SP. Le BAMB1 est retenu grâce à la corde longitudinale reliant les extrémités 1A et 3B.

Etape n°9 : Déploiement du module



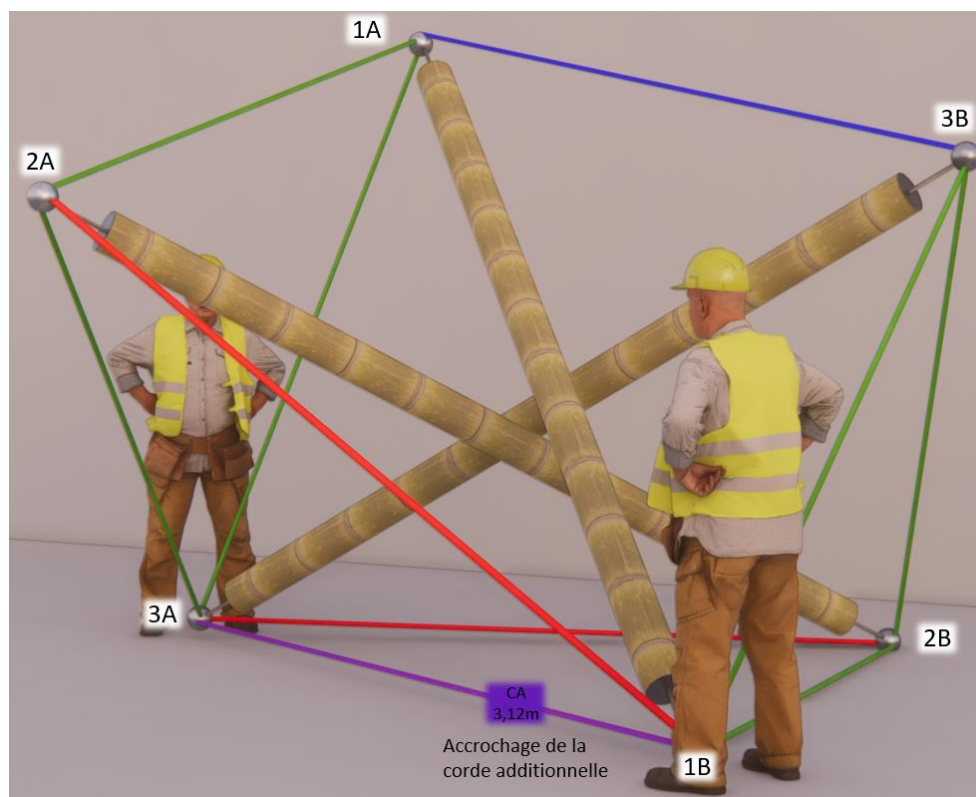
En vous appuyant sur le nœud 2B, tirer sur la corde du système de poulies SP afin de donner la géométrie souhaitée à la structure. Bloquer la corde du système de poulies en faisant un nœud à la manille.

Etape n°10 : Remplacement du système poulies



Remplacer le système poulies SP par la deuxième sangle à cliquet SAC1 en l'accrochant aux goussets des nœuds 3A et 2B.

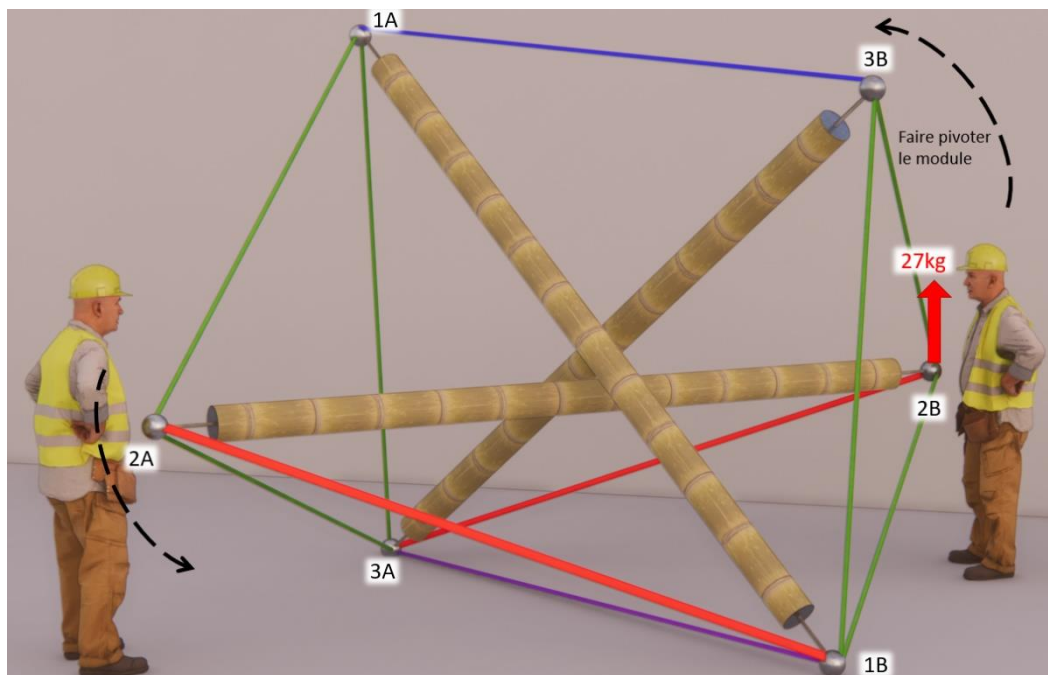
Etape n°11 : Accroche de la corde additionnelle



Accrocher la corde additionnelle CA (3,12m) aux goussets des nœuds 3A et 1B. Cette dernière corde ferme la géométrie du module c'est pourquoi il est nécessaire de rapprocher les nœuds 3A et 1B avec force (1,2kN). Une sangle à cliquet additionnelle peut-être accrochée

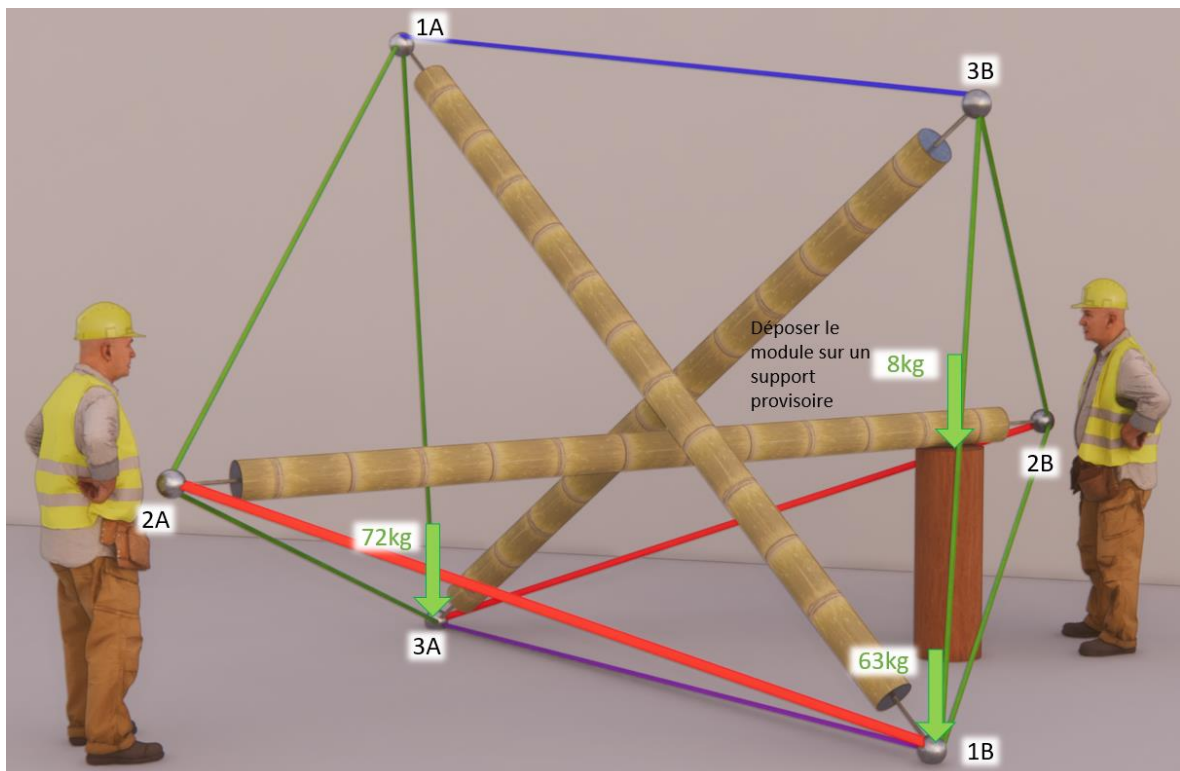
aux crochets des sangles arrivant aux nœuds 3A et 1B pour aider. Cette sangle permet de rapprocher les deux nœuds et accrocher la corde additionnelle sans tirer sur celle-ci.

Etape n°12 : Pivot du module



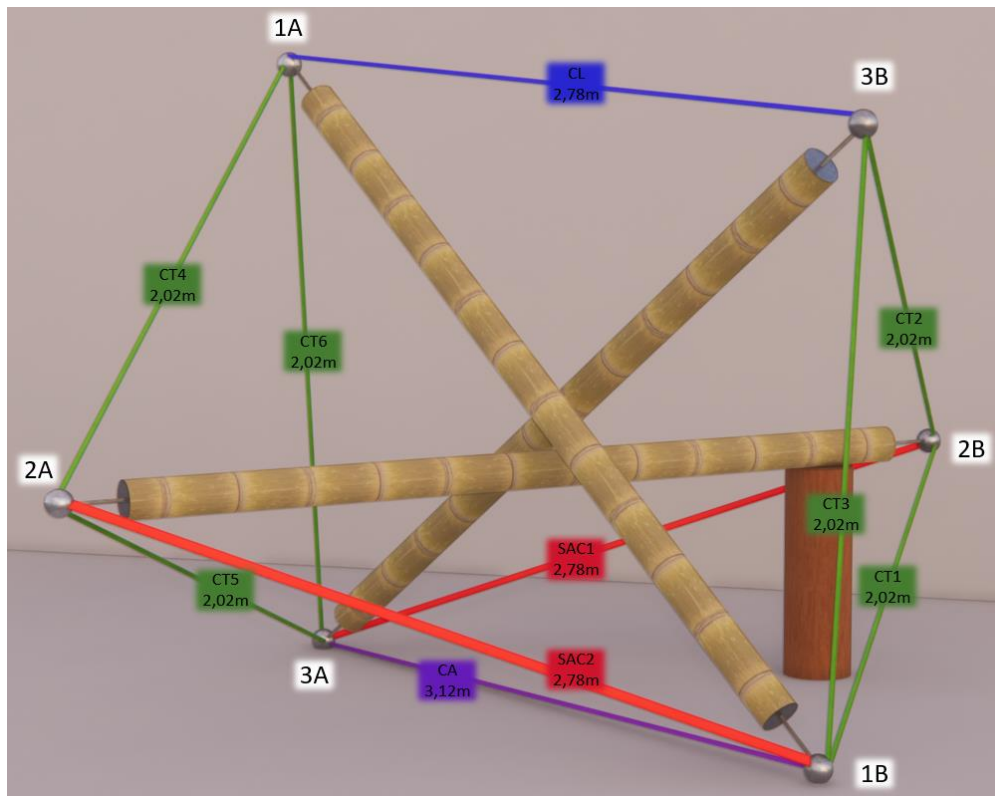
Faire pivoter la structure en soulevant le nœud 2B afin de la positionner selon son orientation finale.

Etape n°13 : Soutient du module



Placer un support provisoire sous le BAMB2 près du nœud 2B afin d'éviter le basculement du module. La force pour maintenir le module pivoté devient faible. L'équilibre de la structure

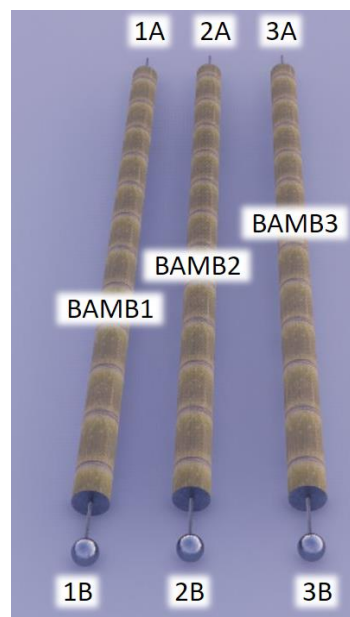
est assuré par le fait que le support est légèrement plus petit qu'il ne devrait, la structure penchant donc légèrement vers le support et non vers le côté non soutenu.



Le premier module est maintenant déployé. A ce stade, la masse du module est de 143kg. Les prochains modules viendront s'assembler aux nœuds 1B, 2B et 3B de celui-ci.

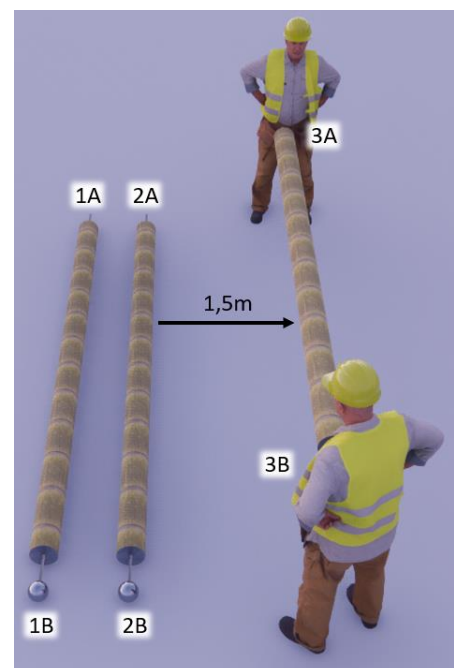
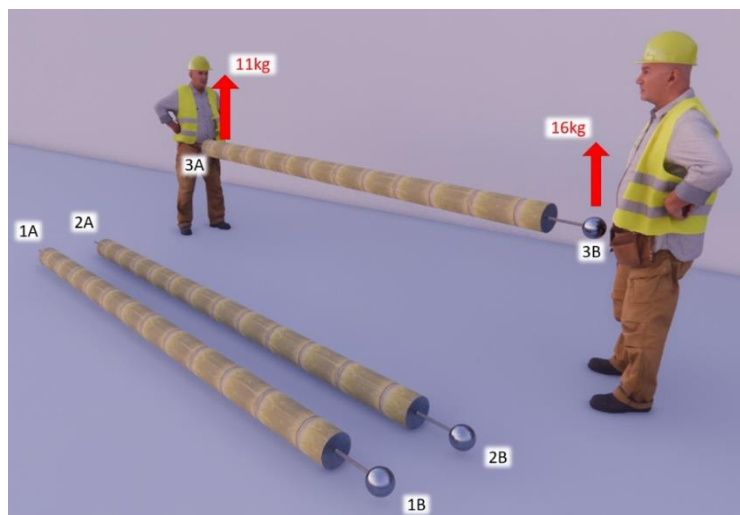
B.2.2 Déploiement d'un module d'orientation MO1

Etape n°1 : Position initiale des bambous



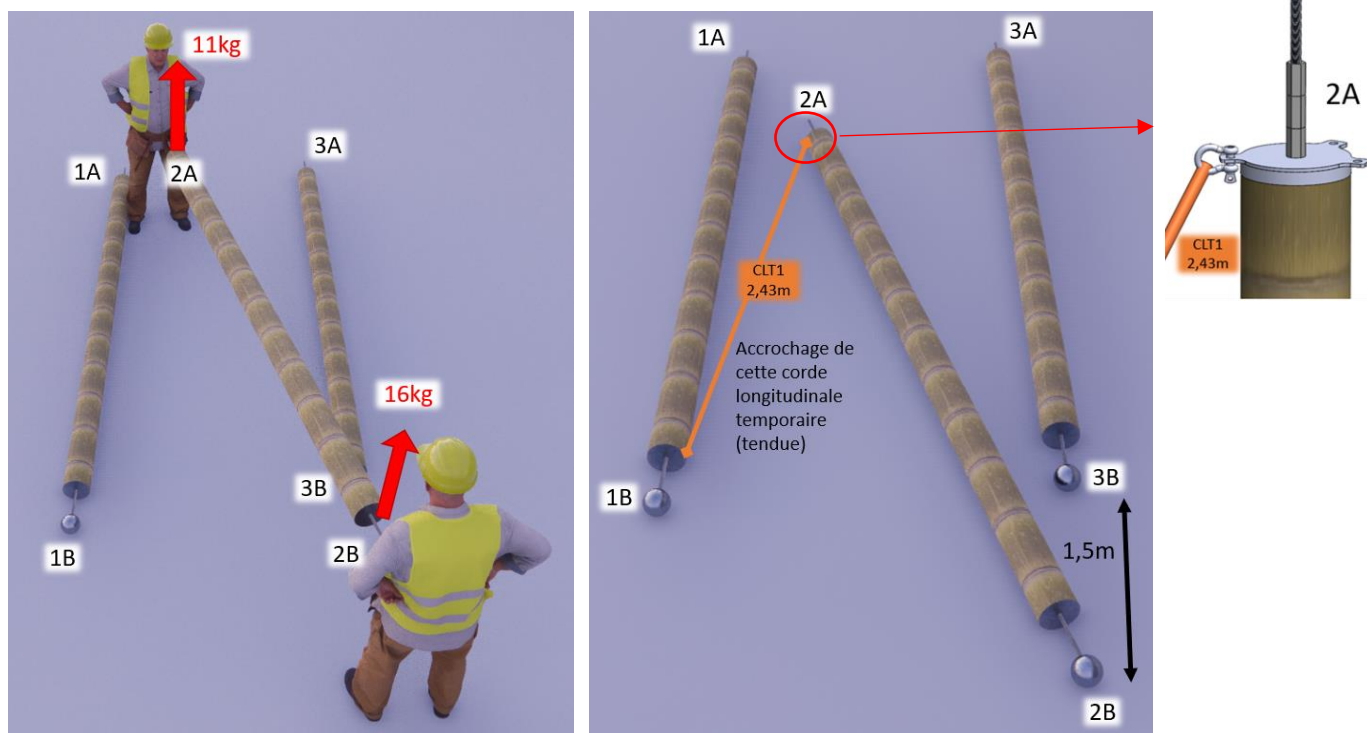
Disposer les 3 boutons les uns à côtés des autres dans l'ordre BAMB1, BAMB2 et BAMB3 en regardant du côté des boules.

Etape n°2 : Écartement du bambou 3



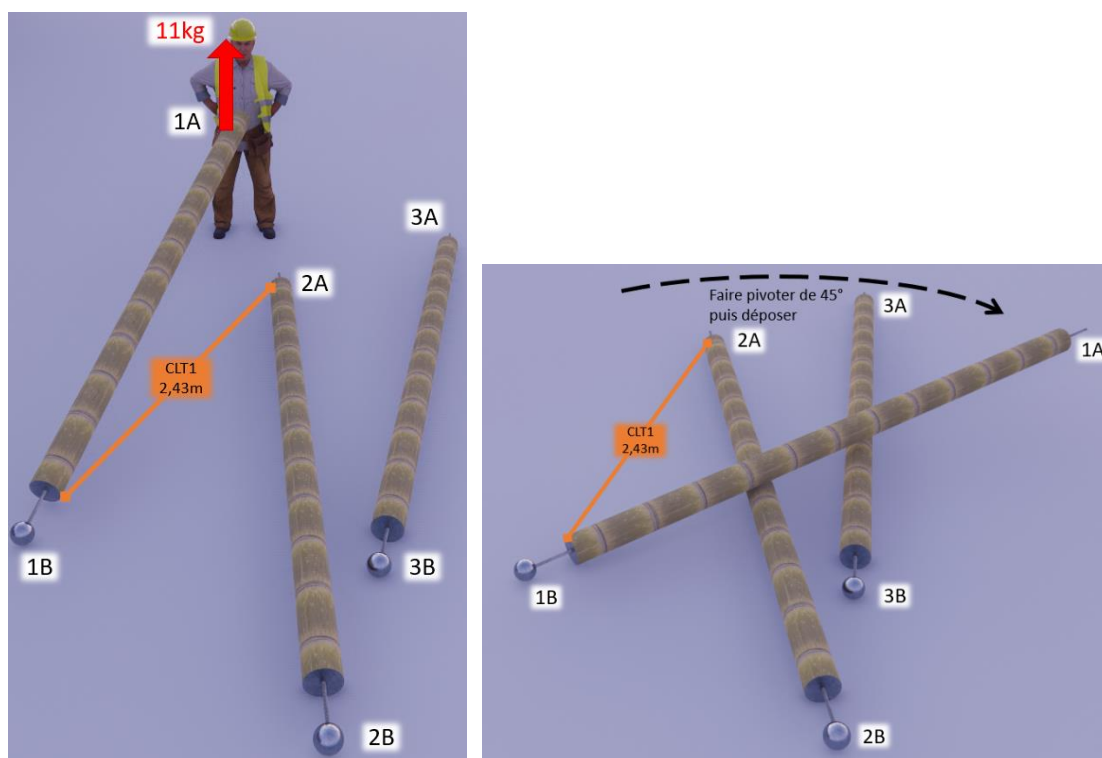
Soulever le bouton BAMB3 et le déplacer à 1,5m vers l'extérieur.

Etape n°3 : Accroche de la première corde longitudinale temporaire



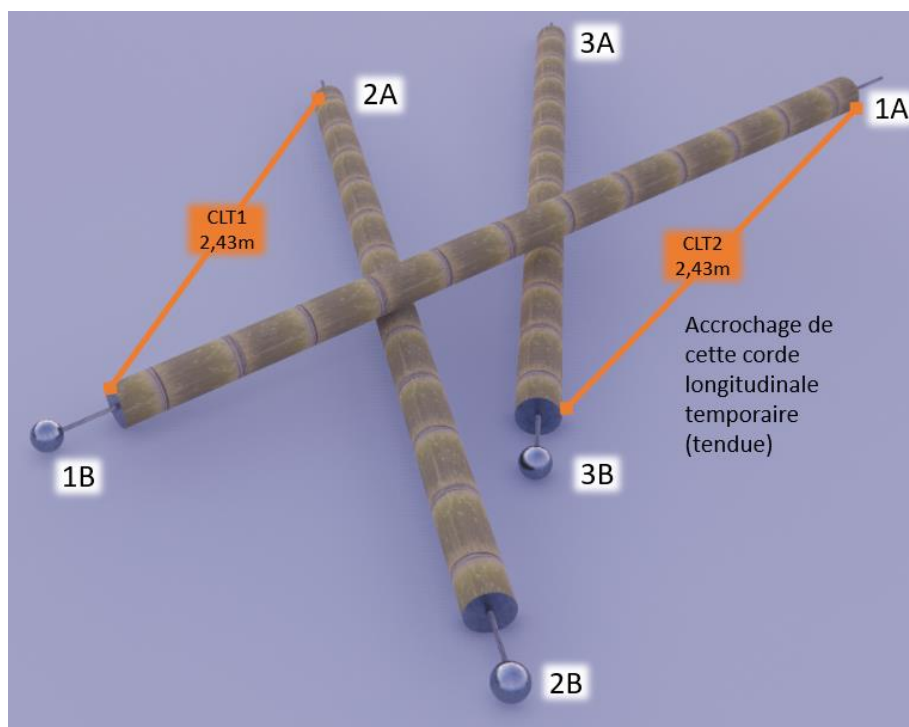
Soulever le bouton BAMB2 afin de placer le nœud 2B dans la continuité du bouton BAMB3 et à 1,5m du nœud 3B. Rapprocher le nœud 2A du nœud 1B tel que la corde longitudinale temporaire CLT1 (2,43m) puisse être accrochée entre les plaques de déploiement de ces nœuds.

Etape n°4 : Pivot du bambou 1



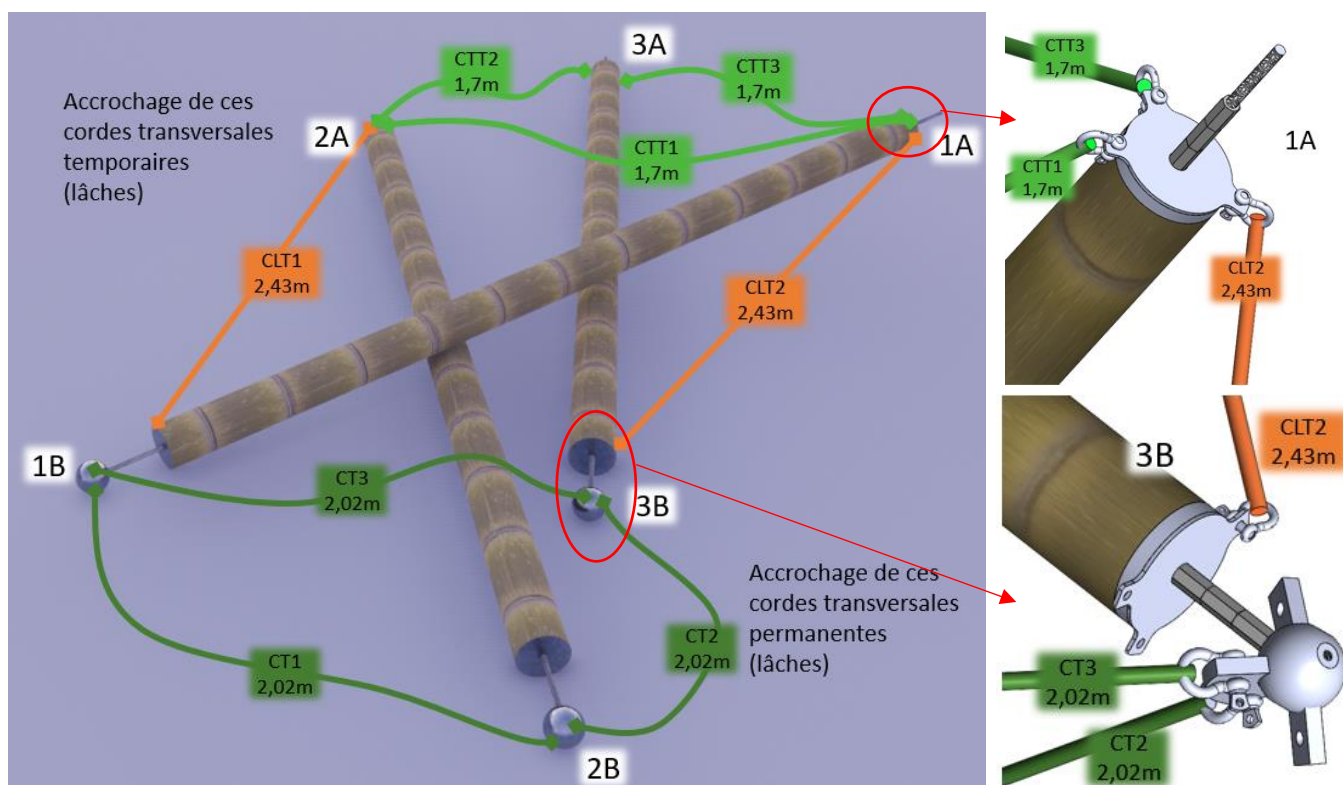
Soulever le nœud 1A afin de pivoter le bouton BAMB1 de 45° et de le poser au-dessus des boutons BAMB2 et BAMB3.

Etape n°5 : Accroche de la deuxième corde longitudinale temporaire



Accrocher la corde longitudinale temporaire CLT2 (2,43m) entre les nœuds 1A et 3B.

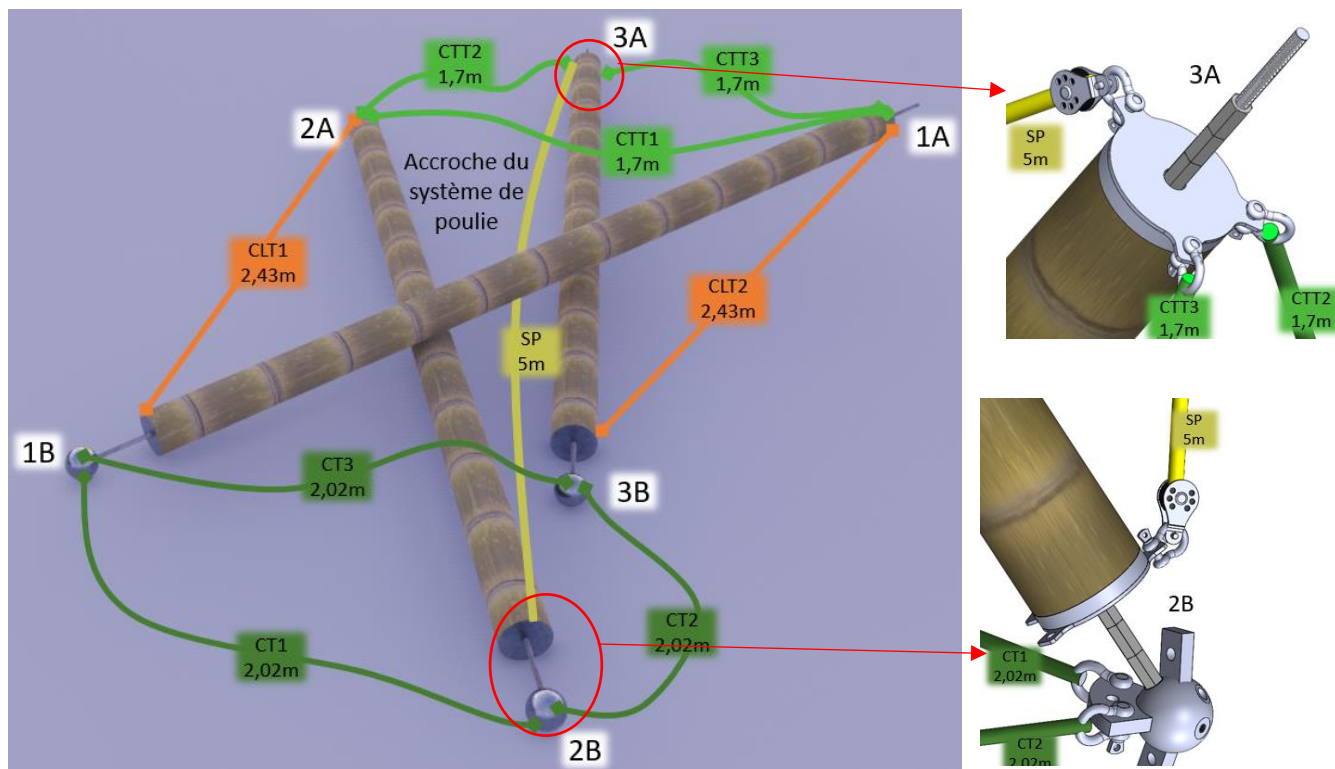
Etape n°6 : Accroche des cordes transversales permanentes et temporaires



Accrocher les cordes transversales temporaires CTT1 (1,7m) entre les nœuds 1A et 2A, CTT2 (1,7m) entre les nœuds 2A et 3A, CTT3 (1,7m) entre les nœuds 3A et 1A. Des annotations sont inscrites sur les plaques de déploiement pour réaliser les bonnes connections. Accrocher

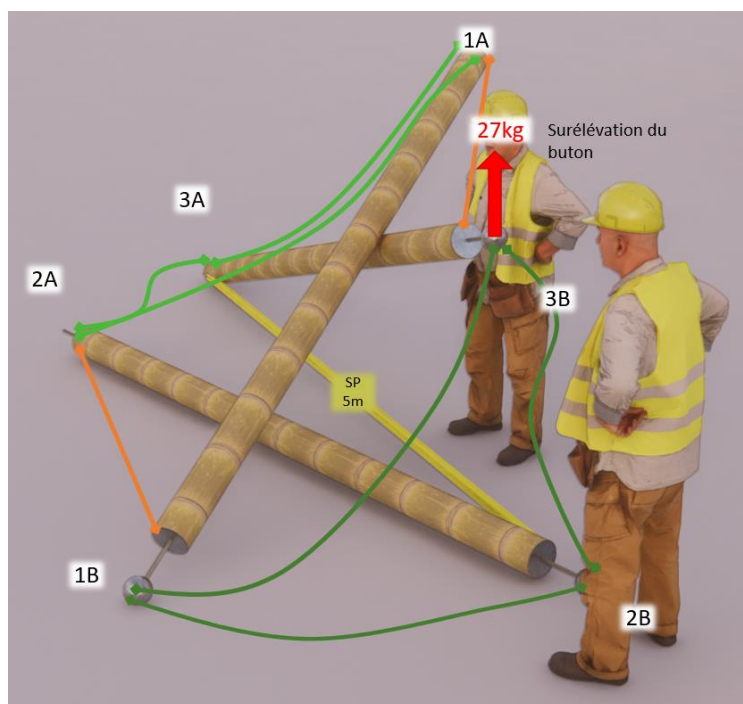
les cordes transversales permanentes CT1 (2,02m) entre les nœuds 1B et 2B, CT2 (2,02m) entre les nœuds 2B et 3B, CT3 (2,02m) entre les nœuds 3B et 1B.

Etape n°7 : Accroche du système poulies



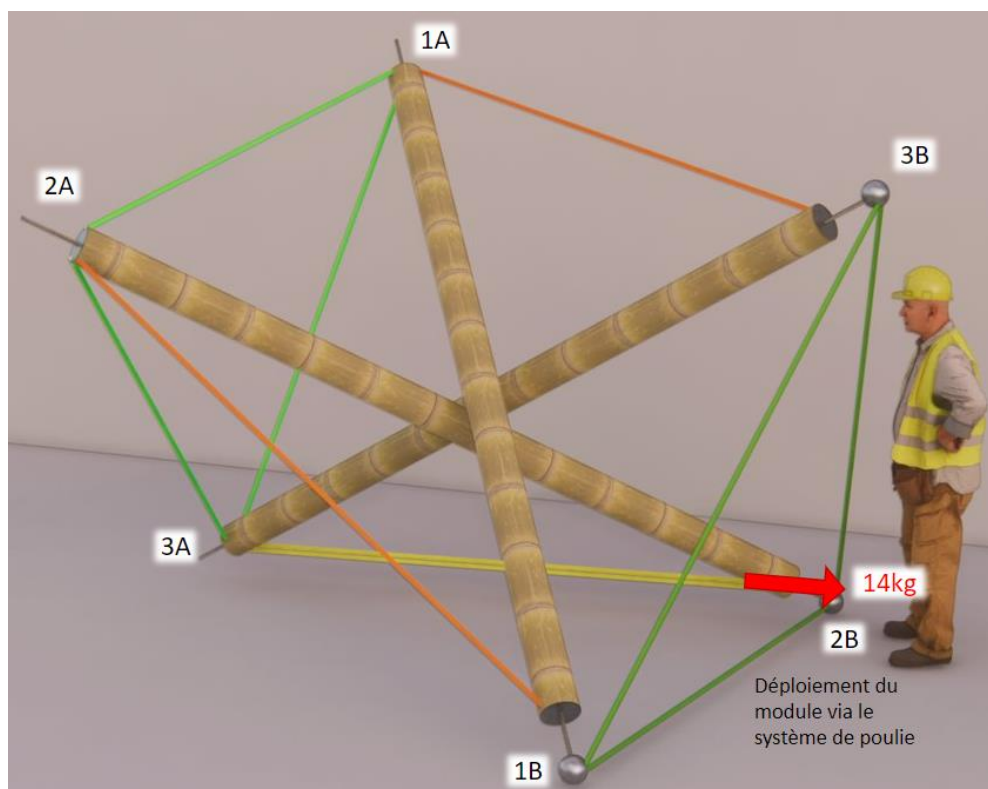
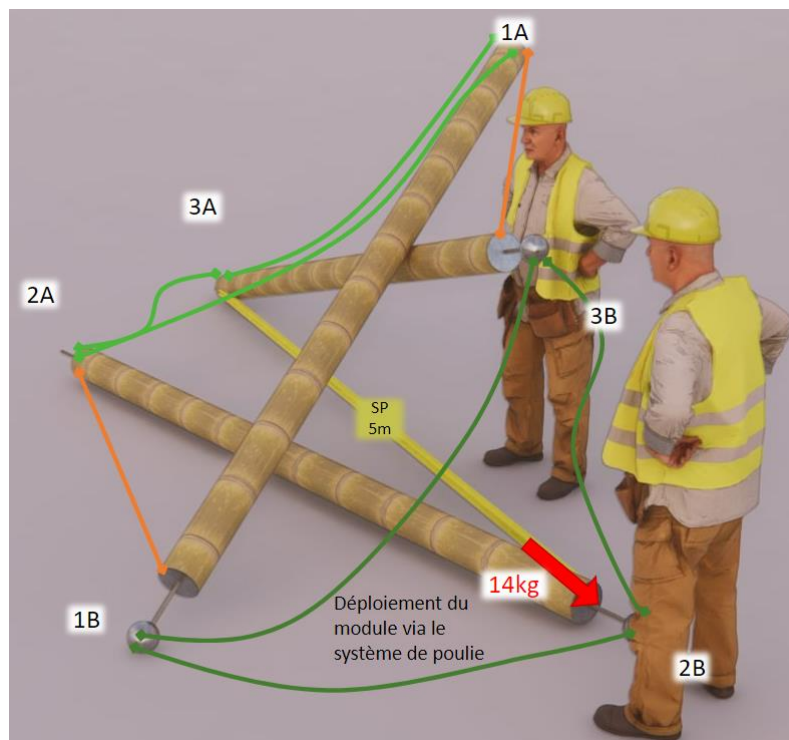
Accrocher le système de poulies entre les plaques de déploiement des nœuds 3A et 2B.

Etape n°8 : Élévation du bouton 3



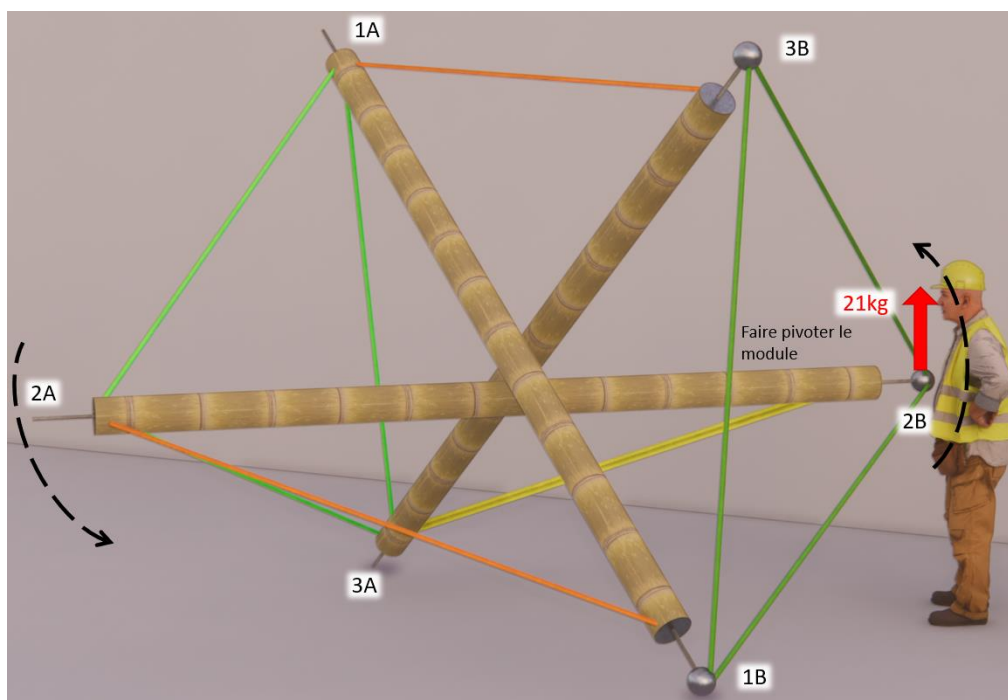
Soulever le nœud 3B du BAMB3 à une hauteur d'au moins 0,5m afin de diminuer l'effort de traction nécessaire à l'élévation du module par le système de poulies SP. Le BAMB1 est retenu grâce à la corde temporaire reliant les extrémités 1A et 3B.

Etape n°9 : Déploiement du module



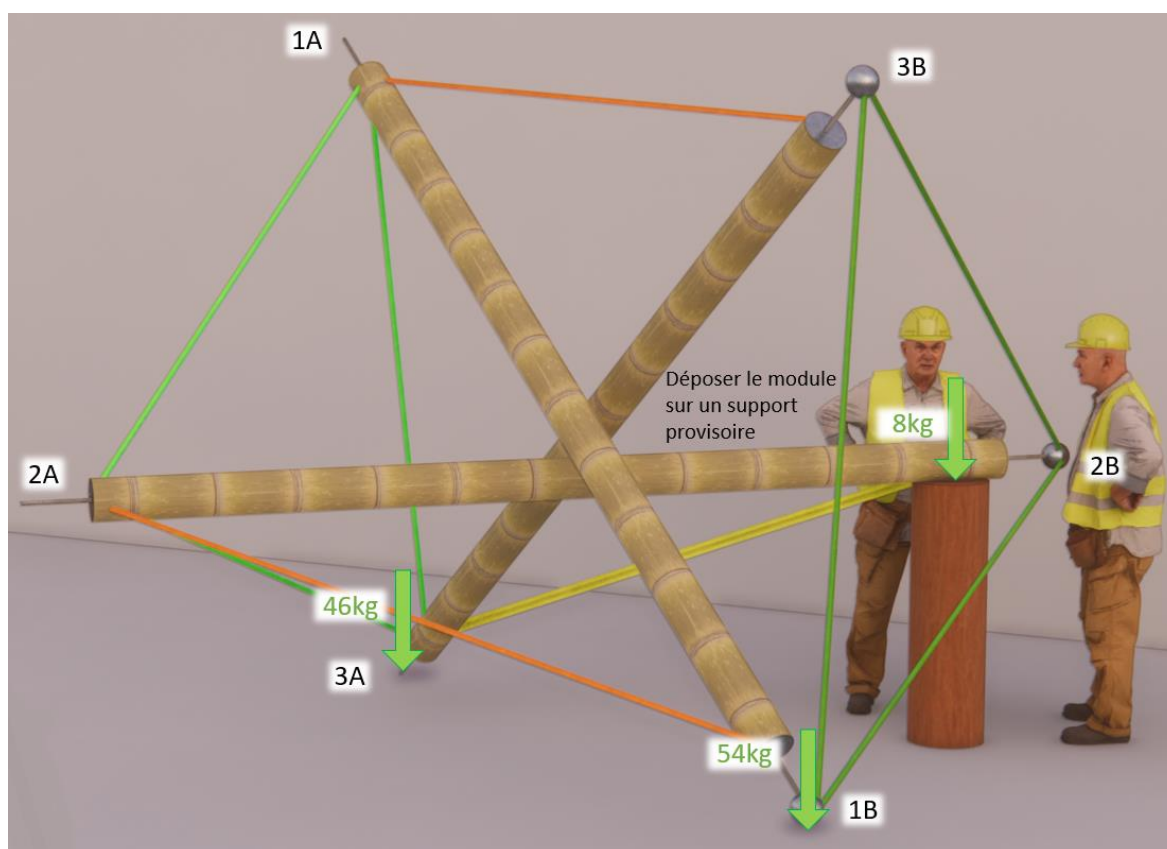
En vous appuyant sur le nœud 2B, tirer sur la corde du système de poulies SP afin de donner la géométrie souhaitée à la structure. Bloquer la corde du système de poulies en faisant un nœud à la manille.

Etape n°10 : Pivot du module



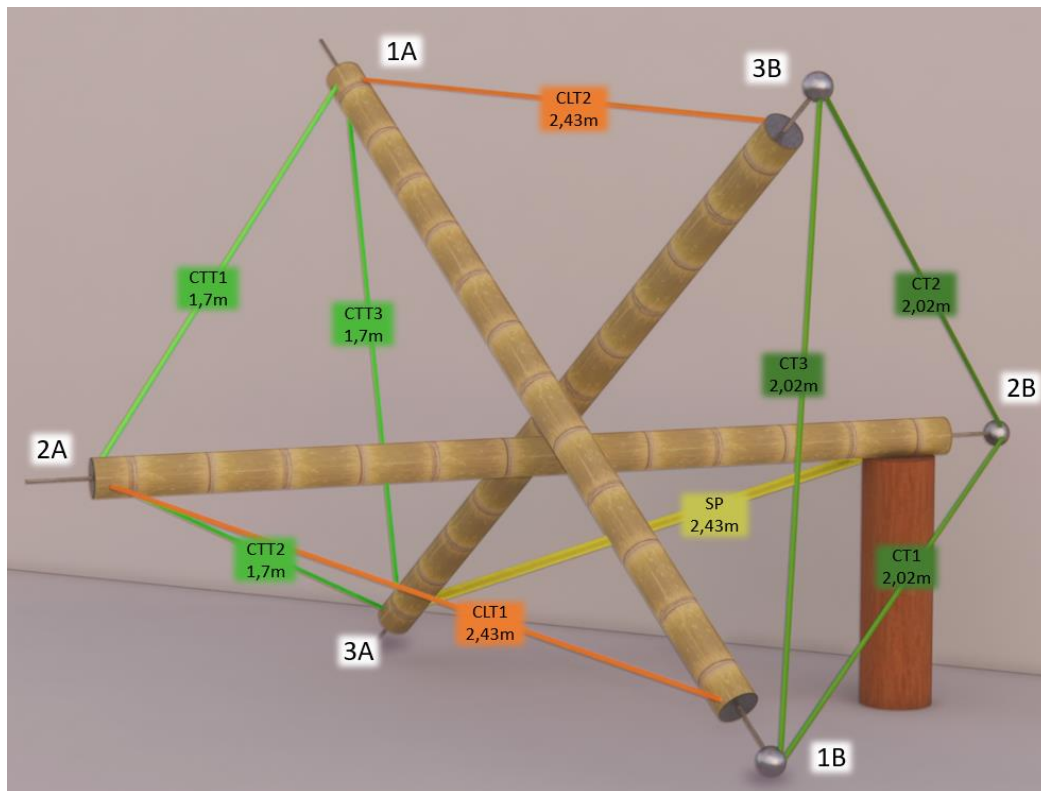
Faire pivoter la structure en soulevant le nœud 2B afin de la positionner selon son orientation finale.

Etape n°11 : Soutient du module



Placer un support provisoire sous le BAMB2 près du nœud 2B afin d'éviter le basculement du module. La force pour maintenir le module pivoté devient faible. L'équilibre de la structure

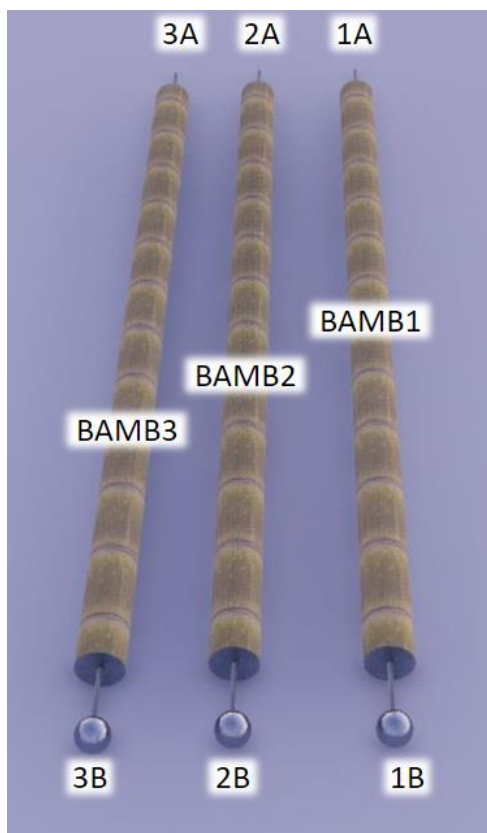
est assuré par le fait que le support est légèrement plus petit qu'il ne devrait, la structure penchant donc légèrement vers le support et non vers le côté non soutenu.



Le module MO1 est maintenant déployé. A ce stade, la masse du module est de 108kg.

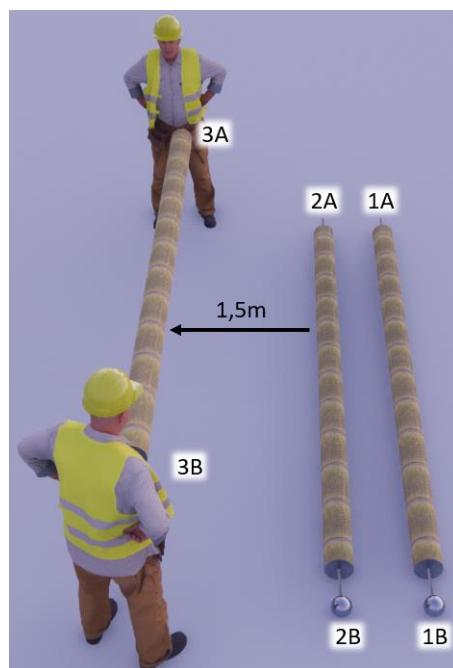
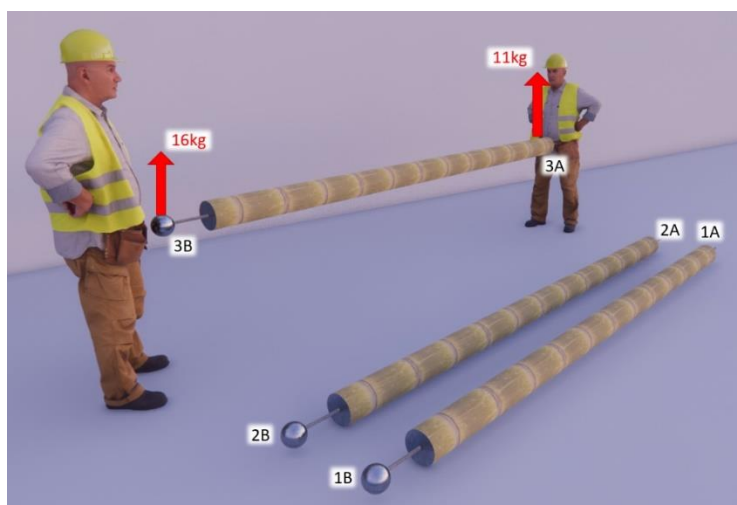
B.2.3 Déploiement d'un module d'orientation MO2

Etape n°1 : Position initiale des bambous



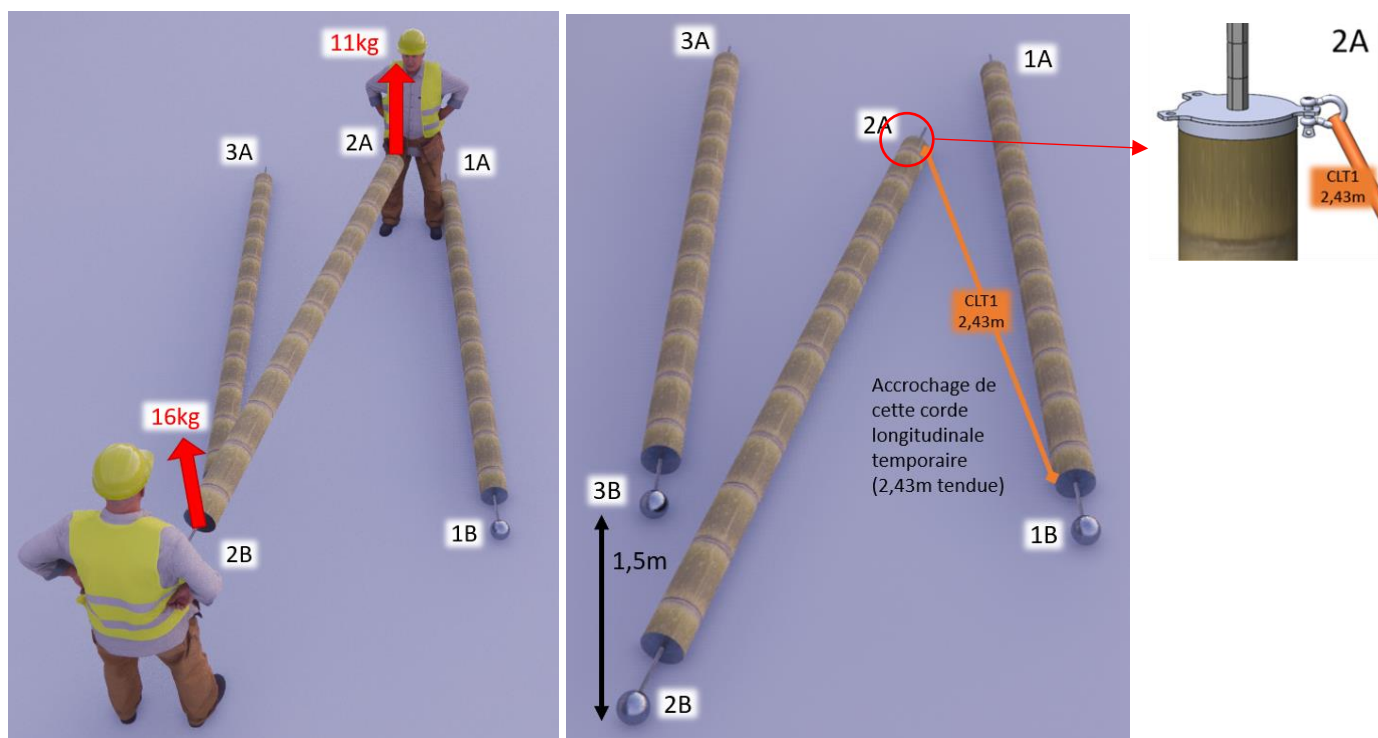
Disposer les 3 boutons les uns à côtés des autres dans l'ordre BAMB3, BAMB2 et BAMB1 en regardant du côté des boules.

Etape n°2 : Écartement du bambou 3



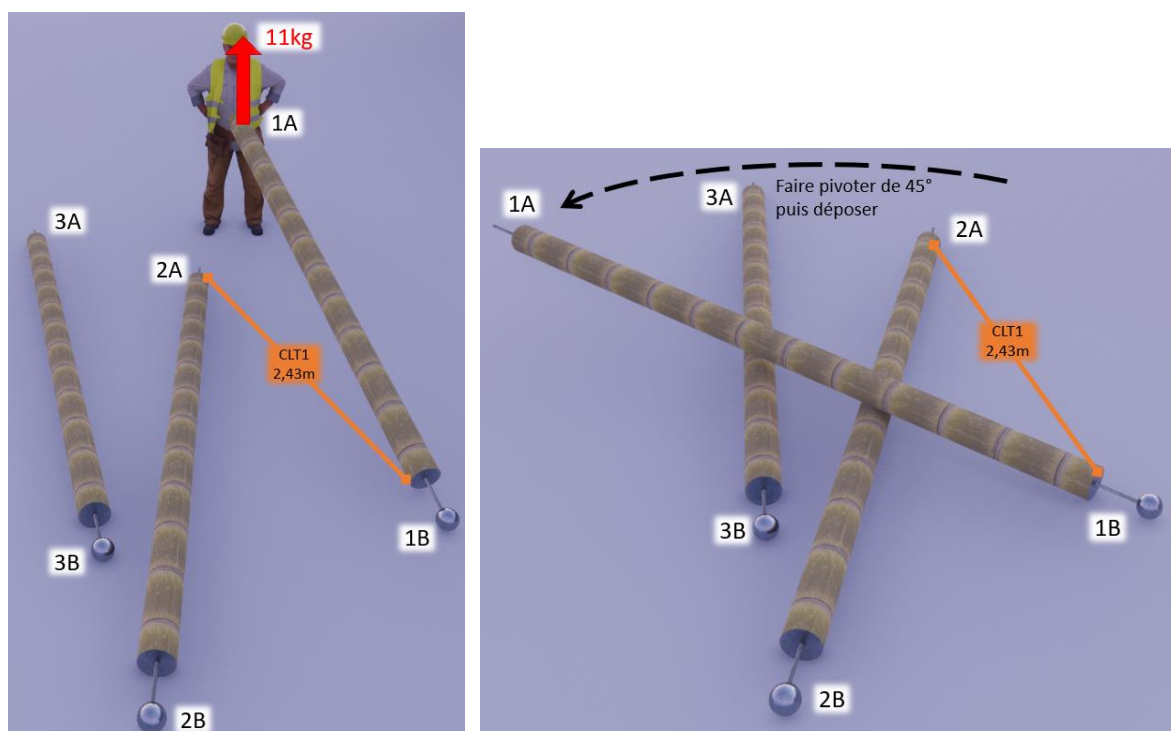
Soulever le bouton BAMB3 et le déplacer à 1,5m vers l'extérieur

Etape n°3 : Accroche de la première corde longitudinale temporaire



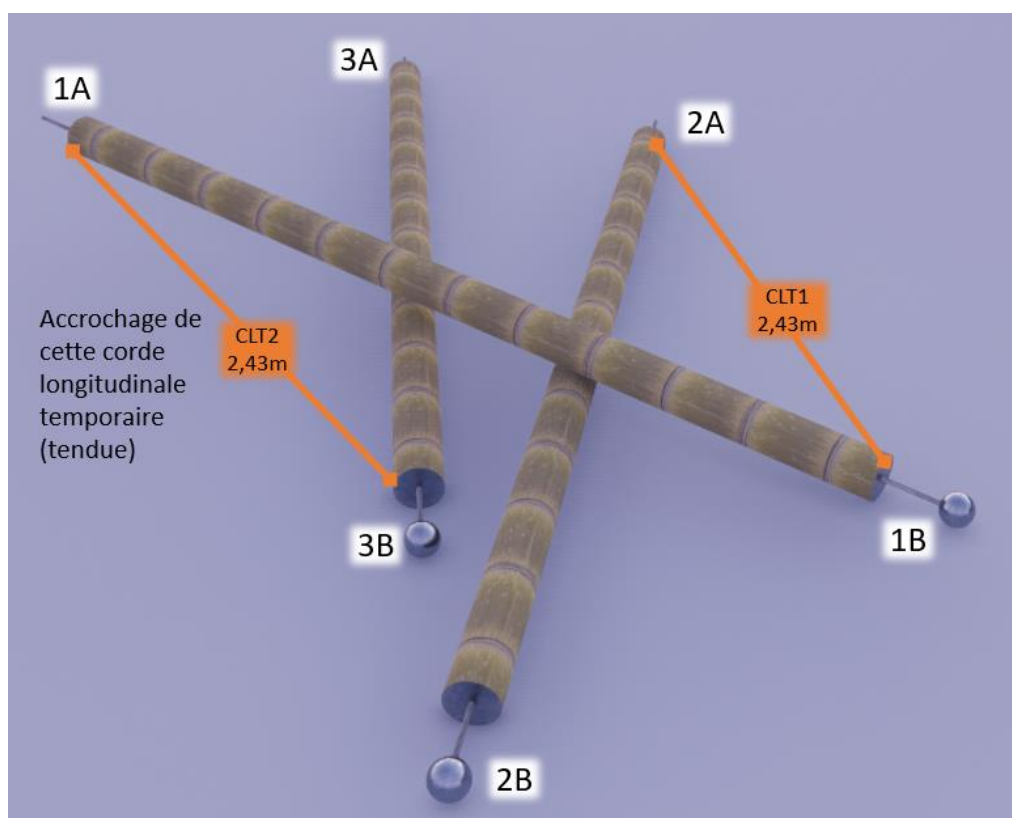
Soulever le bouton BAMB2 afin de placer le nœud 2B dans la continuité du bouton BAMB3 et à 1,5m du nœud 3B. Rapprocher le nœud 2A du nœud 1B tel que la corde longitudinale temporaire CLT1 (2,43m) puisse être accrochée entre les plaques de déploiement de ces nœuds.

Etape n°4 : Pivot du bambou 1



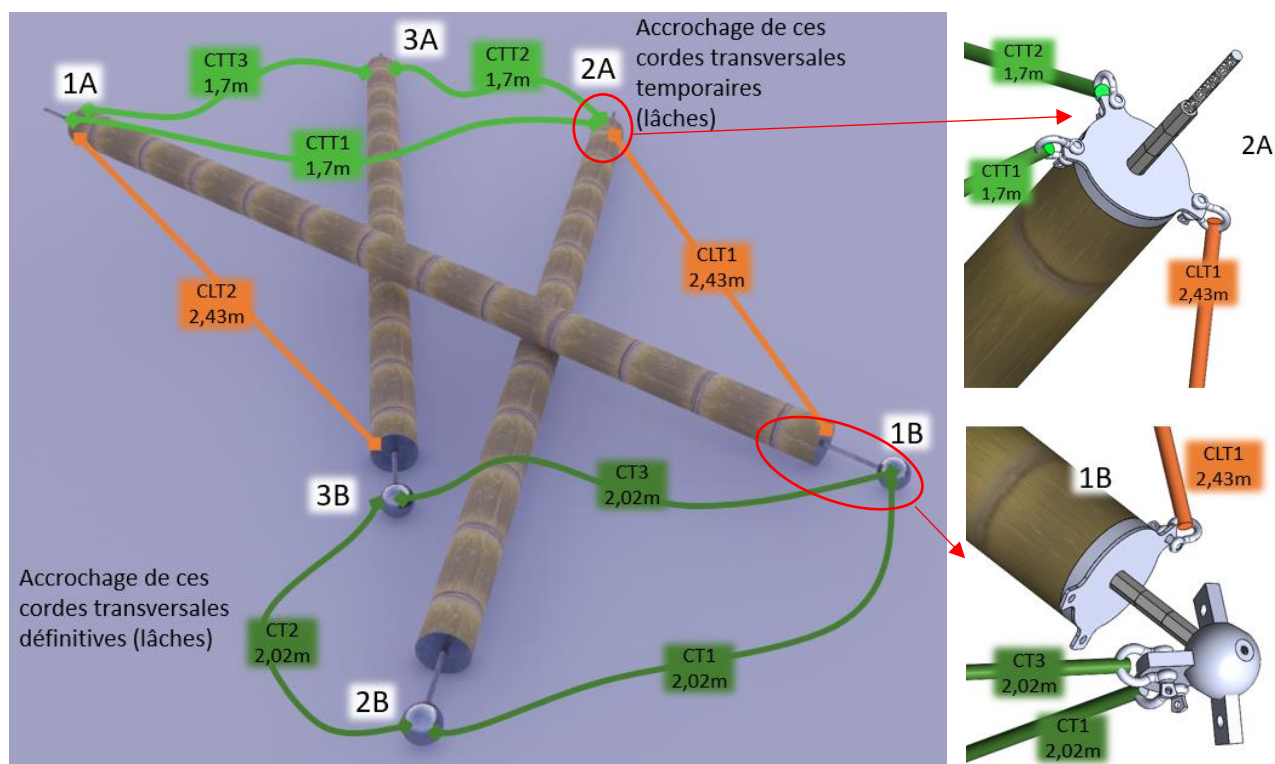
Soulever le nœud 1A afin de pivoter le bouton BAMB1 de 45° et de le poser au-dessus des boutons BAMB2 et BAMB3.

Etape n°5 : Accroche de la deuxième corde longitudinale temporaire



Accrocher la corde longitudinale temporaire CLT2 (2,43m) entre les nœuds 1A et 3B.

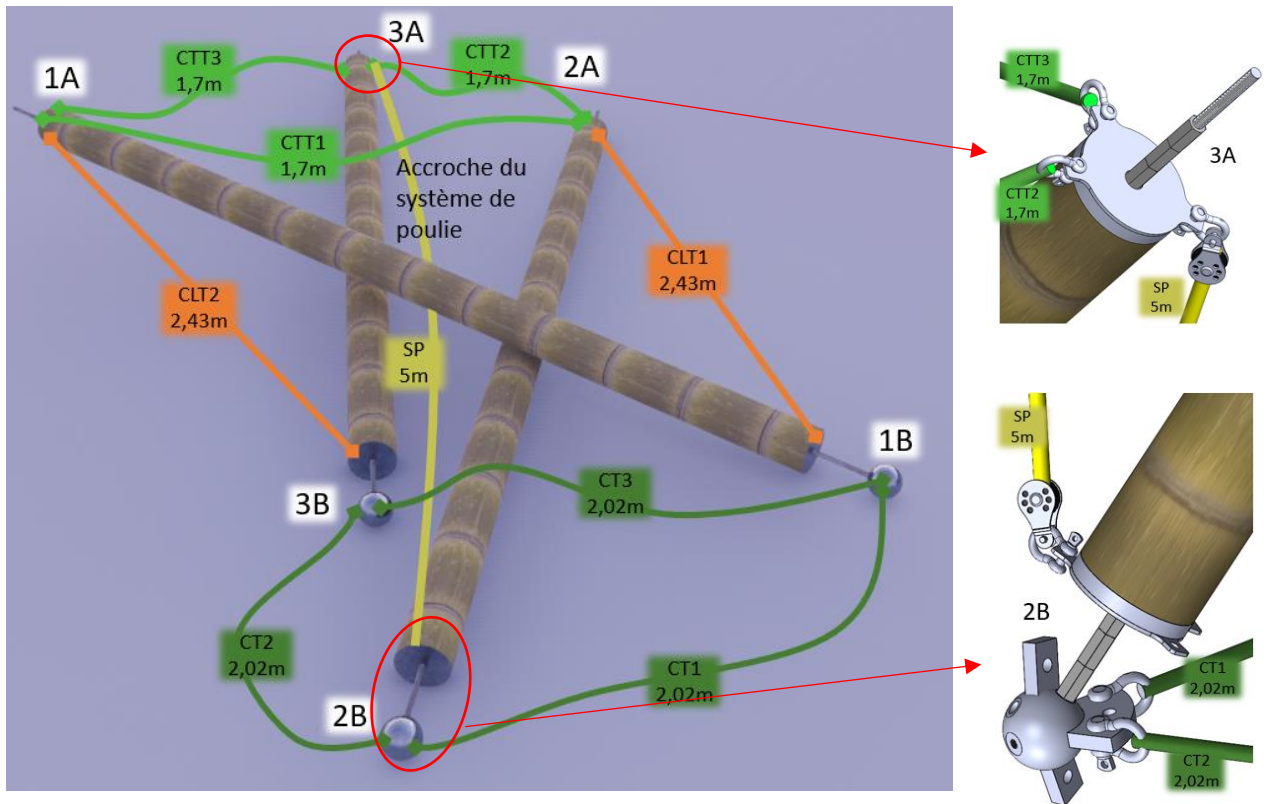
Etape n°6 : Accroche des cordes transversales permanentes et temporaires



Accrocher les cordes transversales temporaires CTT1 (1,7m) entre les nœuds 1A et 2A, CTT2 (1,7m) entre les nœuds 2A et 3A, CTT3 (1,7m) entre les nœuds 3A et 1A. Des annotations

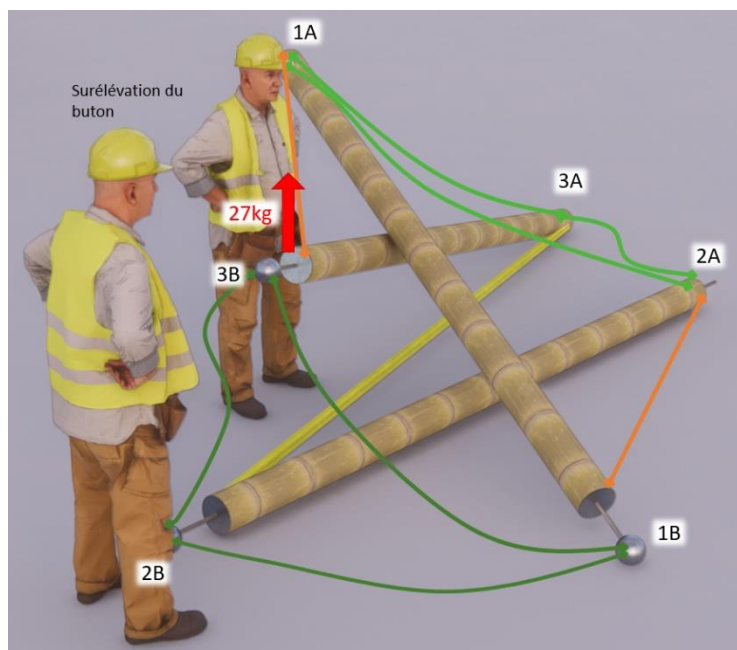
sont inscrites sur les plaques de déploiement pour réaliser les bonnes connections. Accrocher les cordes transversales permanentes CT1 (2,02m) entre les nœuds 1B et 2B, CT2 (2,02m) entre 2B et 3B, CT3 (2,02m) entre 3B et 1B.

Etape n°7 : Accroche du système poulies



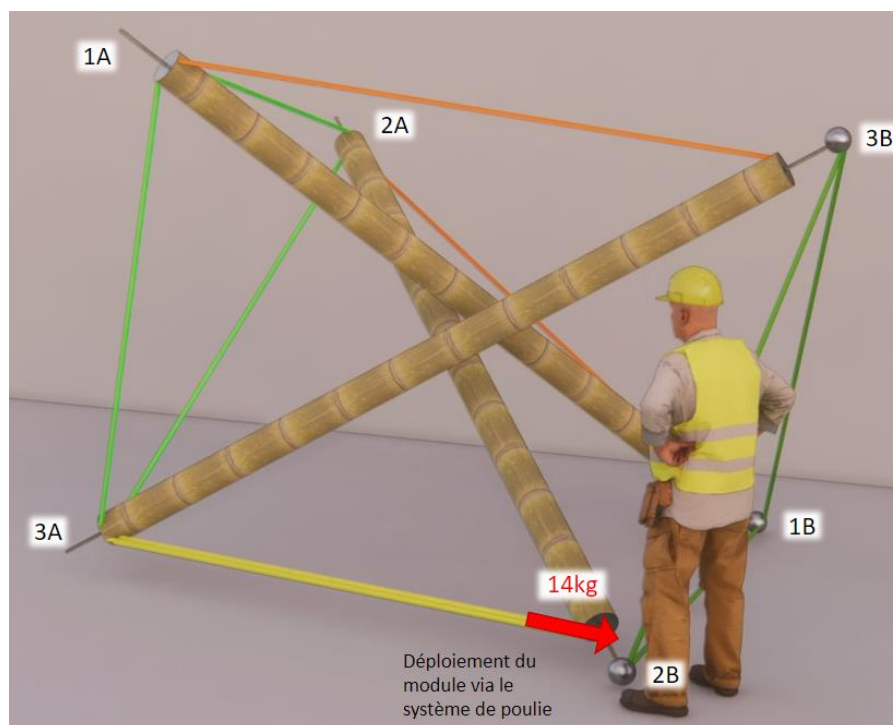
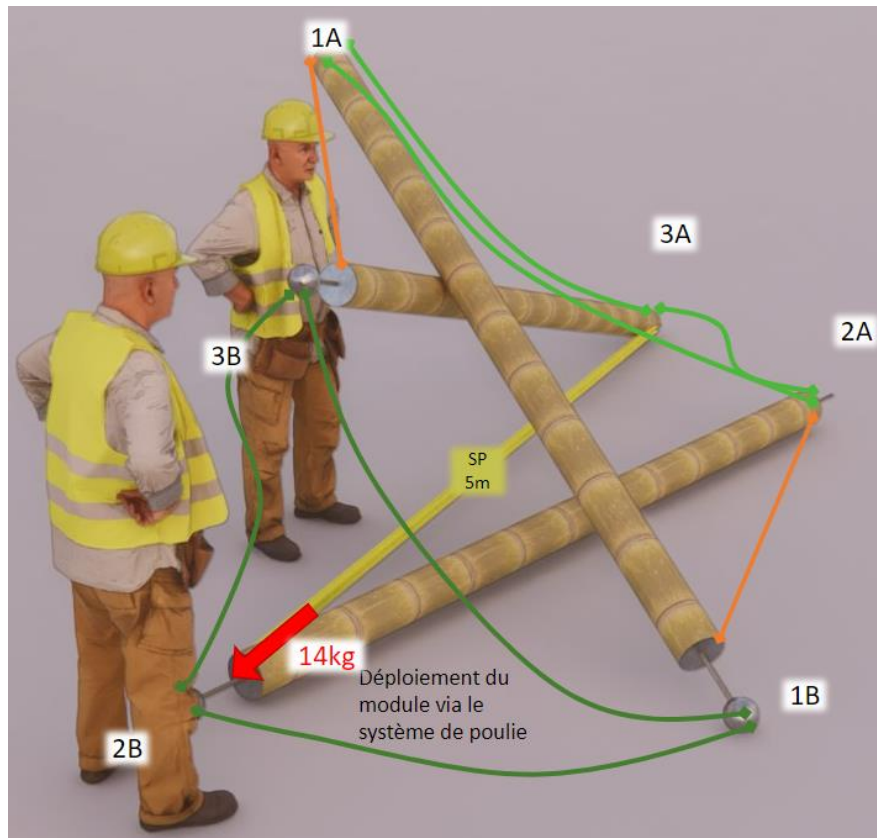
Accrocher le système de poulies entre les plaques de déploiement des nœuds 3A et 2B.

Etape n°8 : Élévation du buton 3



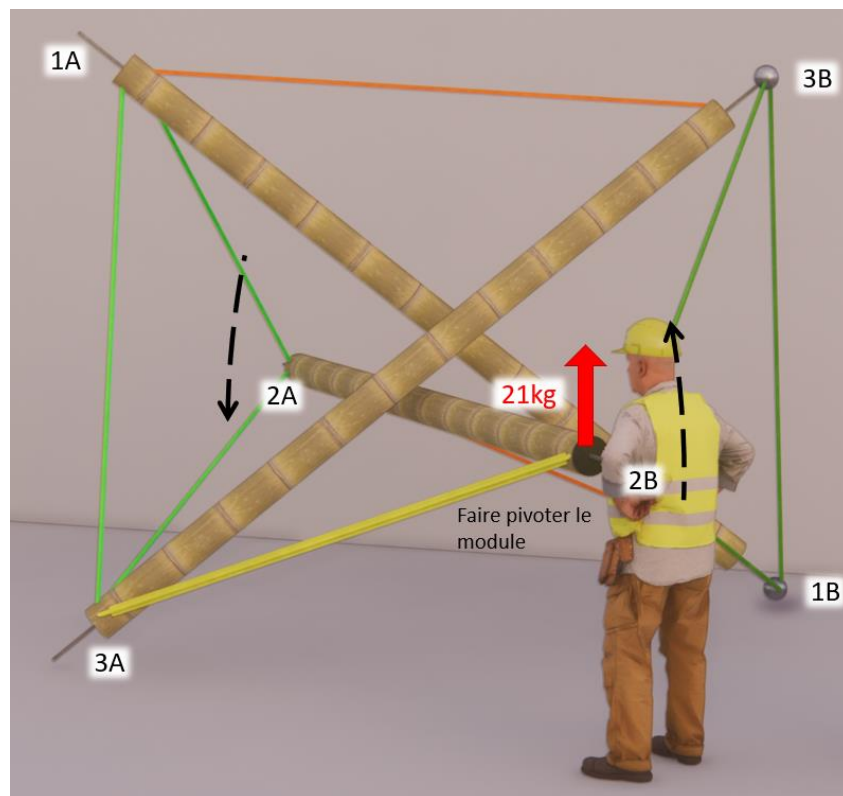
Soulever le nœud 3B du BAMB03 à une hauteur d'au moins 0,5m afin de diminuer l'effort de traction nécessaire à l'élévation du module par le système de poulies SP. Le BAMB1 est retenu grâce à la corde temporaire reliant les extrémités 1A et 3B.

Etape n°9 : Déploiement du module



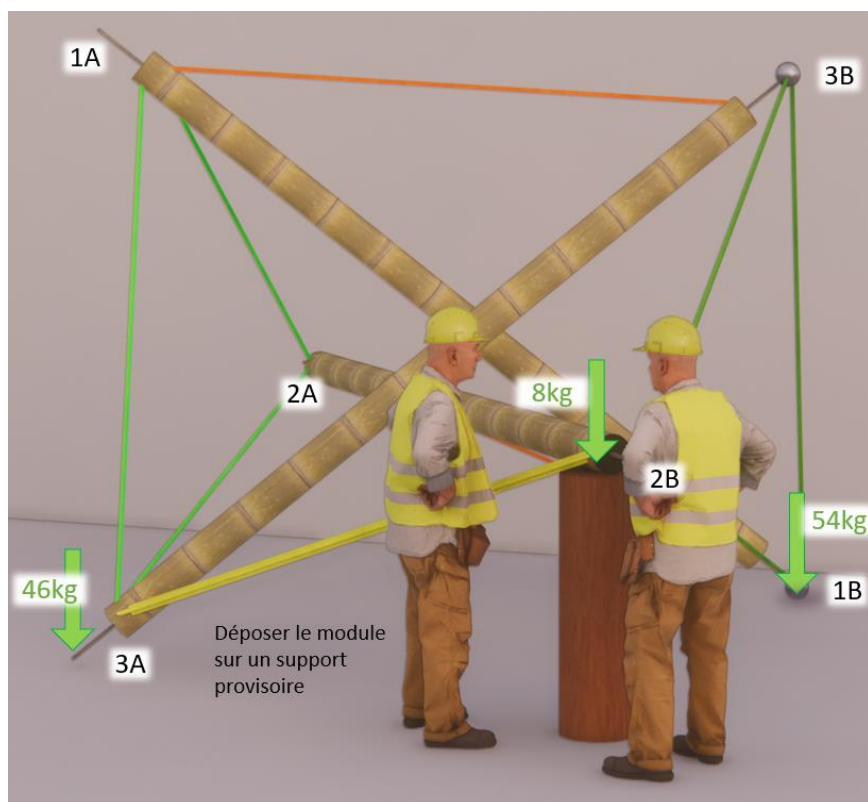
En vous appuyant sur le nœud 2B, tirer sur le système de poulies afin de donner la géométrie souhaitée à la structure. Bloquer la corde du système de poulies en faisant un nœud à la manille.

Etape n°10 : Pivot du module

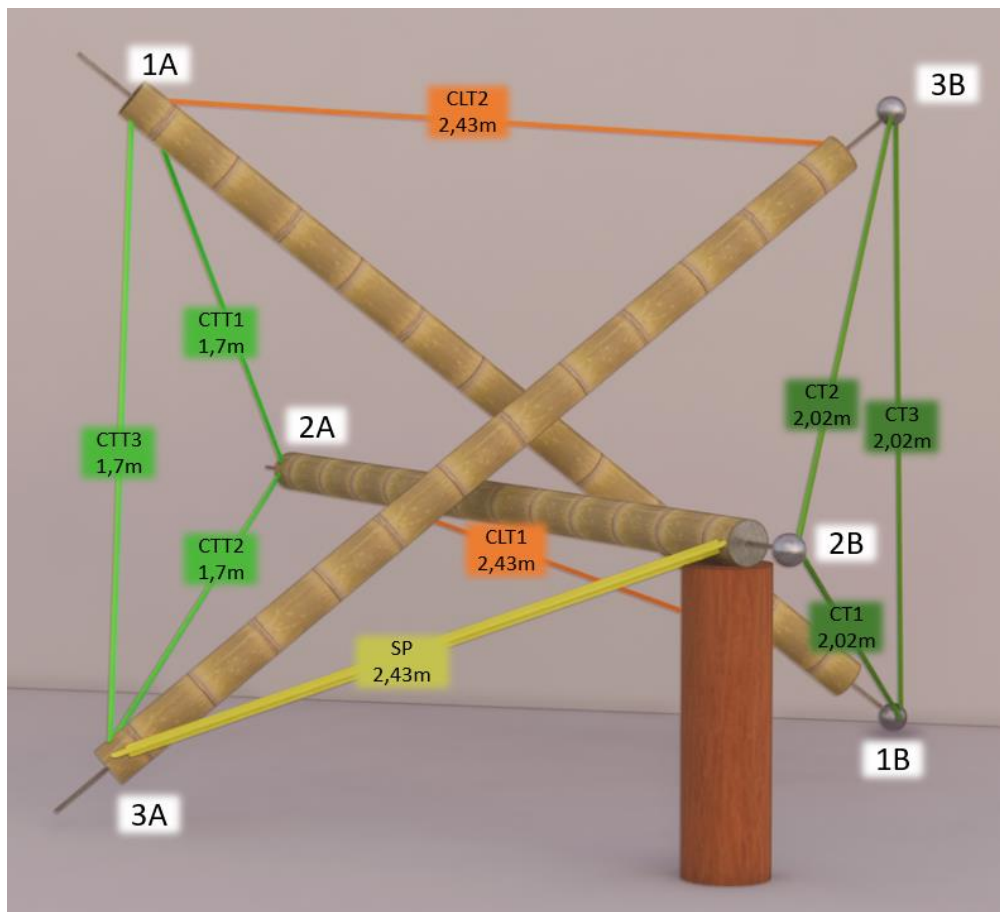


Faire pivoter la structure en soulevant le nœud 2B afin de la positionner selon son orientation finale.

Etape n°11 : Soutient du module



Placer un support provisoire sous le BAMB2 près du nœud 2B afin d'éviter le basculement du module. La force pour maintenir le module pivoté devient faible. L'équilibre de la structure est assuré par le fait que le support est légèrement plus petit qu'il ne devrait, la structure penchant donc légèrement vers le support et non vers le côté non soutenu.



Le module MO2 est maintenant déployé. A ce stade, la masse du module est de 108kg.

B.3 Assemblage de deux modules

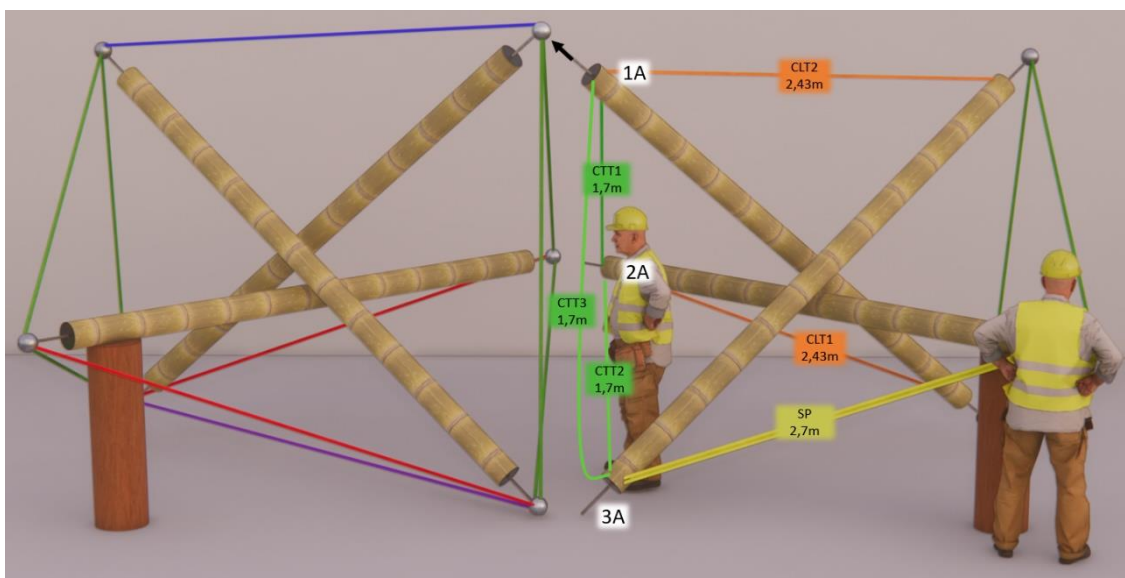
Une fois un module déployé, il faut l'assembler au dernier module déjà monté de la structure. Un assemblage de deux modules se fait toujours entre un module de type MO1 et de type MO2. Pour assembler le module déployé au dernier module monté de la structure, 5 étapes sont nécessaires.

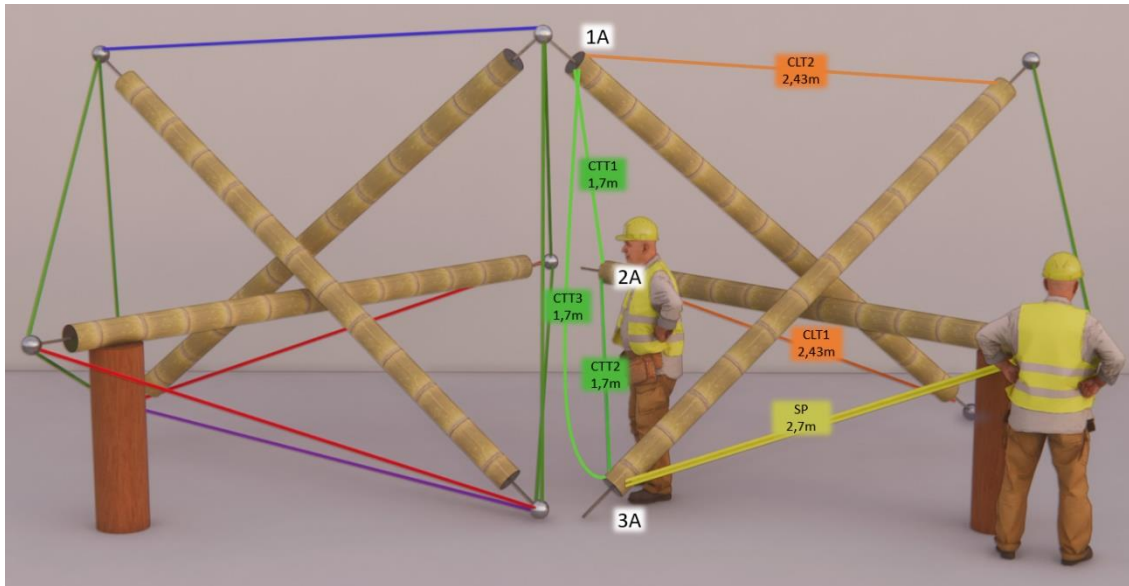
Le protocole d'assemblage suivant est celui d'un module MO2 venant se connecter à un module MO1.

Etape n°1 : Assemblage du module au précédent

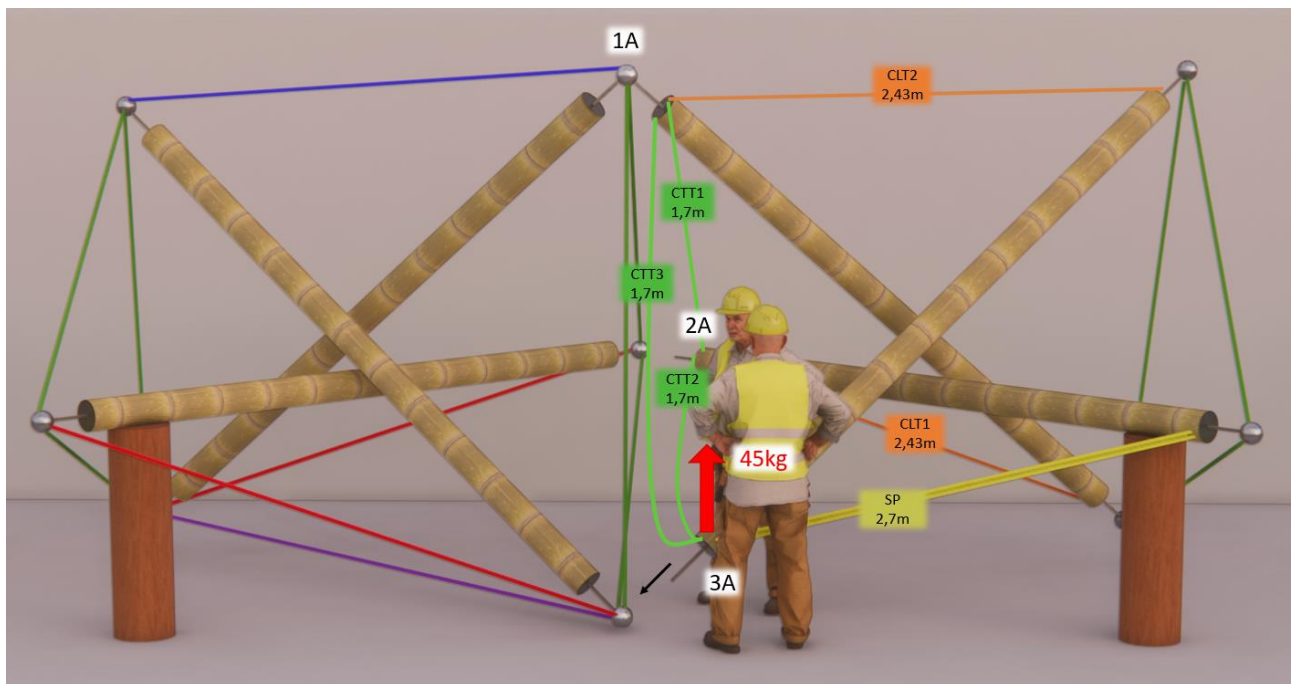
Cette première étape consiste à détendre le système de poulie du deuxième module afin d'avoir un module maniable, avec une faible rigidité, permettant de manipuler plus facilement les boutons afin de faire passer les tiges filetées des boutons du nouveau module dans les alésages des nœuds du module précédant. L'ordre d'assemblage est défini ci-dessous.

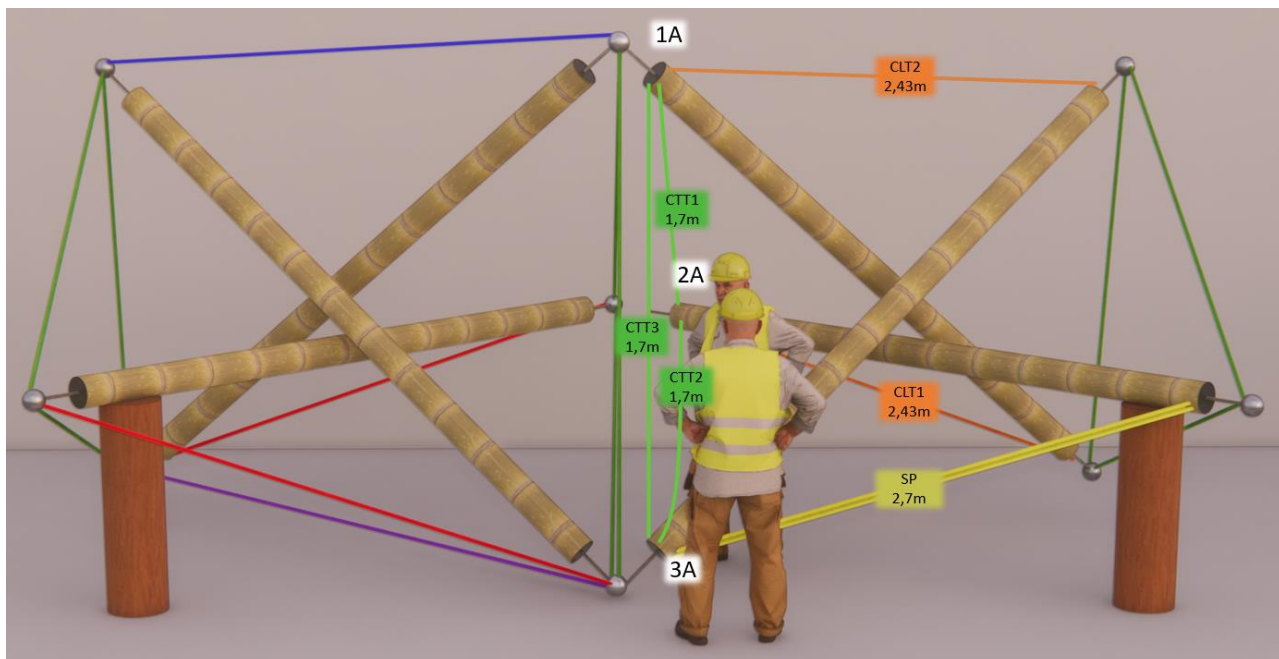
La première tige filetée à être insérée dans un nœud est celle se trouvant le plus haut, au nœud 1A, elle sera la plus facile à mettre car les autres boutons ne sont pas encore contraints par les nœuds du module précédant. En détendant le système de poulies SP, le module va légèrement perdre de la hauteur. Ainsi, la tige filetée du nœud 1A est plus basse que le nœud final et peut être placée dans l'axe de l'alésage de la boule du module précédant.



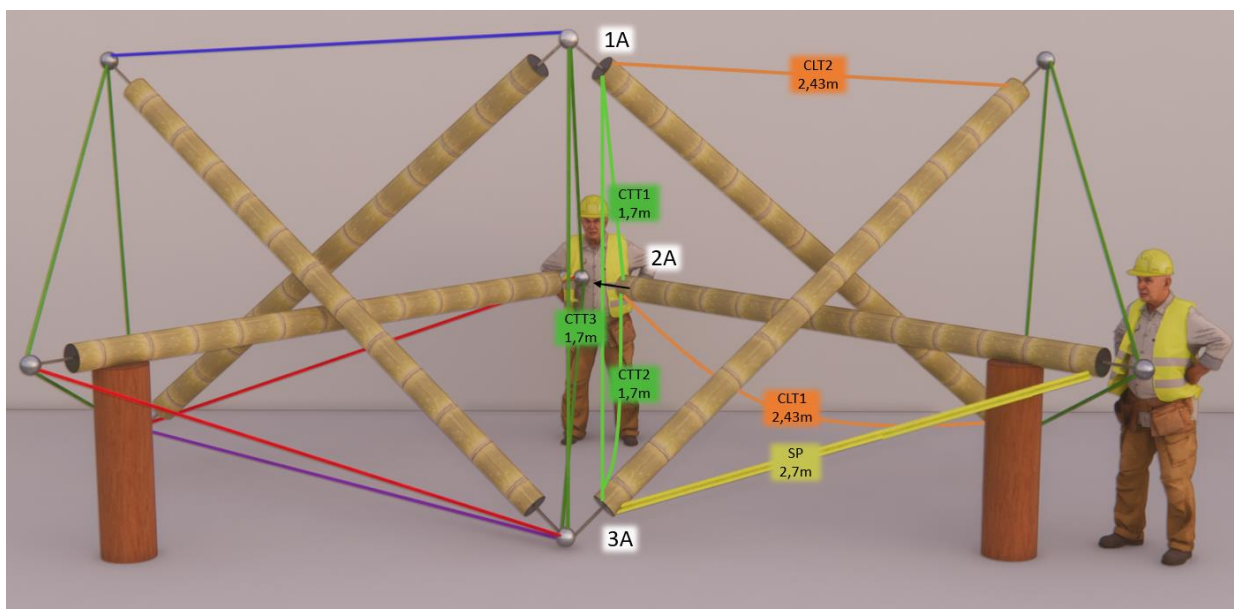


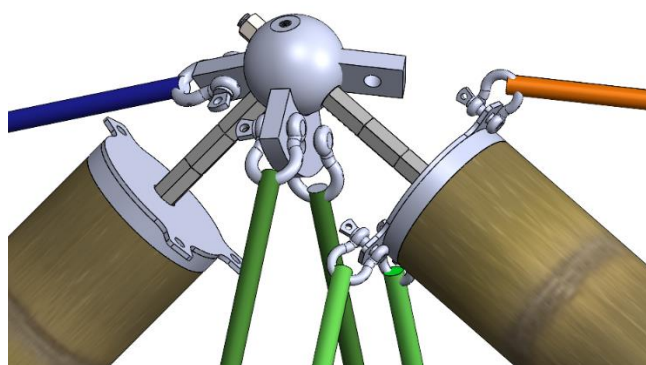
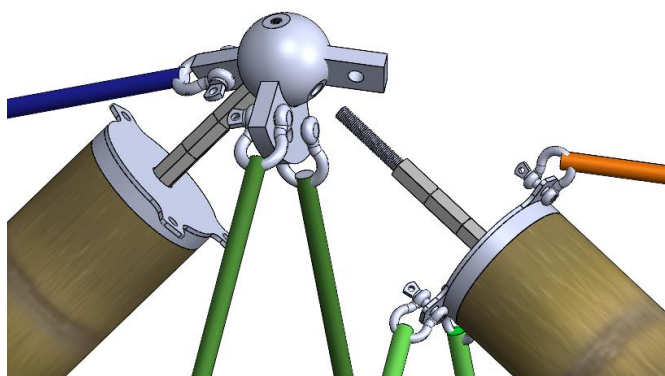
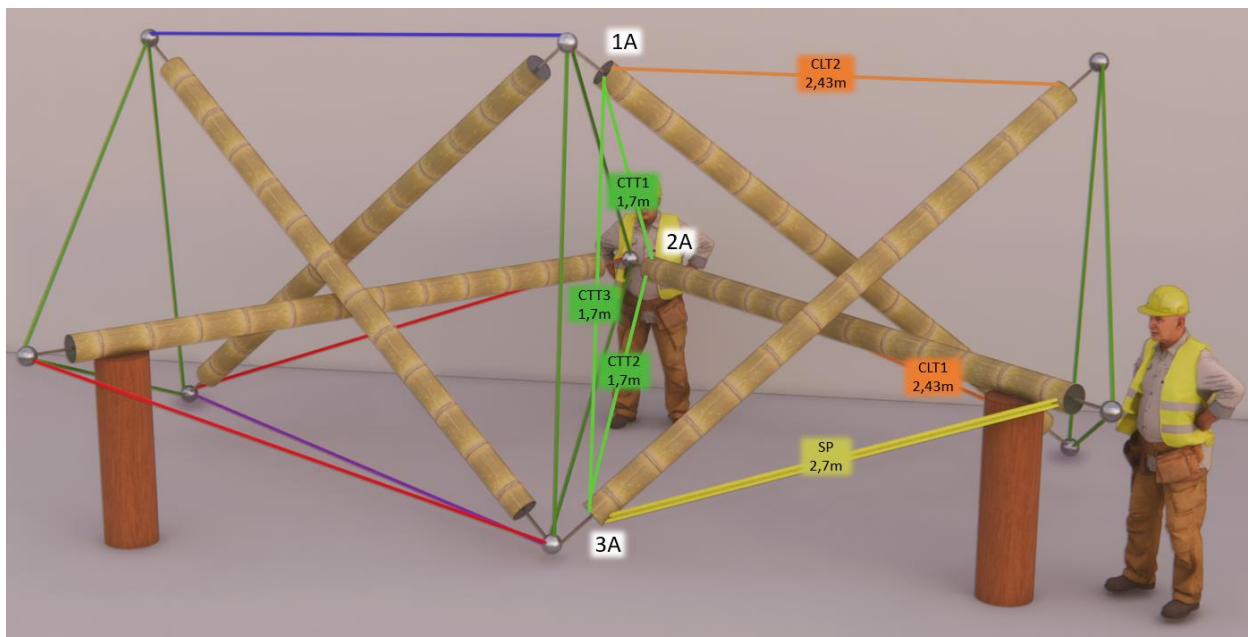
La seconde tige filetée à être connectée au nœud du module précédant est celle se trouvant sur le nœud le plus bas, le nœud 3A. Pour cela, il faut soulever le nœud 3A et le décaler vers l'intérieur du module. Ainsi, la tige filetée du nœud 3A se trouvera dans l'axe de l'alésage de la boule du nœud précédant. La maniabilité est suffisante pour pouvoir enfiler la tige aisément. En faisant cela, les cordes CTT2 et CTT3 se détendent. Il reste ensuite à enfiler la tige filetée dans l'alésage, ce qui retend la corde CTT3.





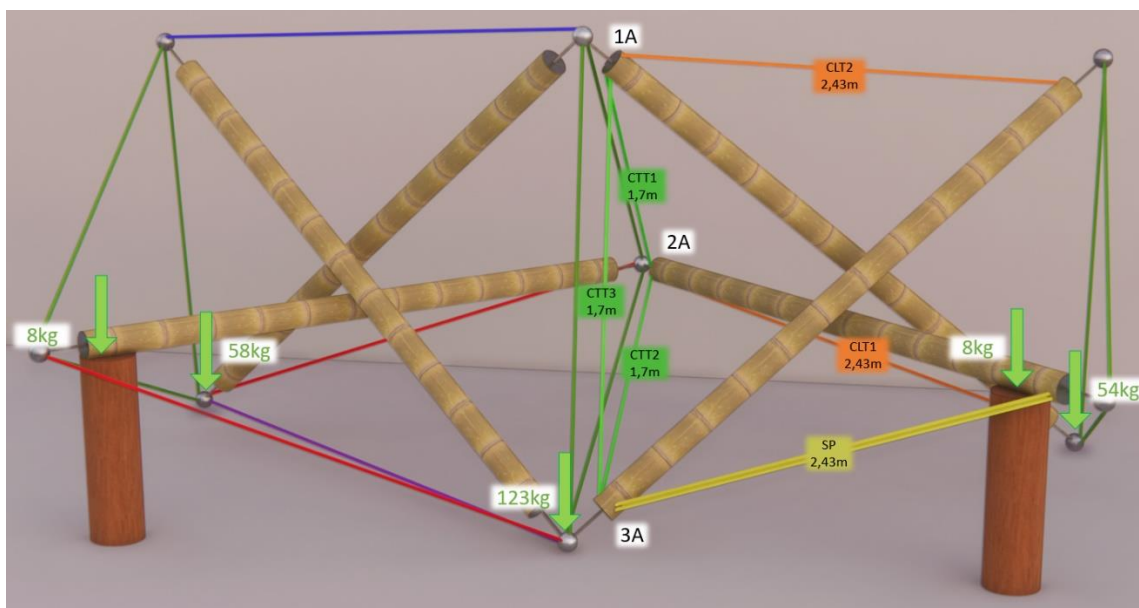
La troisième tige filetée à glisser dans l'alésage du nœud correspondant est celle du milieu, au nœud 2A. Il s'agit de la connexion la plus compliquée à effectuer car la structure est fortement contrainte par les boutons déjà connectés au reste de la structure. Comme il s'agit du bouton dont l'autre extrémité (le nœud 2B) est lié au système de poulies, il est possible de lui donner une certaine maniabilité. En effet, en détendant le système de poulies SP, le nœud 2B peut être facilement déplacé et donc, cela permet au nœud 2A de bouger également. Ainsi, on peut placer la tige filetée dans l'axe de l'alésage du nœud du module précédant et l'enfiler. En faisant cela, le corde CTT2 et CLT1 se détendent. Il est important d'allonger le système poulie pour avoir la maniabilité suffisante.





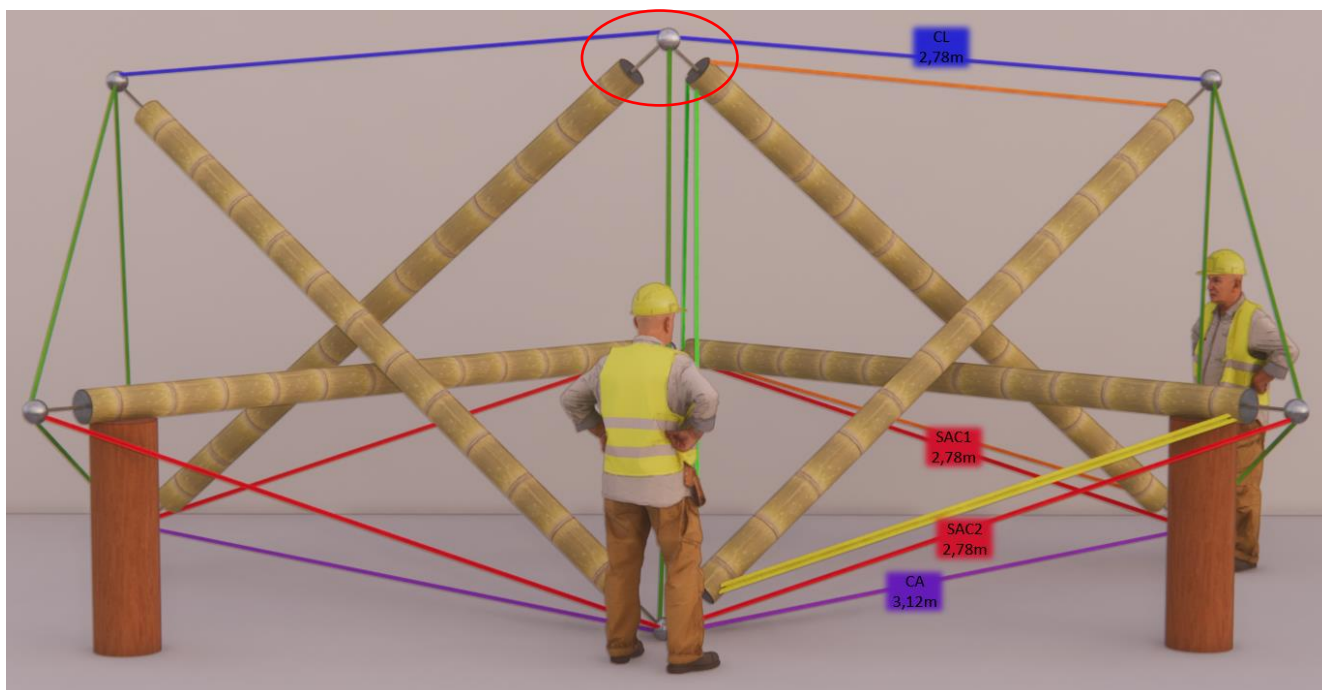
L'assemblage de chaque tige enfilée se termine en vissant un écrou à la partie de la tige filetée sortant de la boule.

Etape n°2 : Retendre le nouveau module par le système de poulie



Une fois que le nouveau module est assemblé au reste de la structure, retendre le nouveau module par le système de poulie afin de lui rendre sa bonne forme géométrique.

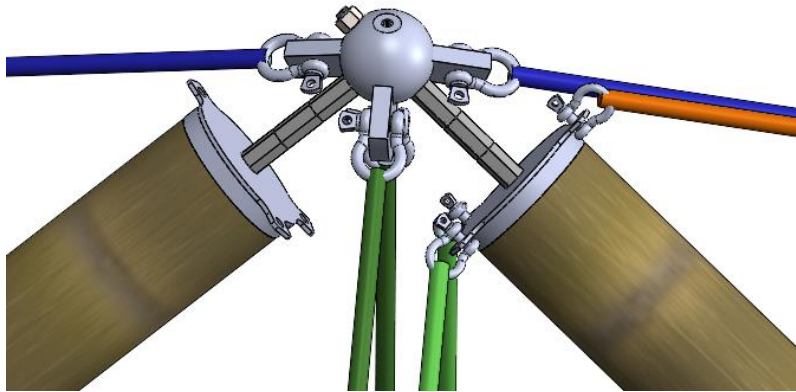
Etape n°3 : Accroche des éléments permanents



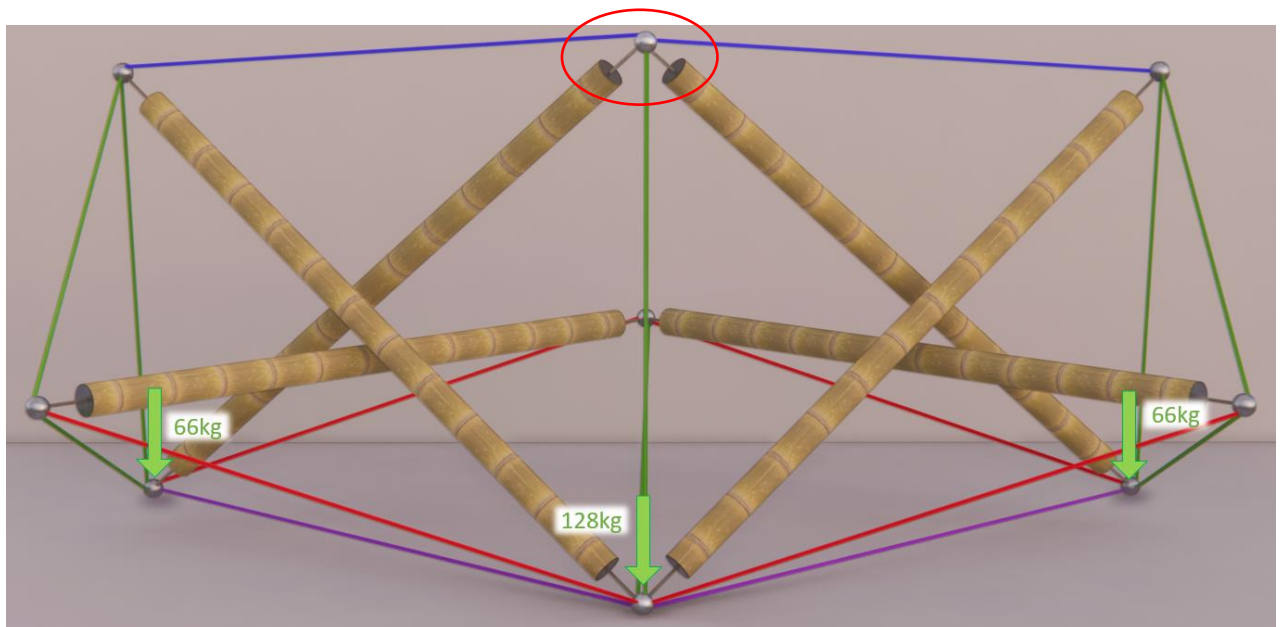
Dans un premier temps, accrocher la corde longitudinale permanente CL (2,78m), les sangles SAC1 et SAC2. Ensuite, accrocher la corde additionnelle CA (3,12m) sur le nouveau module.

Cette dernière corde ferme la géométrie du module c'est pourquoi il est nécessaire de rapprocher les nœuds avec force (1,2kN). Pour cela, une sangle à cliquet additionnelle doit

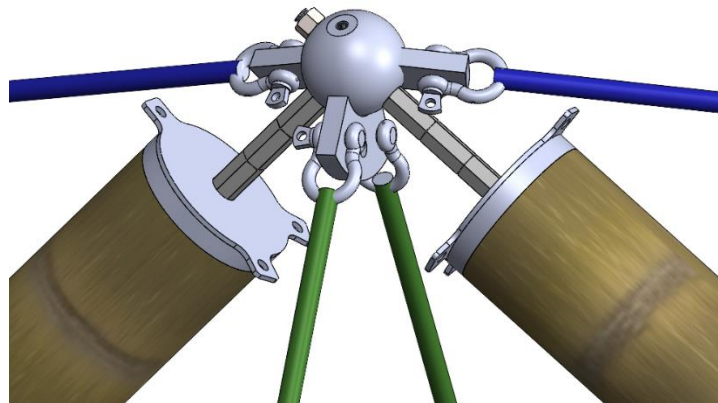
être accrochée aux crochets des sangles arrivant aux nœuds pour aider. Cette sangle permet de rapprocher les deux nœuds et accrocher la corde additionnelle sans tirer sur celle-ci.



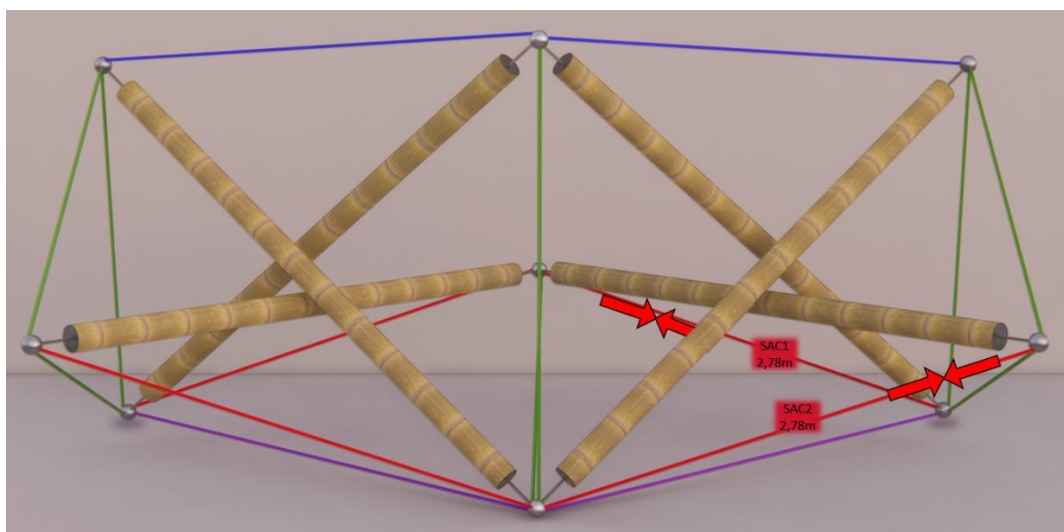
Etape n°4 : Enlèvement des éléments temporaires



Retirer les cordes transversales temporaires (CTT1, CTT2 et CTT3), longitudinales temporaires (CLT1 et CLT2) et le système de poulie (SP). La structure est posée sur le sol par 3 nœuds, les appuis peuvent-être retirés. La masse totale de ces deux modules est de 260 kg.



Etape n°5 : Prétendre le module



Mettre la prétension initiale dans le nouveau module par les sangles.

Les deux modules sont maintenant assemblés. Il ne reste plus qu'à répéter ces étapes pour assembler toute la structure.

B.4 Informations pour la passerelle à 5 modules

Les types de boules à placer à chaque étape sont listés dans le tableau ci-dessous.

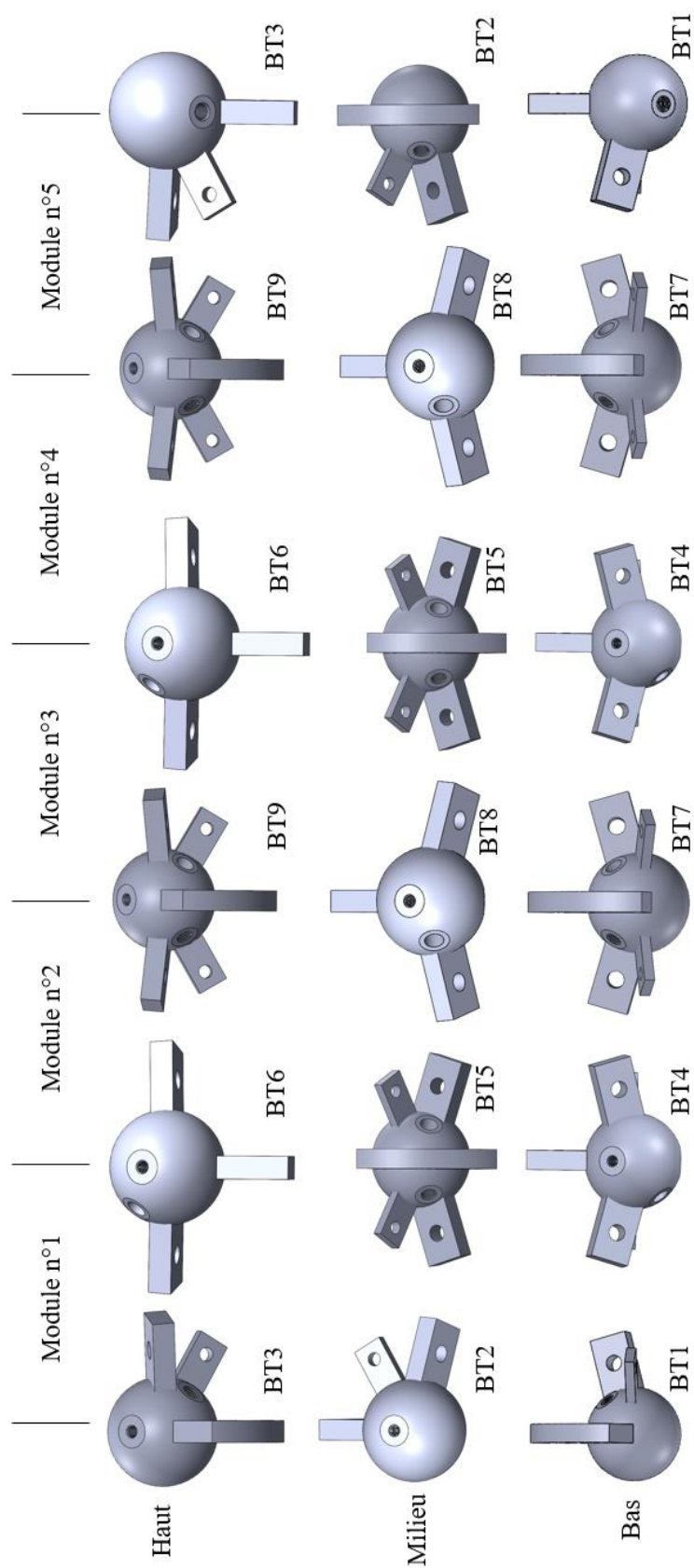
Déploiement du module :	Type de nœud par extrémité					
	1A	2A	3A	1B	2B	3B
M1	BT3	BT2	BT1	BT4	BT5	BT6
M2	BT4	BT5	BT6	BT7	BT8	BT9
M3	BT7	BT8	BT9	BT4	BT5	BT6
M4	BT4	BT5	BT6	BT7	BT8	BT9
M5	BT7	BT8	BT9	BT1	BT2	BT3

En plus des notations du type de nœud sur chaque boule, elles sont gravées par une lettre correspondant à leur type de boule. Le tableau de correspondance est visible ci-dessous.

Lettre gravée	Type de nœud
A	BT1
B	BT2
C	BT3
D	BT5
E	BT4
F	BT6
G	BT7
H	BT8
I	BT9

Tableau B.0.1 – Tableau de correspondance

La disposition des nœuds tels qu'ils sont projetés sur un plan longitudinal de la structure est visible ci-dessous.



ANNEXE C

PROTOCOLE DE REALISATION DES CORDES

ANNEXE C : PROTOCOLE DE RÉALISATION DES CORDES

La passerelle de tenségrité est composée de 28 câbles. Ces câbles sont réalisés à partir de corde marine à haute résistance. Les longueurs de ces cordes doivent être les plus précises possible afin de correspondre au mieux au modèle numérique. Pour cela, un protocole de découpe et de réalisation des cordes doit être établi.

C.1 Résumé des essais sur la corde

Lors des essais sur la corde, nous sommes arrivés à la conclusion que :

- Le système d'attache de la corde doit être une épissure, présentée à la figure ci-dessous. L'épissure désigne la fermeture de la corde sur elle-même en introduisant l'extrémité libre de la corde dans l'âme creuse de la corde.



FIGURE C.1 – Photo d'une épissure

- Les avantages de l'épissures sont : le faible glissement de la corde dans l'épissure et la possibilité d'ajuster facilement la longueur de la corde en ajustant celle de l'épissure.
- Un premier chargement doit être appliqué à la corde pour permettre aux fibres de se réarranger et d'avoir un comportement prévisible. En se réarrangeant, la corde s'allonge, il faut donc prévoir cet allongement lors de la découpe des cordes.
- La longueur finale de la corde est la longueur après ce premier chargement. C'est la longueur nécessaire à la construction des modules de tenségrité.

C.2 Objectifs

Les éléments de la structure ont une longueur issue de la géométrie définie dans le logiciel *Grasshopper* et les cordes ne sont qu'une partie de ces éléments. Il est nécessaire de calculer précisément la longueur d'une corde afin que, après assemblage avec les autres parties, l'élément réel ait la même dimension que l'élément théorique. La longueur d'une corde L_{corde} est déterminée par la longueur de l'élément câble auquel sont soustraits les longueurs des éléments d'accroche, comme illustré à la FIGURE C.2. Les valeurs des longueurs pour les trois types de corde présentes dans la structure sont reprises au TABLEAU C.1.

Les longueurs de cône $L_{cône}$ (cfr C.3 Réalisation des cordes – étape 2) ne sont pas comptabilisées dans L_{coupe} de chaque corde. Cependant, il est nécessaire de les prendre en compte pour la longueur totale de corde utilisée. On comptabilise $2 * \frac{1}{2} L_{cône}$ par corde, étant donné qu'une longueur de cône est utilisée pour les extrémités de deux cordes.

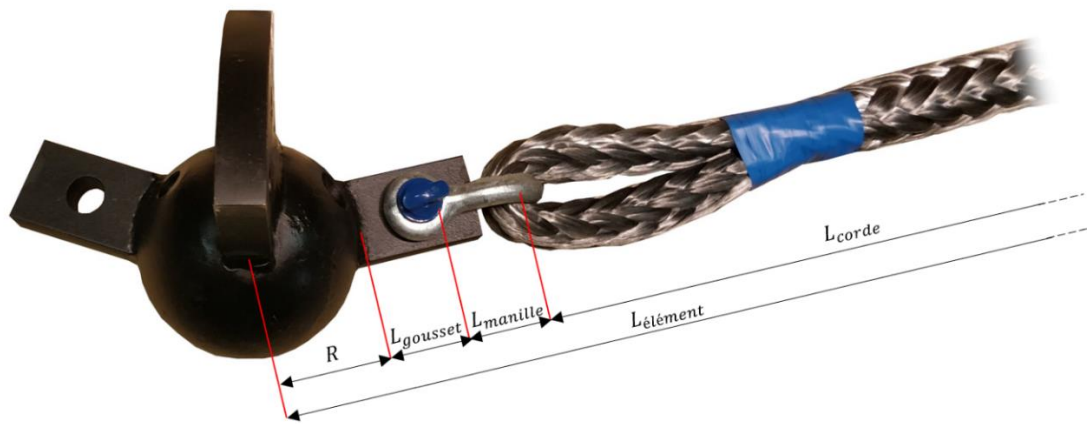


FIGURE C.2 – Jonction d'une corde au nœud

$$L_{corde} = L_{élément} - 2 * (R + L_{gousset} + L_{manille})$$

[mm]	Type de corde		
	Transversale	Longitudinale	Additionnelle
$L_{élément}$	2294	3073	3409
R	50	50	50
$L_{gousset}$	38.5	48.5	56.5
$L_{manille}$	48	48	36
L_{corde}	2021	2780	3124

TABLEAU C.1 - Détail des longueurs composant l'élément

Après réalisation des épissures aux 2 extrémités des cordes, les cordes doivent être prétendues pour réarranger les fibres et les rigidifier. Cette prétension provoque un allongement résiduel de la corde et est donc à prendre en compte pour obtenir les longueurs souhaitées, il s'agit du phénomène viscoplastique. Les longueurs de découpe des cordes doivent donc prendre en compte :

- Un surplus de corde pour la réalisation de l'épissure de 33cm. Ces 33cm permettent une réalisation simple de l'épissure (la réalisation se complique au plus la longueur d'épissure augmente), une bonne résistance de l'épissure au glissement (le glissement diminue au plus la longueur de l'épissure est grande) ainsi qu'une bonne capacité d'ajustement de la longueur de la corde si cette dernière devait être allongée dans une utilisation ultérieure.
- Un surplus de corde pour la réalisation de l'œil.
- Le rétrécissement local de la corde à cause du passage de l'extrémité de la corde dans l'âme creuse pour réaliser l'épissure. En effet, afin de passer l'extrémité de la corde dans l'âme creuse de la corde, le diamètre de l'âme creuse doit augmenter. Cette augmentation du diamètre de l'âme creuse a pour conséquence de raccourcir la longueur de la corde localement. Pour une longueur d'épissure de 33cm, il faut prévoir 11cm de corde en plus à chaque épissure entre les points de contact manille/corde afin de contrer ce phénomène. Cette valeur de 11cm, appelée longueur d'augmentation d'âme creuse $L_{a.a.c.}$, a été trouvée lors d'essais de réalisation d'épissure.

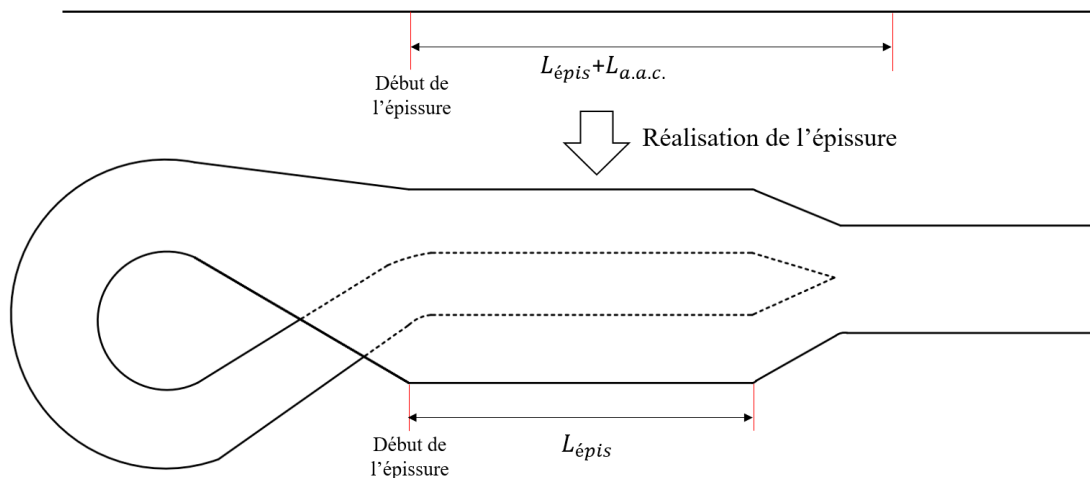


FIGURE C.3 - Schéma montrant la longueur d'augmentation de l'âme creuse

- L'allongement résiduel de la corde après avoir été prétendue, le premier chargement réarrangeant les fibres et allongeant plastiquement la corde. Ces valeurs, disponibles au TABLEAU C.2, ont été trouvées expérimentalement en mesurant chaque type de corde tendue à la main, avant et après la mise en prétension (cfr C.3 Réalisation des cordes – étape 11). Il faut donc prévoir une corde légèrement plus courte à la découpe afin d'obtenir la bonne longueur finale après prétension.

La corde préparée avec ses épissures mais pas encore prétendue est appelée libre de prétension et a une longueur $L_{corde,0}$.

$$L_{coupe} = L_{corde} - Allongement + 2 * (L_{épiss} + L_{oeil} + L_{a.a.c.})$$

[mm]	Type de corde		
	Transversale	Longitudinale	Additionnelle
L_{corde}	2021	2780	3124
$Allongement$	124	170	191
$L_{corde,0}$	1897	2610	2933
$L_{épiss}$	330	330	330
L_{oeil}	100	100	100
$L_{a.a.c.}$	110	110	110
L_{coupe}	2977	3690	4013
$L_{cône}$	50	50	50

TABLEAU C.2-Détail longueurs de découpe des cordes sans prétension

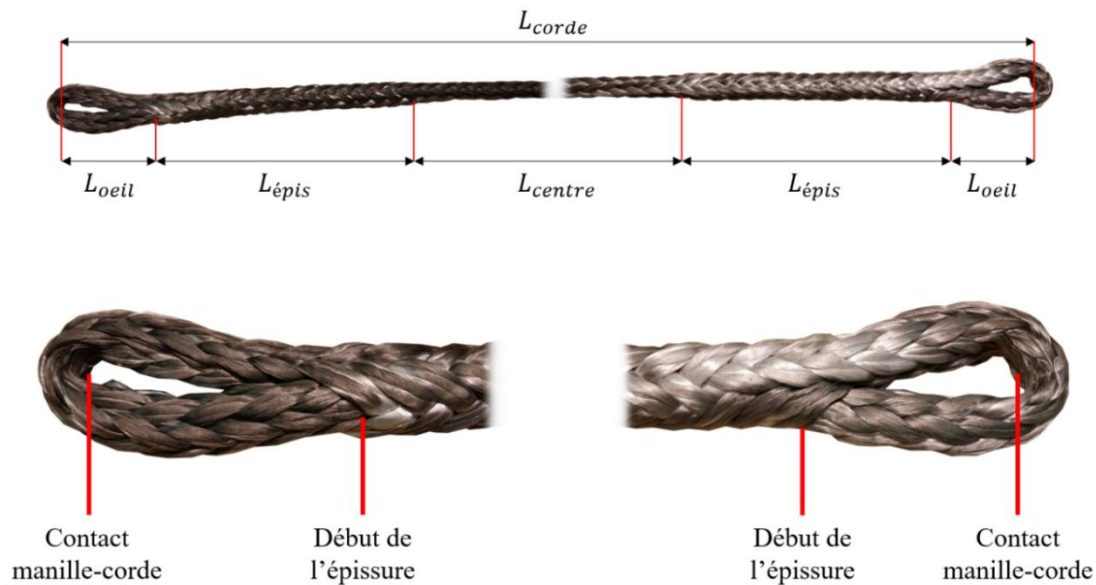


FIGURE C.4 - Différentes longueurs d'une corde préparée

Pour la passerelle composée de 5 modules et d'une corde additionnelle par module, il est nécessaire d'avoir :

Type de corde	Nombre	L_{coupe} [mm]	Total [mm]
Transversale	18	2977	53586
Longitudinale	5	3690	18450
Additionnelle	5	4013	20065
$L_{cône}$	28	50	1400
Total :			93501

TABEAU C.3 – Récapitulatif longueur de corde nécessaire

Pour la passerelle composée de 5 modules et de deux cordes additionnelles par module, il est nécessaire d'avoir 113,816 mètres de corde.

C.3 Réalisation des cordes

Le matériel nécessaire est :

- Du scotch,
- Un cutter très coupant,
- Une aiguille à long chas,
- Un mètre déroulant.

La réalisation d'une corde se fait en 13 étapes.

Etape 1 : Mesure avant découpe

Mesurer l_{coupe} de corde, correspondant à la longueur de corde nécessaire à la réalisation de chaque type de corde (voir TABLEAU C.4).

Type de corde	L_{coupe} [mm]
Transversale	2977
Longitudinale	3690
Additionnelle	4013

TABEAU C.4 - Longueur de coupe des différents types de corde

Etape 2 : Découpe de la corde et réalisation d'une cône

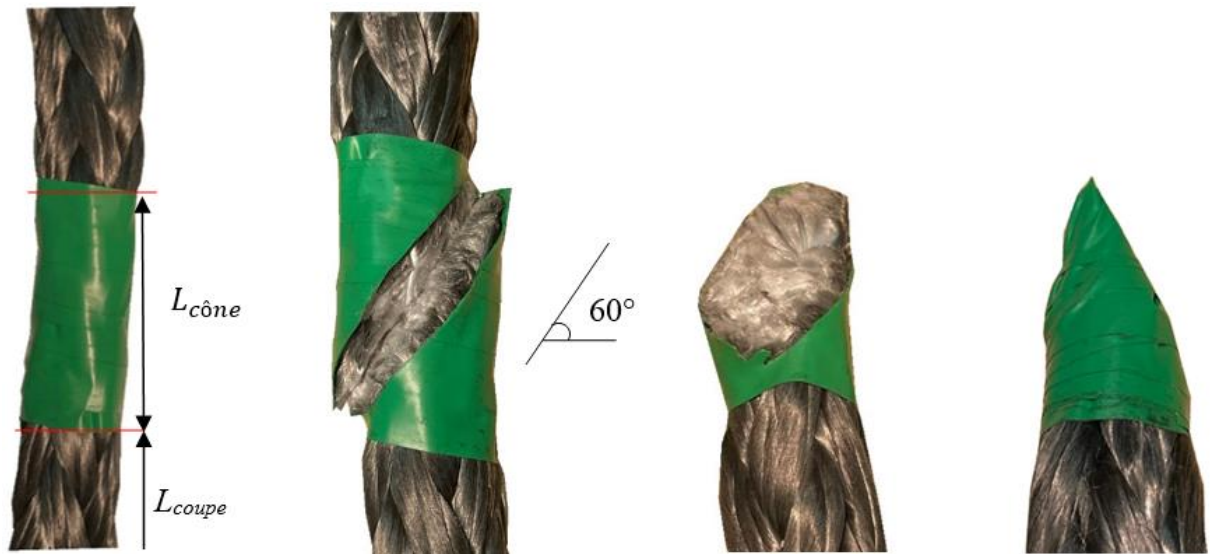


FIGURE C.5 - Découpe de la corde

A l'endroit de coupe, mettre du scotch à la base sur 5 centimètres. Après cela, couper en diagonale de manière à faire un cône à l'extrémité de la corde. Remettre du scotch sur le cône afin d'avoir un meilleur glissement de la corde dans l'âme à l'étape 7.

Etape 3 : Marquage de l'extrémité de la corde



FIGURE C.6 - Marquage d'une extrémité de corde

Aux deux extrémités de la corde, marquer : la longueur d'épissure correspondant à la longueur de l'extrémité de la corde enfilée dans l'épissure, le point de contact manille/corde, l'entrée de l'extrémité de la corde dans l'âme creuse.

Etape 4 : Premier passage de l'aiguille dans l'âme creuse de la corde

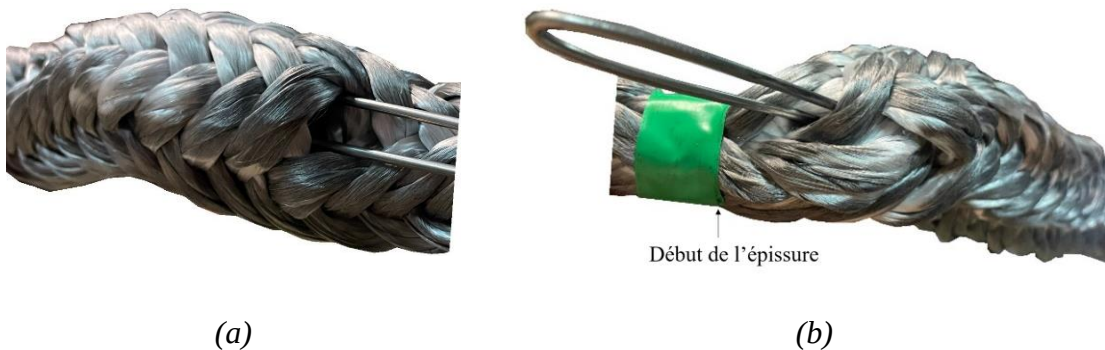


FIGURE C.7 - Passage de l'aiguille dans l'âme creuse : (a) Entrée de l'aiguille (b) Sortie de l'aiguille

Entrer l'aiguille à longs chas dans l'âme creuse de la corde à 50 centimètres du début de l'épissure. Faire glisser l'aiguille dans la fibre creuse jusqu'à la marque « Début de l'épissure ».

Attention à bien faire passer l'aiguille dans l'âme creuse sans accrocher des fibres ! Pour cela, il est recommandé de comprimer la corde lors du passage de l'aiguille afin d'augmenter la section de l'âme creuse. Cette opération est cruciale pour le bon déroulement des étapes suivantes.

Etape 5 : Attache de l'extrémité de la corde à l'aiguille



FIGURE C.8 - Attache de la corde à l'aiguille

Attacher l'extrémité de la corde dans l'aiguille à long chas. Il est conseillé de scotcher le cône de l'extrémité de la corde à l'aiguille afin de diminuer le risque d'accroche d'une fibre lors des prochaines étapes.

Etape 6 : Entrée de l'extrémité de la corde dans l'âme creuse



FIGURE C.9 - Entrée de l'extrémité de la corde dans l'âme creuse

Faire entrer délicatement l'extrémité dans l'âme creuse en prenant soin de ne pas accrocher de fibre.

Etape 7 : Passage de l'extrémité de la corde dans l'âme creuse

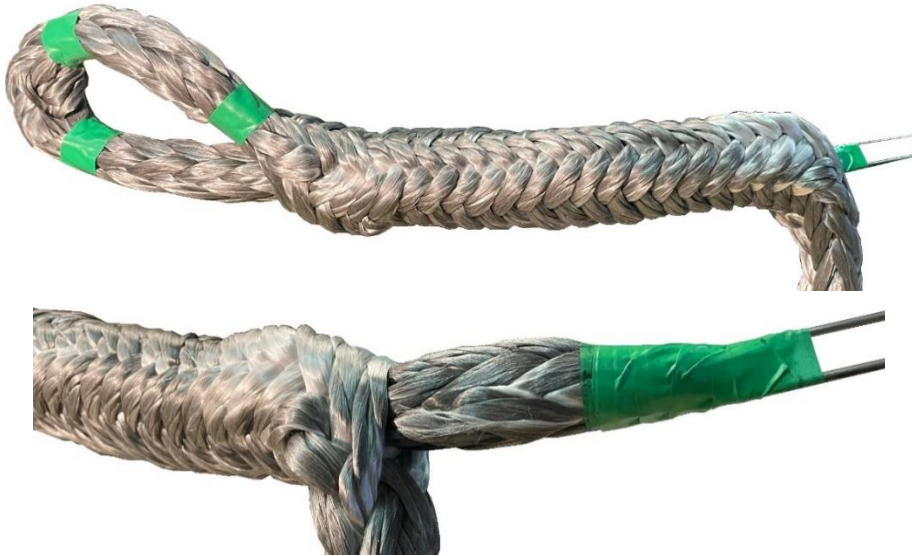


FIGURE C.10 - Passage de l'extrémité dans l'âme creuse

Tout en comprimant la corde afin d'avoir un diamètre d'âme plus grand, tirer délicatement sur l'aiguille afin de faire glisser l'extrémité dans l'âme. Attention, si une résistance au glissement de la corde se fait sentir, c'est que la corde est coincée dans une fibre. Il vaut donc mieux sortir la corde de l'âme et recommencer à l'étape n°4.

Une fois la marque correspondant à la longueur d'épissure coïncide avec la marque « début de l'épissure » et que l'extrémité de la corde sorte de l'âme creuse, libérer la corde de l'aiguille en retirant le scotch.

Etape 8 : Finalisation de l'épissure



FIGURE C.11 - Epissure réalisée

Faire entrer le cône dans l'âme de la corde en mettant la corde en tension. Attention à bien faire correspondre la marque de longueur d'épissure et la marque de « début de l'épissure ».

Etape 9 : Seconde extrémité

Répéter ces étapes pour la seconde extrémité.

Etape 10 : Contrôle de L_{corde} sans prétension

Une fois les deux épissures faites, mesurer la longueur entre les points de contact manille/corde en mettant la corde en tension à la main afin de vérifier la bonne réalisation de la corde (voir TABLEAU C.5). S'il y a une imprécision, ajuster la longueur en faisant glisser la corde dans ou hors de l'épissure.

Type de corde	$L_{corde,0}$ [mm]
Transversale	1897
Longitudinale	2610
Additionnelle	2933

TABLEAU C.5 - Longueurs des cordes sans prétension

Etape 11 : Prétension

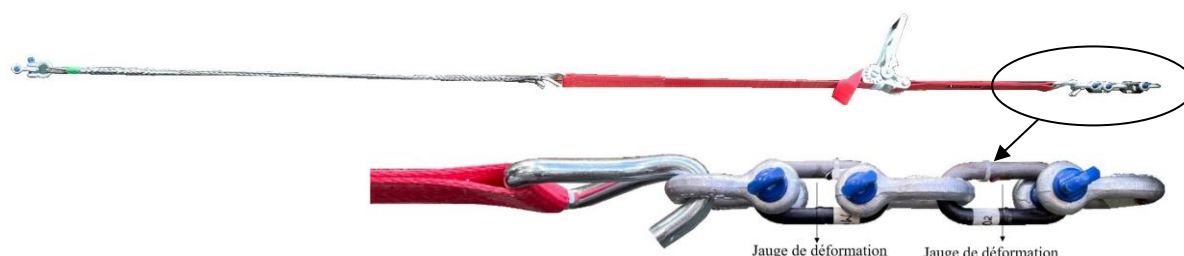


FIGURE C.12 - Système de mise en prétension des cordes

Effectuer un premier chargement à la corde afin de permettre aux fibres de se réarranger et d'obtenir la longueur finale souhaitée. Pour cela, mettre la corde en série avec une sangle à cliquet et des maillons capteurs de tension. Tendre la sangle à l'aide du bras de levier jusqu'à atteindre une tension de premier chargement $F_{pc} = 10kN$, correspondant à la moyenne des forces mesurées par les deux maillons mis en série.

Etape 12 : Contrôle de L_{corde} avec prétension

Une fois ce premier chargement fait, détendre la sangle et mesurer la corde en la mettant en tension à la main, cette longueur correspond à la longueur de la corde mise en place lors du déploiement. Si la longueur entre les points de contact manille/corde ne correspond pas exactement à la longueur attendue (voir TABLEAU C.1), ajuster la longueur en faisant glisser la corde dans ou hors de l'épissure et recommencer l'étape 11.

Etape 13 : Finalisation de la corde



FIGURE C.13 - Epissure scellée

Retirer les morceaux de scotch qui ont permis de réaliser les épissures et sceller l'épissure en enroulant l'entrée de la corde dans l'âme par du scotch dont la couleur dépend du type de corde (voir TABLEAU C.6). Il est important de sceller l'épissure pour qu'elle ne se défasse pas lorsque que la corde est manipulée.

Type de corde	Couleur
Transversale	Vert
Longitudinale	Bleu
Additionnelle	Noire

TABLEAU C.6 - Couleur de chaque type de corde

ANNEXE D

MANUEL D'UTILISATION DU SCANNER FARO M70

ANNEXE D : MANUEL D'UTILISATION SCANNER FARO M70

D.1 Guide d'utilisation du scanner *Faro^m 70*

Le scanner *Faro^m 70* est l'outil utilisé pour déterminer la géométrie exacte de la structure lors de ce projet. Ce chapitre résume les étapes à réaliser pour utiliser le scanner simplement mais efficacement. Un manuel complet et détaillé de l'outil est fourni par le constructeur *FARO* [26].

Il fonctionne en étant placé sur trépied près de la structure avec un paramétrage prédéfini. Une fois démarré, le scanner réalise le scan de son environnement sans intervention d'opérateur. Le résultat d'un scan n'est pas une prise de mesure continue mais une géométrie à un instant donné dans le temps. C'est pourquoi il est nécessaire de scanner la structure entre chaque expérience et de les comparer par la suite.

Pour caractériser la géométrie de la structure plusieurs scans de points de vue différents sont nécessaires. En effet, il est compliqué d'observer chaque partie de la structure, en particulier les nœuds, d'un seul point de vue. Plusieurs scans sont donc effectués autour de la structure. Ceux-ci seront fusionnés par la suite pour créer un environnement 3D appelé « une scène » depuis lequel la géométrie de la structure peut être tirée. Il est conseillé de réaliser un scan près de chaque nœud bas de la structure à ± 2 mètres du nœud pour obtenir une scène complète (voir Figure D.1).

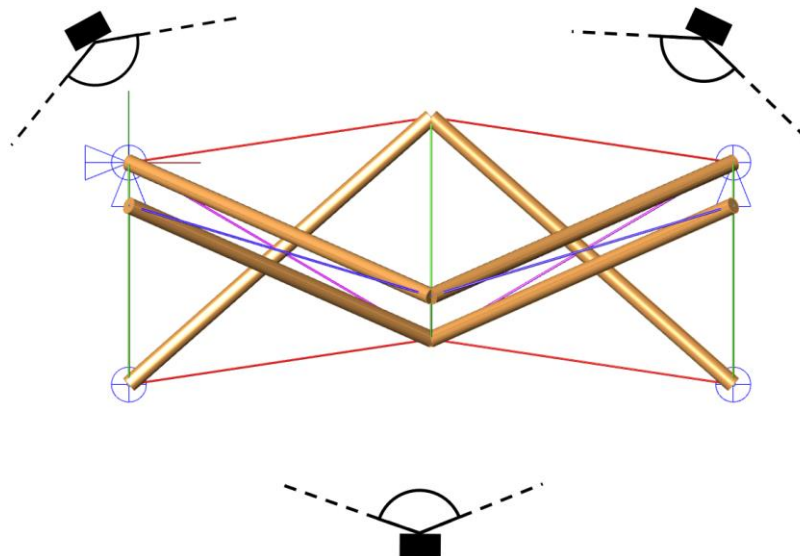


Figure D.1 – Vue en plan de la structure à deux modules et position des 3 scans

Chaque scan est défini par une liste de réglages avant de démarrer. Pour scanner la structure de ce projet, Les paramètres optimaux en termes de rapidité et de précision sont décrits ci-dessous et utilisés dans l'interface d'utilisation du scanner à la Figure D.2.

- Profil sélectionné : intérieur ...10m. C'est le profil recommandé pour un scan d'un objet présent à moins de 10 mètres du scanner et en intérieur. Si la structure à scanner se trouve en extérieur et donc dans un environnement éclairé par le soleil alors il faut sélectionner le profil extérieur.
- Résolution : 1/5. Représente la densité de points scannés. Au plus la résolution est haute, au plus un grand nombre de points différents sont scannés mais la durée du scanning augmente.

- Qualité : 4x. Représente le nombre de fois que le scanner repasse sur un point pour en déterminer sa position précisément. Au plus la qualité est haute, au plus la position du point est précise mais la durée du scanning augmente.
- Horizontal/Vertical : 0..360° / -60..90°. Définit la zone scannée autour de l'outil. Elle peut être restreindre pour ne viser que la zone où se trouve la structure dans le but de gagner du temps. Pour cela un pré-scan est nécessaire pour pouvoir définir les limites du champ de vision. Pour ce projet la zone n'a pas été restreinte car le gain de temps n'était pas indispensable.
- Sélectionner les capteurs : rien à modifier.
- Scanner en couleur : actif. Cela permet au scanner de prendre des photos et ainsi d'assimiler une couleur sur chaque point. Utile uniquement pour le logiciel de visualisation des scans.
- Paramètres de couleurs : rien à modifier.
- Paramètres avancés : rien à modifier.

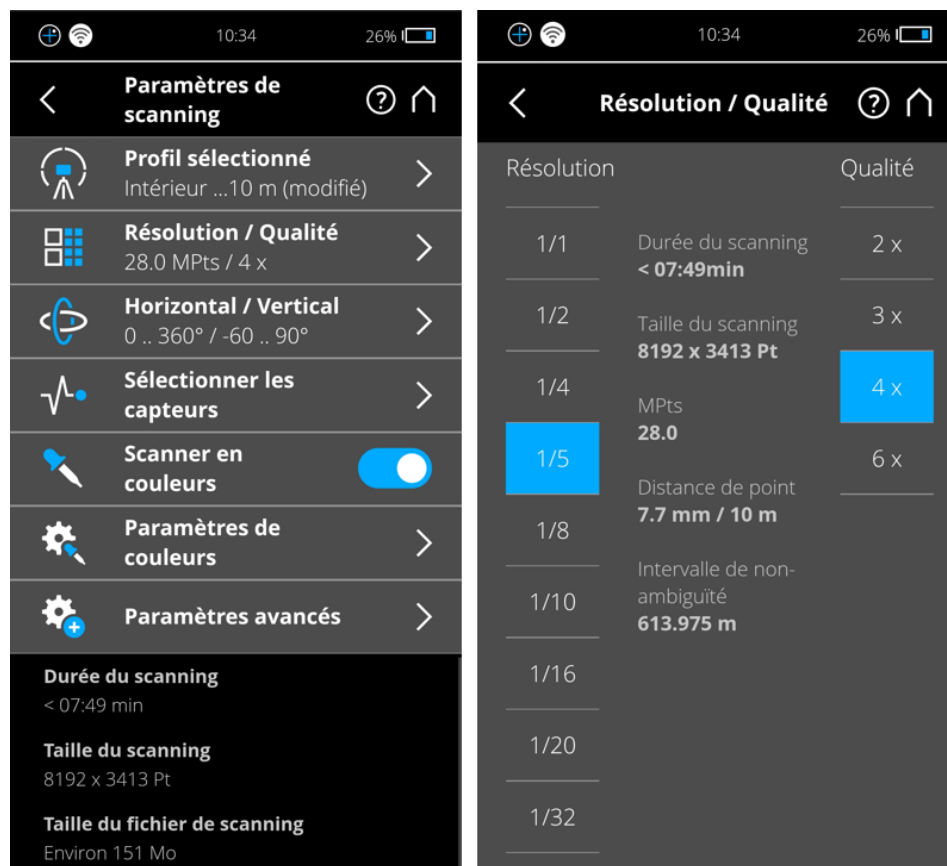


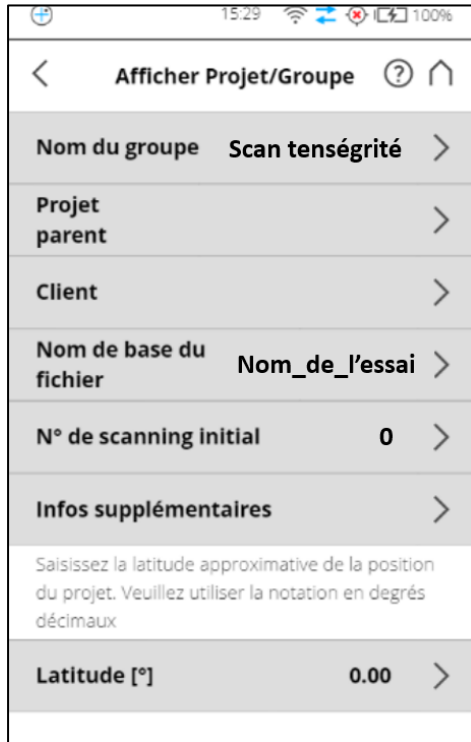
Figure D.2 – Paramètres du scanning depuis l'interface du scanner

Chaque scan ainsi réalisé crée un fichier .fls sur la carte SD préalablement introduite dans le scanner *Faro^m 70*. Le nom du fichier est à définir avant de scanner dans l'onglet Projet/Groupe (voir Figure D.3).

- Nom du groupe : nom du dossier créé sur la carte SD qui accueille tous les fichiers de scans.
- Nom de base du fichier : Nom de l'essai. Il est conseillé de changer ici le nom du fichier pour chaque essai sur la structure, c'est-à-dire à chaque fois qu'une scène différente est observée.

- N° de scanning initial : 0. Remettre cette valeur à 0 pour chaque nouvelle scène. Cette valeur est incrémentée à chaque nouveau scan réalisé pour la même scène.

Un exemple des fichiers résultant de deux essais scannés depuis trois points de vue est visible à la Figure D.3.

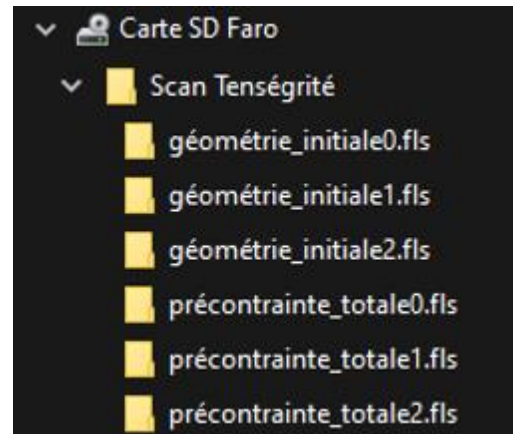


The screenshot shows a mobile application interface titled "Afficher Projet/Groupe". It contains several input fields for project configuration:

- Nom du groupe**: Scan tenségrité
- Projet parent**
- Client**
- Nom de base du fichier**: Nom_de_l'essai
- N° de scanning initial**: 0
- Infos supplémentaires**
- Latitude [°]**: 0.00

Below the "Infos supplémentaires" section, there is a text instruction: "Saisissez la latitude approximative de la position du projet. Veuillez utiliser la notation en degrés décimaux".

(a)



(b)

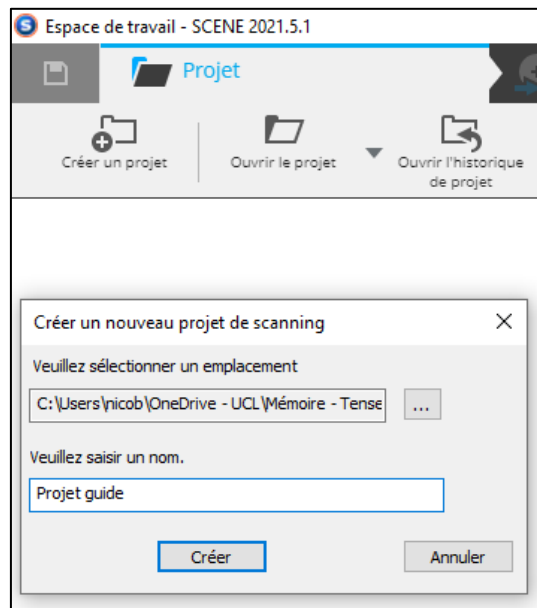
Figure D.3 – Définition du nom des fichiers créés : (a) dans l'interface du scanner (b) dans la carte SD

D.2 Guide d'utilisation du logiciel *SCENE*

L'accès au logiciel *SCENE* se fait via une licence à jeton hébergés sur un serveur de l'UCLouvain.

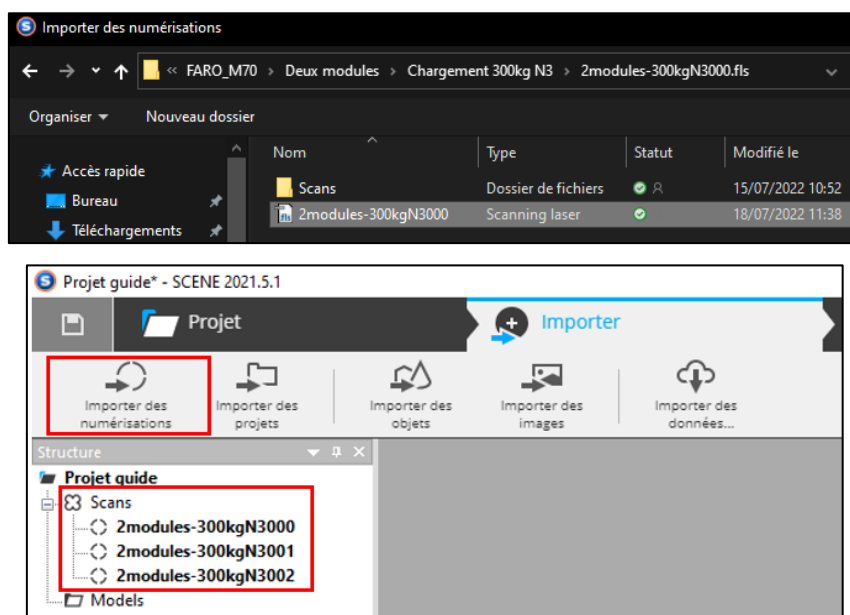
L'utilité de ce logiciel est de réunir en un environnement les scans réalisés depuis différents points de vue pour une même scène. Dans cette annexe, un guide d'utilisation du logiciel pour la structure réalisée lors de ce projet est présenté. Le manuel d'utilisation complet est fourni par le constructeur *Faro* [29].

Étape 1 : Créer un projet



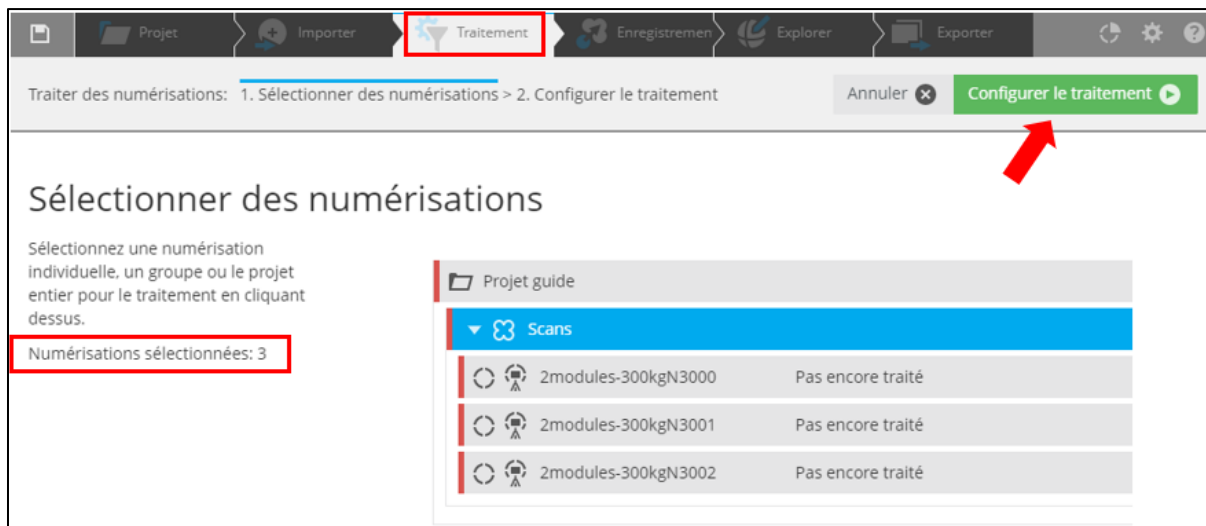
Étape 2 : Importer les numérisations

Dans chaque dossier .fls créé par les scans d'une même scène se trouve un fichier de type « Scanning laser ». Importer ces fichiers un par un en cliquant sur « Importer des numérisations » depuis l'onglet « Importer ».



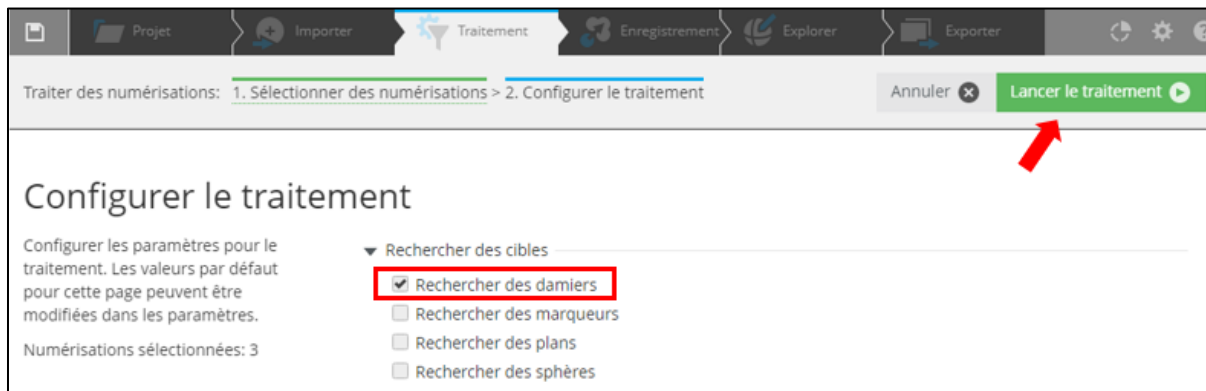
Étape 3 : Traiter les numérisations

Depuis l'onglet « Traitement » puis « Traiter des numérisations », sélectionner le dossier Scans contenant les fichiers précédemment importés. S'assurer que le nombre de numérisations sélectionnées correspond au nombre de scans réalisés pour la scène. Puis configurer le traitement.



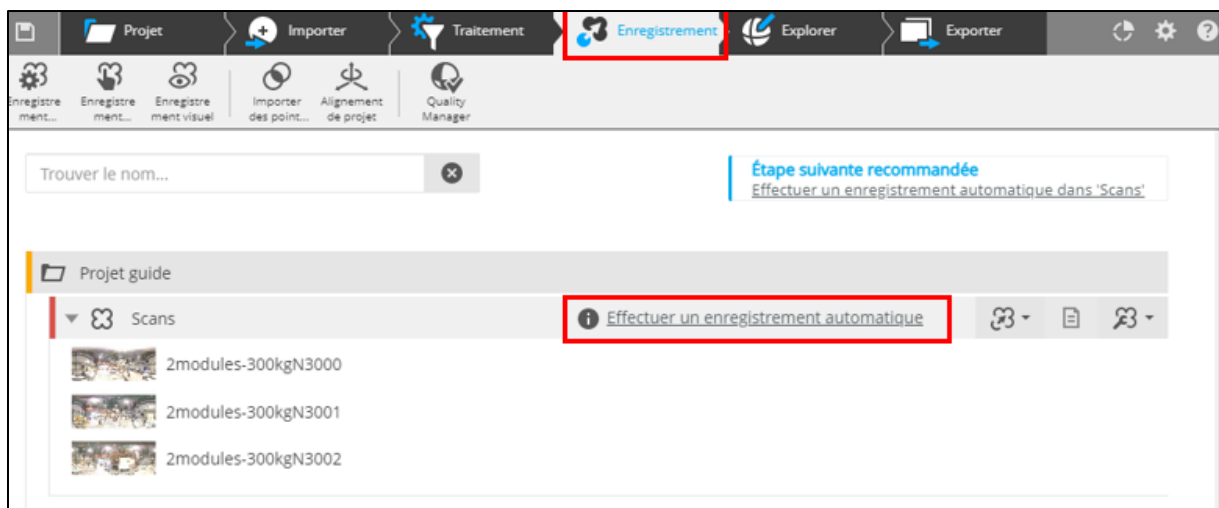
Étape 4 : Configurer le traitement

Garder les paramètres de défaut pour le traitement des numérisations en ajoutant la recherche des damiers. Cette option permet la détection des cibles disposées dans la scène pour établir des repères précis comme représenté au chapitre XXX. Puis lancer le traitement.

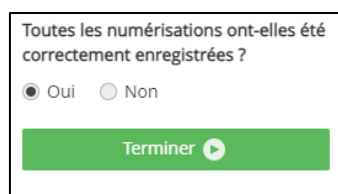


Étape 5 : Enregistrer

Depuis l'onglet « Enregistrement », effectuer un enregistrement automatique. Garder les paramètres de défaut puis cliquer sur « Enregistrer et vérifier ».

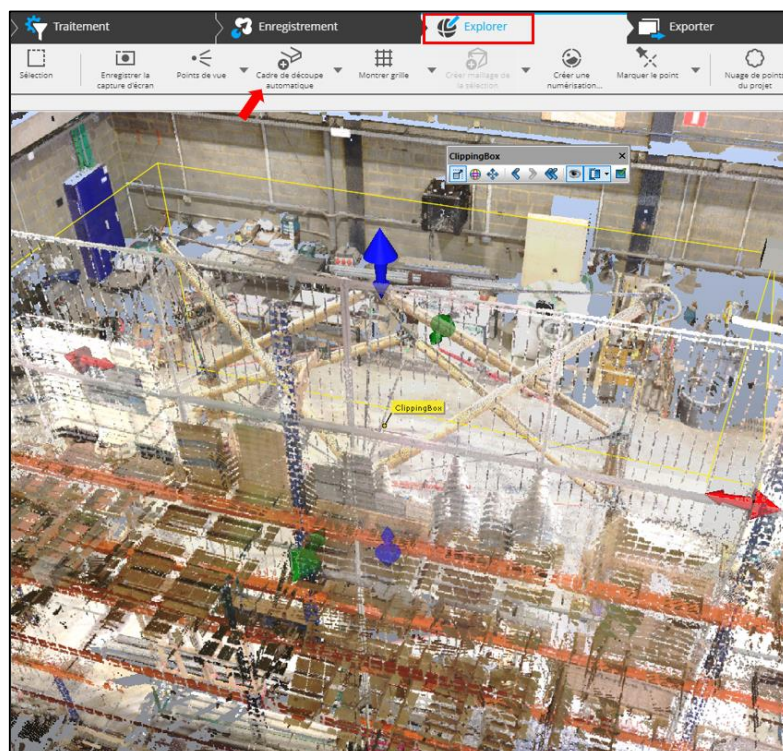


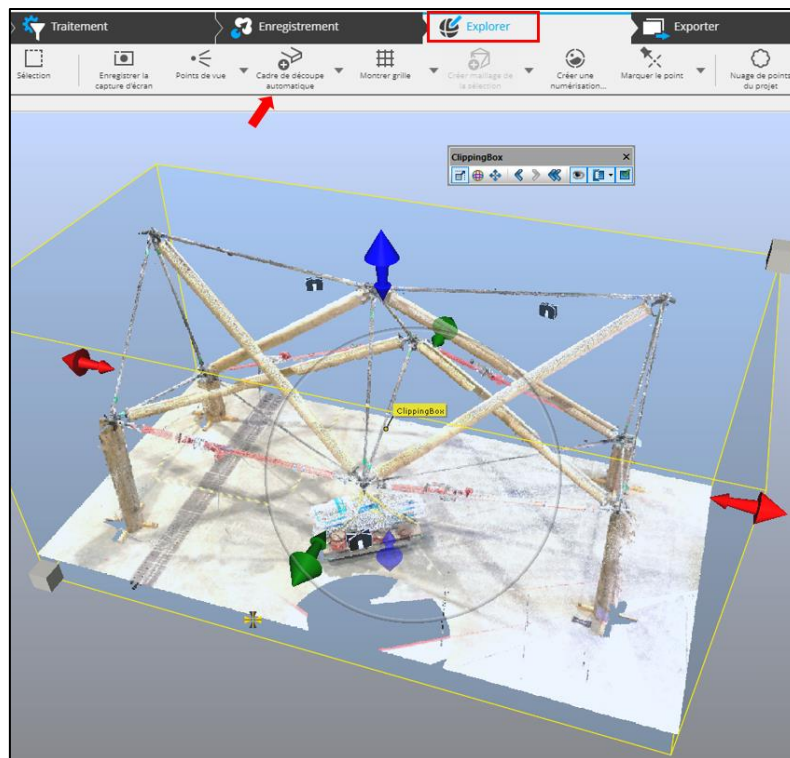
Si la scène est correctement recomposée cliquer « oui » puis « terminer »



Étape 6 : Isoler la structure de la scène

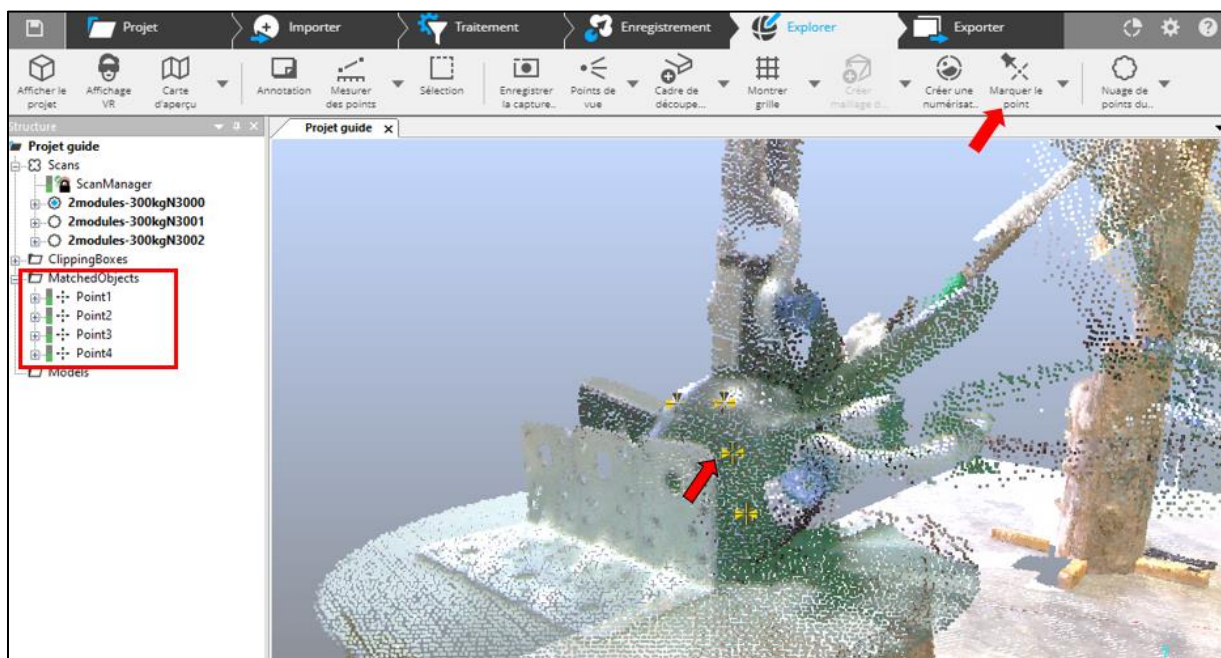
Depuis l'onglet « Explorer », ajouter un cadre de découpe automatique puis l'ajuster pour isoler la structure de l'environnement.



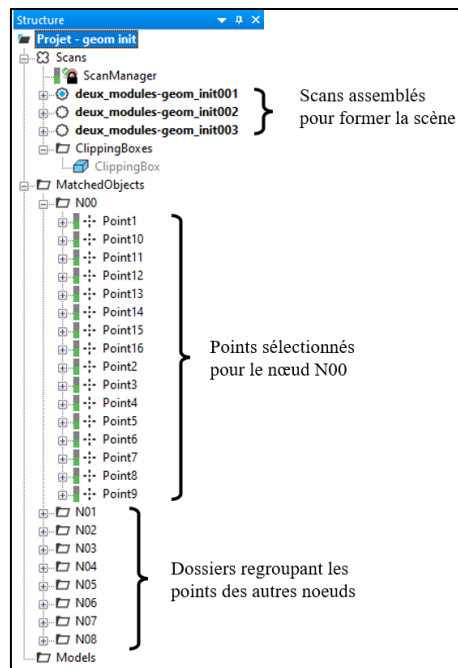


Étape 7 : Marquer les points

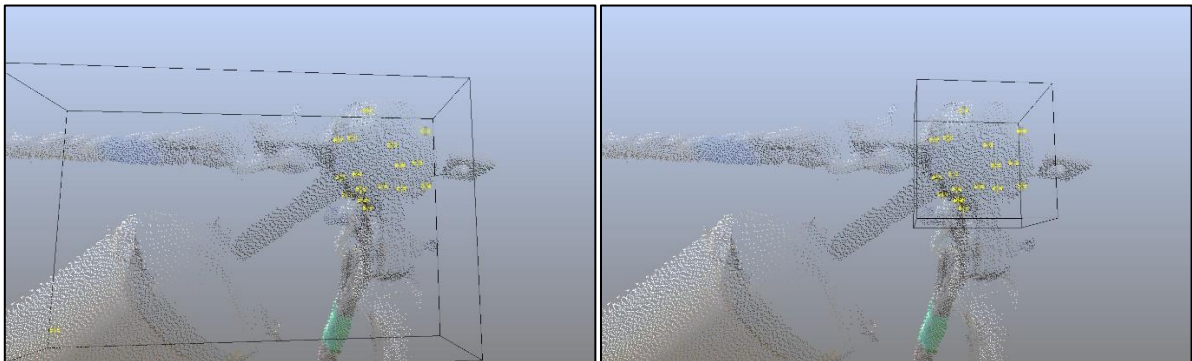
Dans l'onglet « Explorer », cliquer sur l'outil « Marquer le point » puis sur les points scannés à la surface de la boule. Un marqueur jaune apparaît sur chaque point marqué et apparaît dans la liste des « MatchedObjects » à gauche de l'écran.



Ces points marqués peuvent être rangés dans des dossiers créés pour chaque nœud.

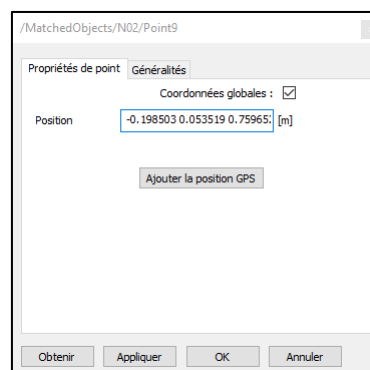


En cliquant sur le nom du dossier d'un nœud, un encadrement noir s'affiche autour des points marqués pour ce nœud. Cela permet de vérifier si les points de ce dossier appartiennent bien à la surface du nœud et qu'il n'y a pas d'erreur de point mal sélectionné. Ci-dessous une représentation d'un point mal scanné présent dans le dossier du nœud puis supprimé.



Étape 8 : Obtenir les coordonnées des points

Afficher les propriétés d'un point en le sélectionnant dans la liste à gauche de l'écran avec clic droit → propriétés. Les coordonnées du point s'affichent et peuvent être copiées-collées dans un fichier .txt pour être utilisé comme présenté dans la section 3.2.2 Logiciel SCENE.



ANNEXE E

STRUCTURE 5 MODULES

ANNEXE E : STRUCTURE 5 MODULES

E.1 Analyse de la structure

Précontrainte de la passerelle :

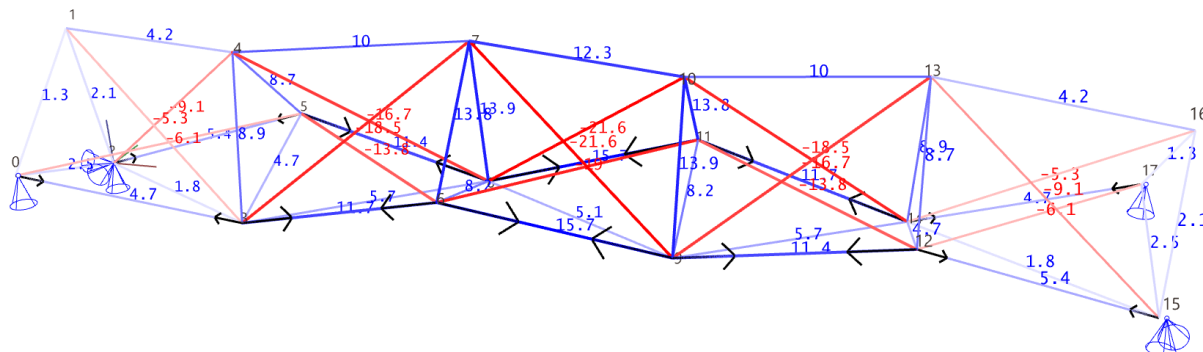


FIGURE E.0.1 – Passerelle 5 modules – Efforts précontrainte [illustration de l’auteur]

Eléments	Prétension [kN]	Raccourcissement [mm]
SAC2-5 et SAC12-15	5,4	R ₁ = 25
SAC0-3 et SAC14-17	4,7	
SAC5-8 et SAC9-12	11,4	R ₂ = 55
SAC3-6 et SAC11-14	11,7	
SAC8-11	15,7	R ₃ = 70
SAC6-9	15,7	

TABLEAU E.1 – Passerelle 5 modules – Prétension des sangles

Élément	Effort maximal [kN]
Buton	21,6
Corde transversale	13,9
Corde longitudinale	12,3
Sangle à cliquet	15,7
Corde additionnelle	5,7

TABLEAU E.2 – Passerelle 5 modules – Efforts maximaux durant précontrainte

Chargement maximal de la passerelle :

La structure étant moins précontrainte, elle ne peut supporter qu’une charge réduite par rapport à la passerelle dimensionnante avant qu’un câble longitudinal supérieur ne se détende. Le chargement maximal total est de 880kg, ce qui correspond à une combinaison à l’ELS de 0,75kN/m² sur le tablier.

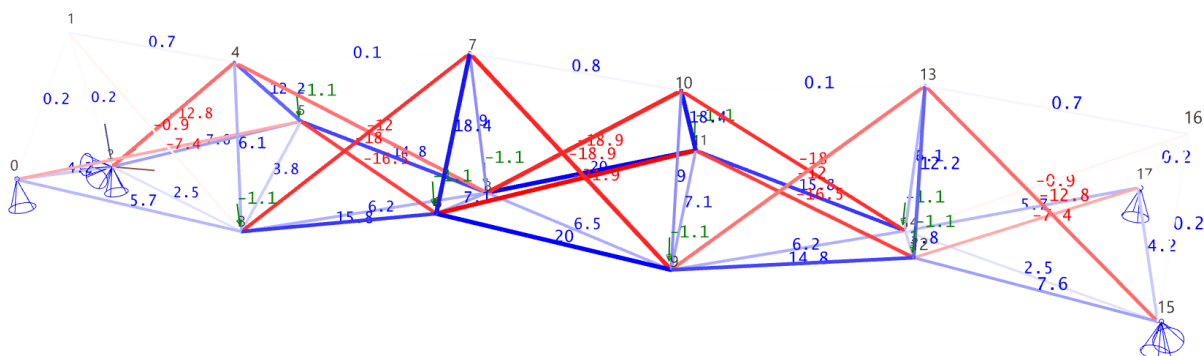


FIGURE E.0.2 – Passerelle 5 modules – Efforts chargement [illustration de l'auteur]

Élément	Effort maximal [kN]
Buton	21,9
Corde transversale	18,4
Corde longitudinale	0,8
Sangle à cliquet	20,0
Corde additionnelle	6,5

TABLEAU E.2 – Passerelle 5 modules – Efforts maximaux chargement

Appui	Réaction verticale R_v [kN]
2	2,8
0	1,6
15	2,8
17	1,6

TABLEAU E.2 – Passerelle 5 modules – Réactions d'appuis chargement

Résumé des efforts dans la passerelle réelle :

Élément	Effort maximal [kN]	
	Prétension	Chargement
Buton	21,6	21,9
Corde transversale	13,9	18,4
Corde longitudinale	12,3	0,8
Sangle à cliquet	15,7	20,0
Corde additionnelle	5,7	6,5

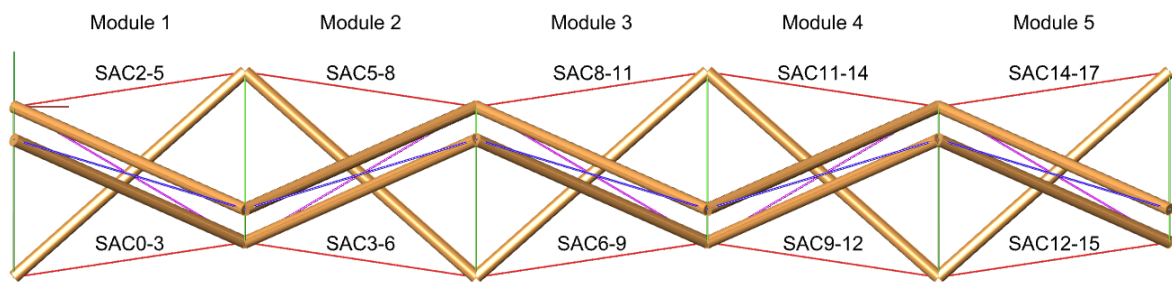
TABLEAU E.4 – Passerelle 5 modules – Résumé efforts maximaux

E.2 Mise en prétension

Pour précontraindre la structure il est nécessaire de suivre un protocole de prétension séquencé. Le Tableau E.6 reprend les efforts de tension à atteindre dans chaque élément contrôlé à chaque étape. Ces éléments sont les 10 sangles à cliquet ainsi que 3 butons pouvant être instrumentés. L'état de la structure à chaque étape est représenté sans chaque colonne. En haut de ces colonnes se trouve les instructions des étapes. Il est indiqué le raccourcissement à introduire dans l'élément désigné. L'étape initiale représente la structure dont la prétension initiale est intégrée avant de la mettre sur les appuis. Pour chaque étape, l'effort dans la sangle utilisée pour introduire de la prétension est représenté en bleu.

		Introduction de la préstension par les sangles à cliquet										
		25 mm	0 mm		30 mm		45 mm		30 mm		0 mm	
		Prétension	Module 1		Module 2		Module 3		Module 4		Module 5	
Efforts internes [kN]		initiale	SAC2-5	SAC0-3	SAC5-8	SAC3-6	SAC8-11	SAC6-9	SAC11-14	SAC9-12	SAC14-17	SAC12-15
Module 1	SAC2-5	6,1	6,1	6,1	5,6	5,0	5,6	6,1	5,7	5,4	5,7	5,4
	SAC0-3	5,5	5,5	5,5	5,0	4,4	5,0	5,4	5,1	4,7	5,1	4,7
	B2-4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,5	8,6	8,0	8,5	9,1	8,5	9,1
Module 2	SAC5-8	5,2	5,2	5,2	8,7	12,4	11,5	10,8	11,1	11,4	11,1	11,4
	SAC3-6	5,4	5,4	5,4	8,9	12,7	11,9	11,2	11,4	11,7	11,4	11,7
	B3-7	8,9	8,9	8,9	14,2	19,4	19,6	19,7	19,1	18,5	19,1	18,5
Module 3	SAC8-11	7,0	7,0	7,0	6,3	5,8	11,1	16,7	16,2	15,7	16,2	15,7
	SAC6-9	7,0	7,0	7,0	6,4	5,9	11,1	16,8	16,3	15,7	16,3	15,7
	B8-10	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	13,7	21,4	21,5	21,6	21,5	21,6
Module 4	SAC11-14	5,4	5,4	5,4	5,8	6,1	5,2	4,4	8,0	11,7	8,0	11,7
	SAC9-12	5,2	5,2	5,2	5,6	5,9	5,0	4,1	7,7	11,4	7,7	11,4
	B10-14											
Module 5	SAC14-17	5,5	5,5	5,5	5,2	4,9	5,4	5,9	5,3	4,7	5,3	4,7
	SAC12-15	6,1	6,1	6,1	5,8	5,5	6,0	6,6	5,9	5,4	5,9	5,4
	B13-15											

Tableau E.6 – Résumé efforts dans les sangles à chaque étape de mise en préstension de la structure 5 modules



ANNEXE F

CONCEPTION NUMÉRIQUE DES NŒUDS

ANNEXE F : CONCEPTION NUMÉRIQUE DES NŒUDS

Lors de la réalisation d'une structure de tensegrité, un des points essentiels de la conception est celui des nœuds. En effet, les éléments de la structure (butons et câbles) se connectent par ses nœuds avec des angles relatifs bien précis. La précision de ces angles est importante car l'objectif de ces nœuds est d'avoir les axes de chacun des éléments connectés à ce nœud concourants à l'intérieur de la matière, au point théorique du nœud. Dans notre cas, ce point est le centre d'une boule d'acier d'un rayon de 50mm. Dans le cas d'une passerelle de tensegrité composée de plusieurs modules, un nœud doit être conçu afin de connecter 6 câbles (2 transversaux, 2 longitudinaux et 2 additionnels) et 2 butons.

La mesure des angles relatifs est faite grâce au logiciel Geogebra, une calculatrice 3D permettant de déterminer les angles entre chaque nœud. La conception des nœuds est ensuite réalisée grâce au logiciel Solidworks.

L'objectif de cette conception est d'avoir un modèle numérique exact qui sera utilisé lors de l'usinage du nœud.

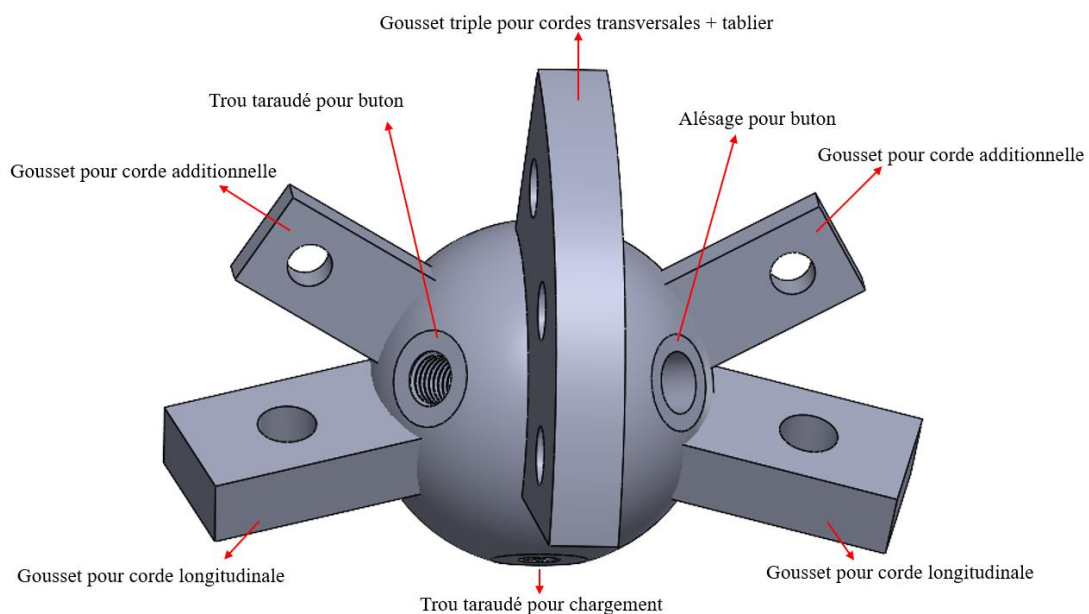
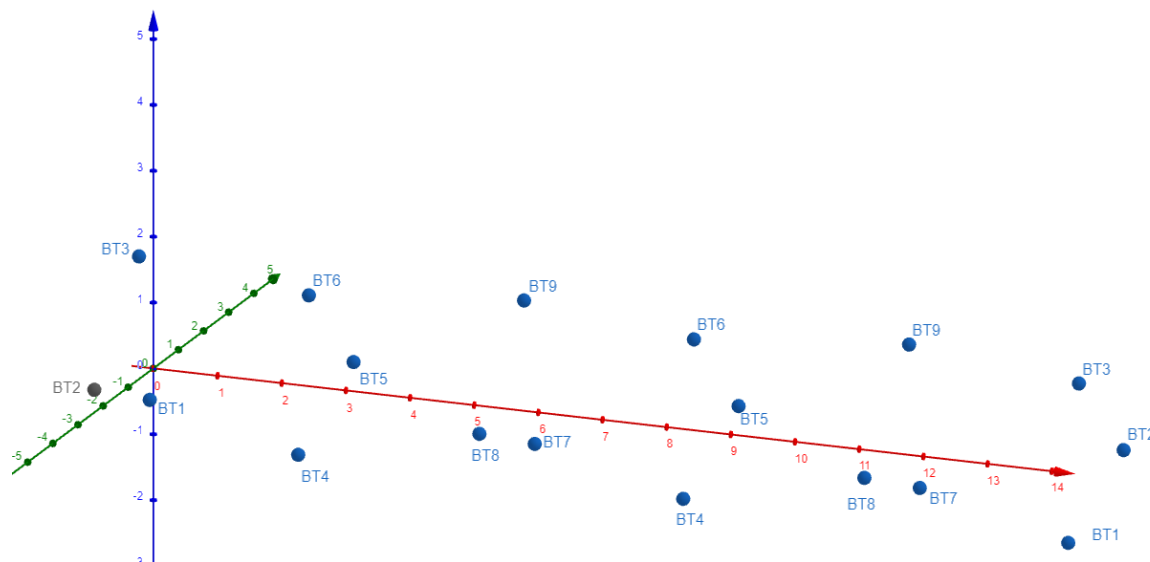


Figure F.1-Modèle numérique du nœud BT5

F.1 Structure en Geogebra

La première étape est d'importer la structure dans le logiciel *Geogebra*. Pour cela, nous utilisons le logiciel Grasshopper avec le plug-in MUSCLE développé par Jonas FERON afin d'avoir la géométrie de la structure et d'en tirer les coordonnées des points théoriques des nœuds. Une fois toutes ces coordonnées extraites, il faut les introduire dans *Geogebra* afin de créer ces points dans l'espace 3D (voir Figure F.2).



Afin de rendre le modèle plus clair et plus utilisable, les éléments de la structure (câbles et boutons) sont ajoutés dans Geogebra par des segments reliant les points (voir Figure F.3). On peut y voir les câbles **longitudinaux**, **transversaux**, **additionnels**, les **sangles à cliquet** ainsi que les **boutons**.

Figure F.3 - Structure dans Geogebra

F.2 Conception du nœud

Pour la conception des nœuds, on peut définir l'axe de chacun des éléments arrivant au centre de la sphère dans des angles relatifs des uns aux autres. Il faut donc choisir un point de départ à partir duquel tous les éléments seront construits. Etant donné la symétrie des boutons d'un nœud par rapport au plan transversal, nous choisirons les boutons comme points de départ.

F.2.1 Butons

La conception des nœuds commence par les boutons. Pour cela, nous choisissons que le plan induit par les axes des boutons définit le plan horizontal du nœud. Nous imaginerons la conception du nœud tel qu'il est orienté au nœud de type BT5, les boutons étant horizontaux.

Maintenant que le plan des boutons et que le point d'intersection des axes sont définis, il reste à connaître l'angle relatif entre les deux. Pour cela, nous utilisons le logiciel Geogebra, une calculatrice 3D, qui permet de mesurer l'angle entre les points BT2, BT5 et BT8 (voir Figure F.4). Cet angle est de 97° .

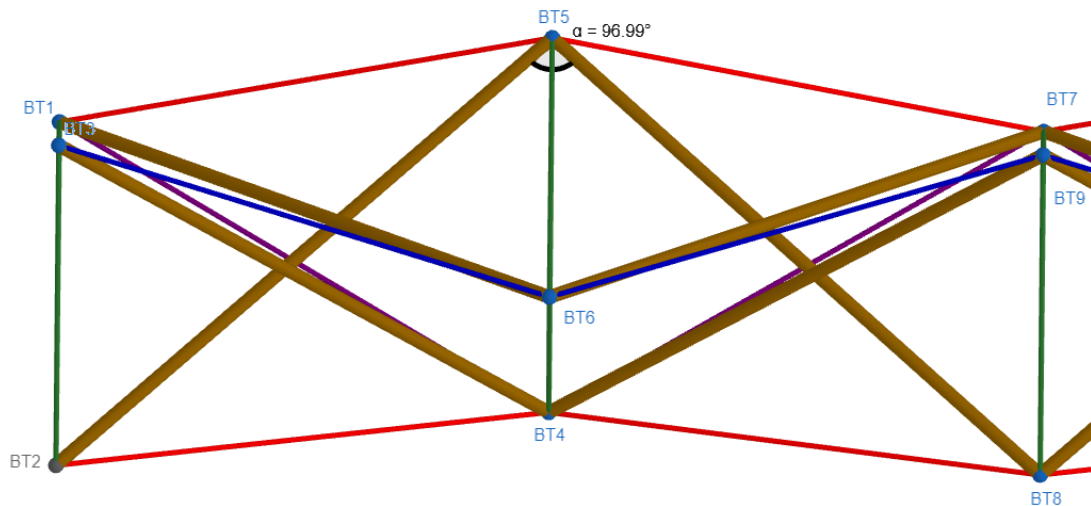


Figure F.4 - Angle relatif des boutons vue du haut

Une fois cet angle déterminé, les axes des boutons sont introduits dans le modèle Solidworks du nœud. Comme dit plus tôt, les axes sont placés sur le plan horizontal de la boule et avec le plan transversal (en bleu) comme plan de symétrie (voir Figure F.5).

Note : la droite placée avec un angle de 180° par rapport à un des axes des boutons est la continuité de celui-ci permettant l'alésage traversant toute la boule et l'aplanissement de la boule aux deux extrémités

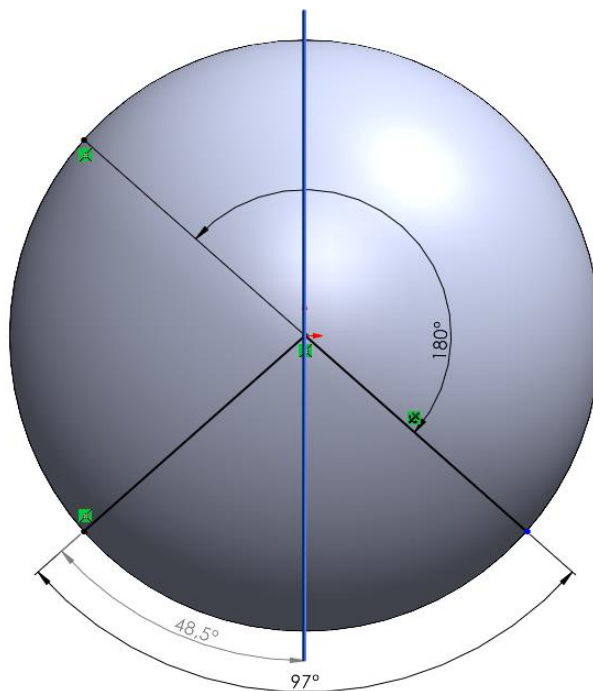


Figure F.5 - Axes des boutons dans Solidworks

Une fois cela fait, ces deux axes sont utilisés comme lignes centrales de l'alésage, du taraudage et des aplanissements de la surface de la boule, visibles à la Figure F.6.

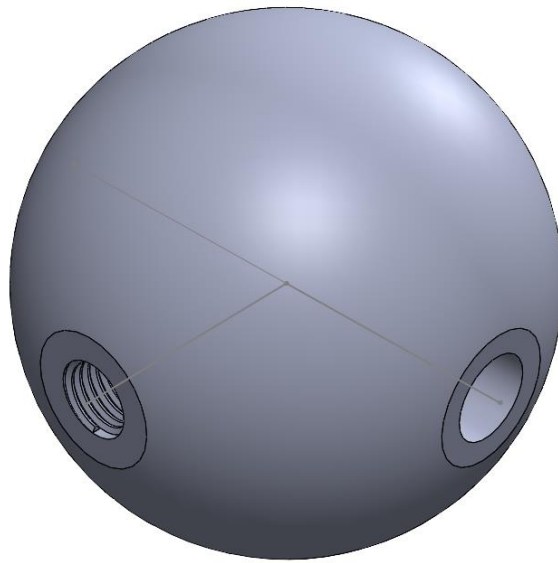


Figure F.6 - Alésage pour boutons dans Solidworks

F.2.2 Câbles transversaux

Les câbles transversaux doivent être définis après les boutons afin de les placer sur le plan transversal défini par ces derniers et avec un certain angle par rapport au plan horizontal aussi défini par les boutons.

Pour déterminer les angles des câbles transversaux, nous définissons un nouveau point fictif dans Geogebra tel qu'il se trouve sur le plan transversal et horizontal ainsi qu'aligné aux nœuds des deux extrémités de chaque bouton. Ce nœud marque la ligne horizontale dans le plan transversal. Sur la Figure F.7, ce nœud fictif est le nœud F. Concrètement, il a été défini en prenant les coordonnées du nœud BT2 et en remplaçant la coordonnée en x, qui est 0 pour le nœud BT2, par 3, coordonnée x du plan transversal. Ainsi, il est bien sur le plan transversal et aligné aux nœuds BT2 et BT8.

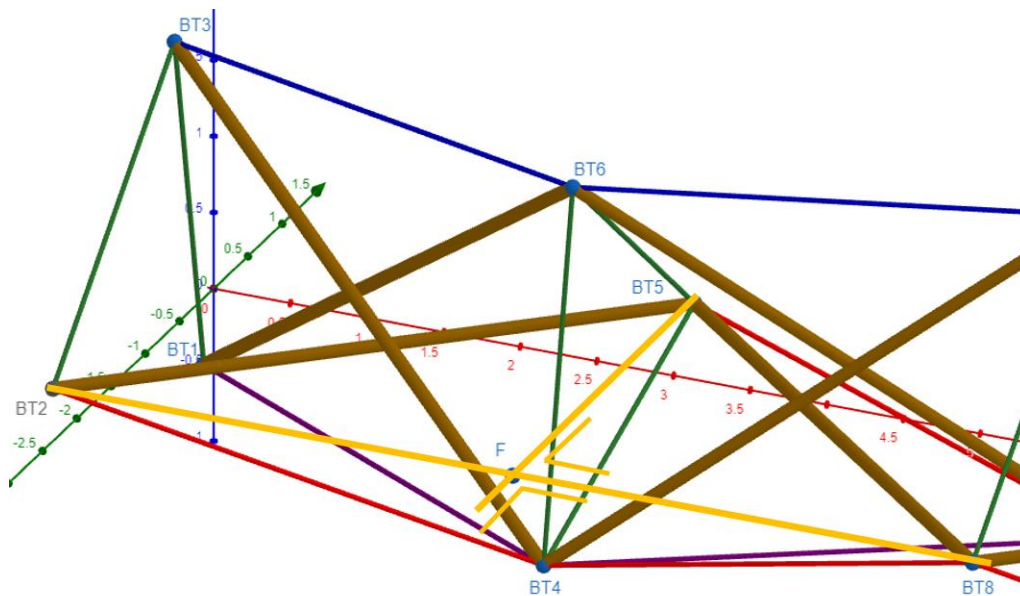


Figure F.7 - Détermination de l'horizontal du plan transversal dans Geogebra

Une fois ce point F défini, nous pouvons mesurer les angles des deux câbles horizontaux par rapport au plan horizontal (voir Figure F.8).

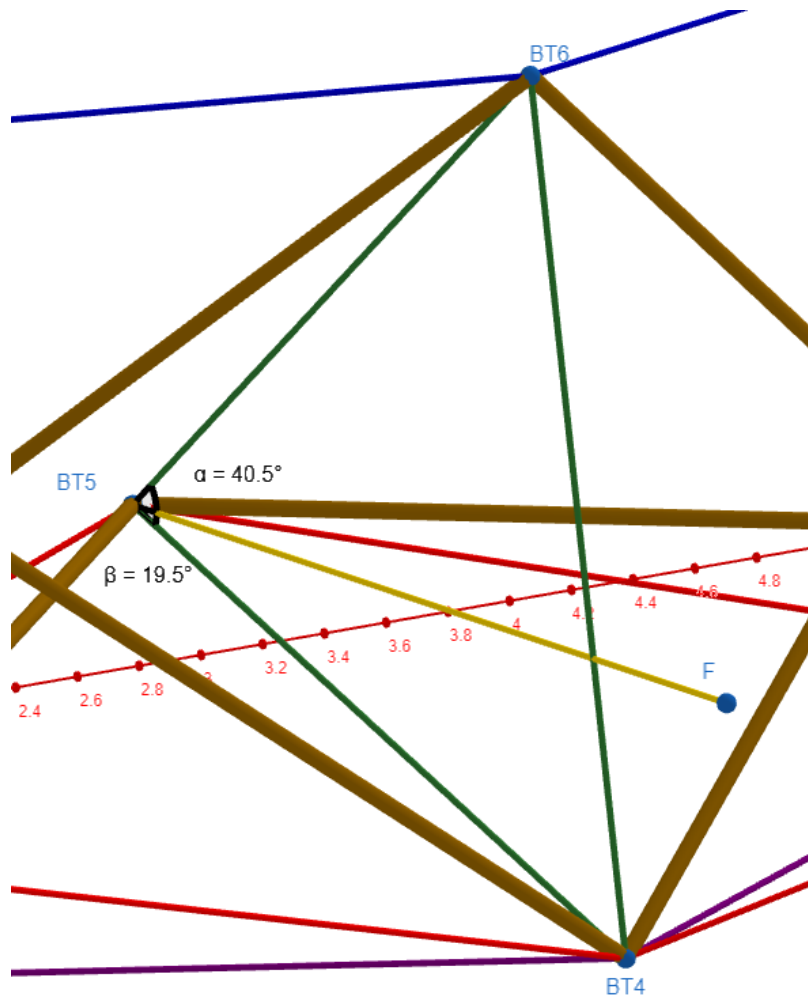


Figure F.8 - Détermination des angles des câbles transversaux par rapport au plan horizontal dans Geogebra

Les angles des câbles transversaux par rapport au plan horizontal sont donc de $40,5^\circ$ et de $19,5^\circ$. La somme de ces angles est bien de 60° car il s'agit d'un triangle équilatéral, cela nous conforte dans l'exactitude du modèle.

Maintenant que ces angles sont connus, il reste à les introduire dans Solidworks (voir Figure F.9).

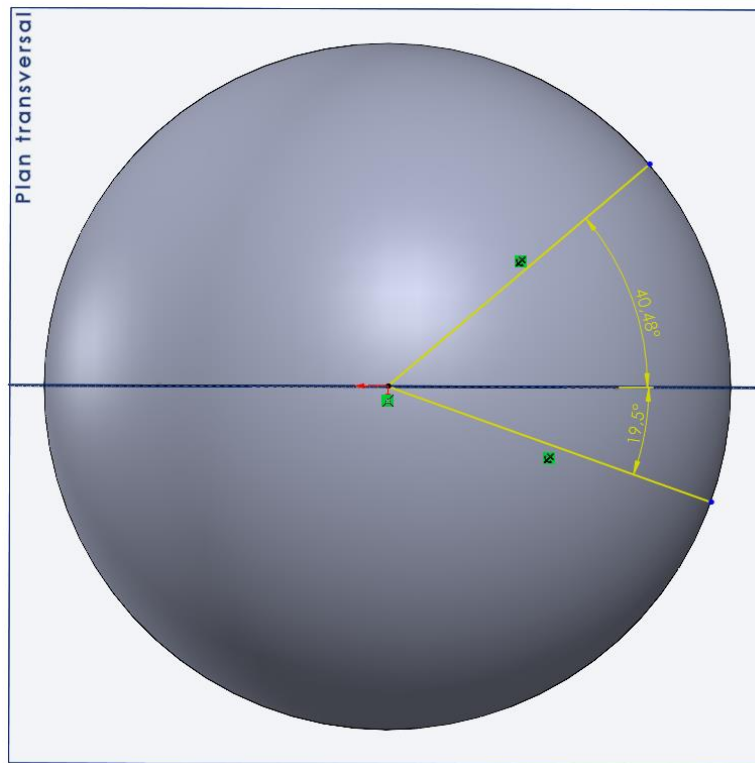


Figure F.9 - Angles des câbles transversaux par rapport au plan horizontal dans Solidworks

Les angles des câbles transversaux sont maintenant définis. Ces axes seront utiles pour souder le gousset triple des câbles transversaux afin que les éléments soient bien concourants.

F.2.3 Câbles longitudinaux

Pour les câbles longitudinaux (ainsi que pour les câbles additionnels comme on le verra plus tard), cela se complique légèrement. En effet, les axes de ces câbles ne sont plus dans le plan horizontal ni dans le plan transversal. Pour déterminer la direction de ces axes, nous devons procéder en deux étapes :

- Première étape : l'utilisation d'un point fictif

La première étape consiste en la création d'un nouveau point fictif K, visible sur la Figure F.10, sur le plan transversal et étant aligné aux deux nœuds se trouvant aux deux extrémités (BT1 et BT7) des deux câbles longitudinaux connectés au nœud. Cela permet d'avoir une projection des nœuds auxquels ces câbles sont connectés sur le plan transversal. Grâce à cela, nous pouvons déterminer l'angle entre ce nouveau point fictif (K) et le plan horizontal.

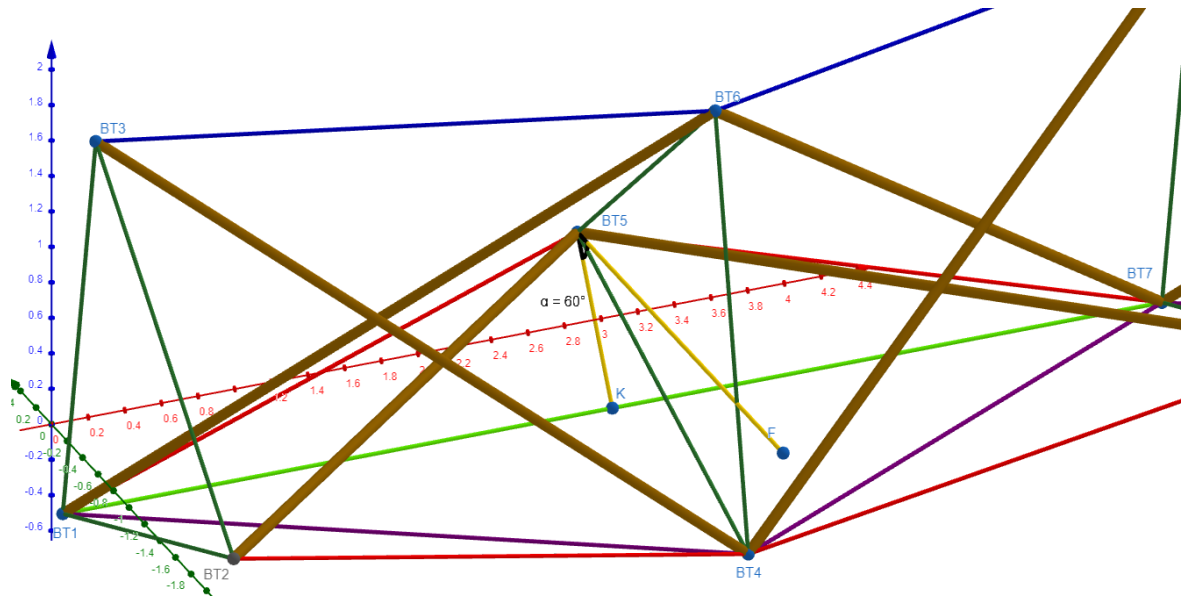


Figure F.10 - Détermination de l'angle entre la projection des nœuds sur le plan transversal et le plan horizontal pour les câbles longitudinaux

A partir de cet angle de 60° , nous pouvons créer une droite dans Solidworks (voir Figure F.11). Cette droite servira de base pour la deuxième étape car elle permet de définir un nouveau plan : le plan passant par les points BT1, K et BT5. Ce plan permettra de définir l'angle entre la droite passant par les points BT5 et K et la droite passant par les points BT5 et BT1.

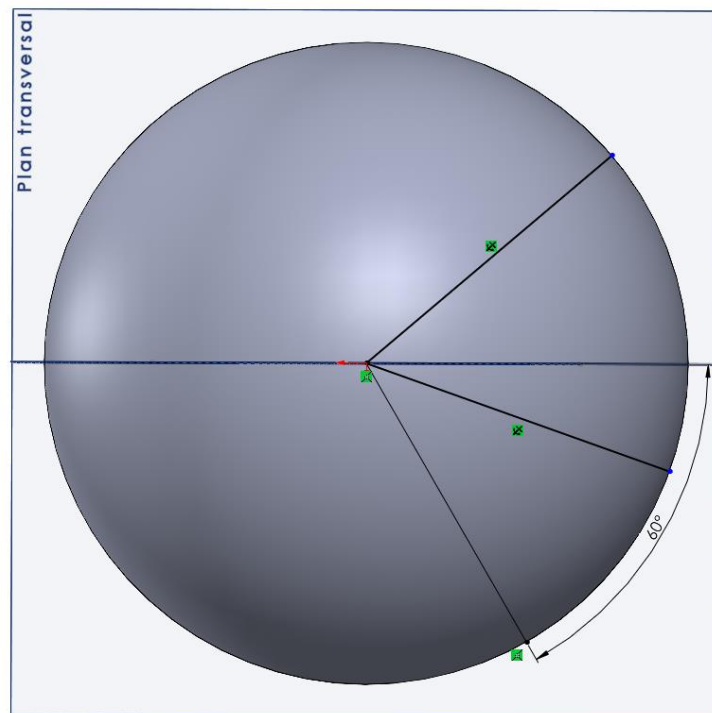


Figure F.11 - Angle entre le plan horizontal et la projection des nœuds sur le plan transversal pour les câbles longitudinaux

- Deuxième étape : Détermination de l'angle final du câble

Ce plan permet de définir l'angle entre la droite passant par les points BT5 et K et la droite passant par les points BT5 et BT1 et ainsi, avoir la direction exacte de l'axe de ce câble par rapport au nœud théorique BT5 (voir Figure F.12).

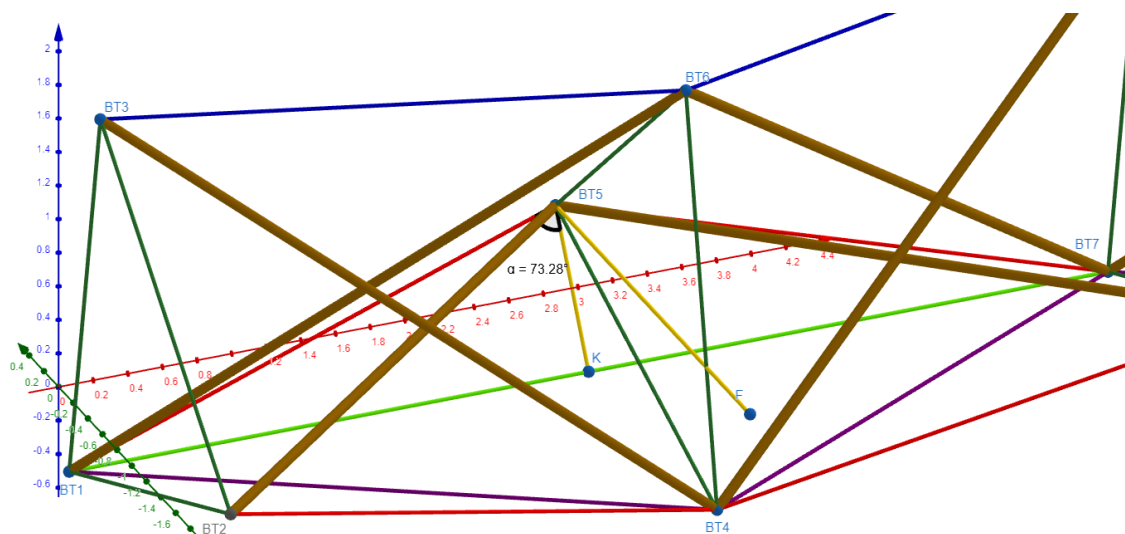


Figure F.12 - Détermination de l'angle entre la droite passant par BT5 et K et celle passant par BT5 et BT1 sur Geogebra

Dès lors, nous trouvons que cet angle est de $73,28^\circ$. En connaissant les deux angles que nous venons de trouver, il est désormais possible d'introduire dans Solidworks les directions des axes des câbles longitudinaux, visibles à la Figure F.13.

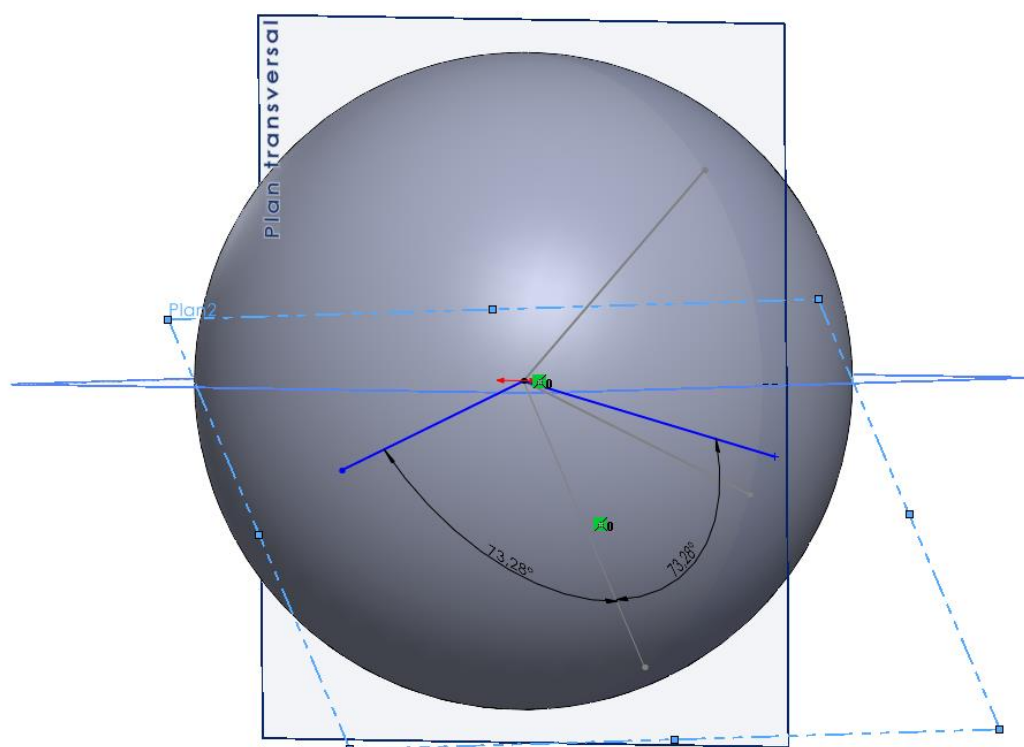


Figure F.13 - Direction des axes des câbles longitudinaux dans Solidworks

Ces axes seront utiles pour souder les goussets servant à l'attache des câbles longitudinaux afin que les éléments soient bien concourants.

F.2.4 Câbles additionnels

Pour les câbles additionnels, la technique est la même que pour les câbles longitudinaux. En reprenant le nœud BT5, les câbles additionnels devraient relier le nœud BT5 aux nœuds BT3 et BT9.

- Première étape : l'utilisation d'un point fictif

La première étape consiste en la création d'un nouveau point fictif A, visible sur la Figure F.14, sur le plan transversal et étant aligné aux deux nœuds se trouvant aux deux extrémités (BT3 et BT9) des deux câbles longitudinaux connectés au nœud. Cela permet d'avoir une projection des nœuds auxquels ces câbles sont connectés sur le plan transversal. Grâce à cela, nous pouvons déterminer l'angle entre ce nouveau point fictif (A) et le plan horizontal.

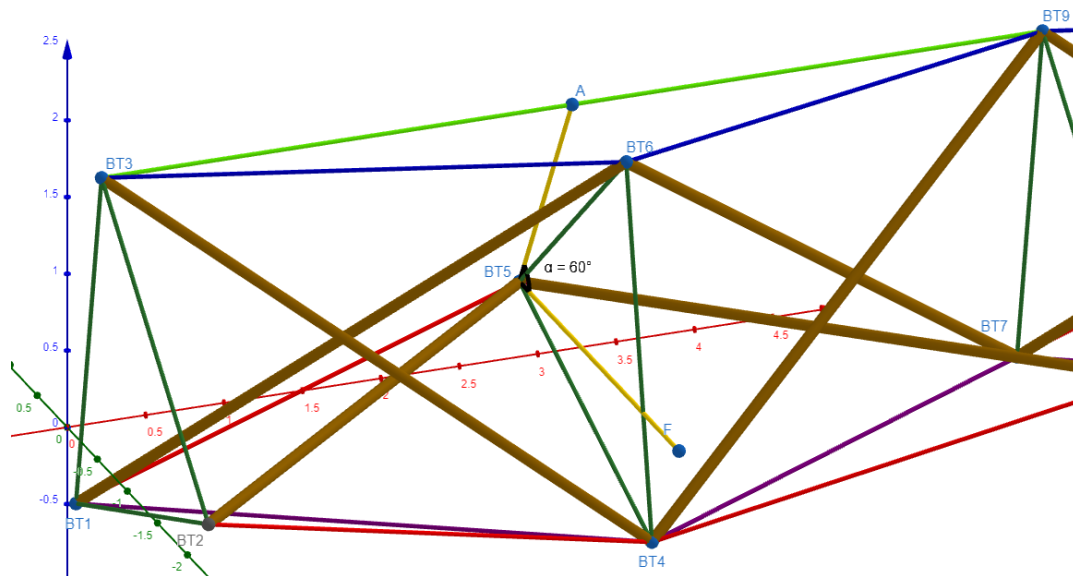


Figure F.14-Détermination de l'angle entre la projection des nœuds sur le plan transversal et le plan horizontal pour les câbles additionnels

A partir de cet angle de 60° , nous pouvons créer une droite dans Solidworks (voir Figure F.15). Cette droite servira de base pour la deuxième étape car elle permet de définir un nouveau plan : le plan passant par les points BT3, A et BT5. Ce plan permettra de définir l'angle entre la droite passant par les points BT5 et A et la droite passant par les points BT5 et BT3.

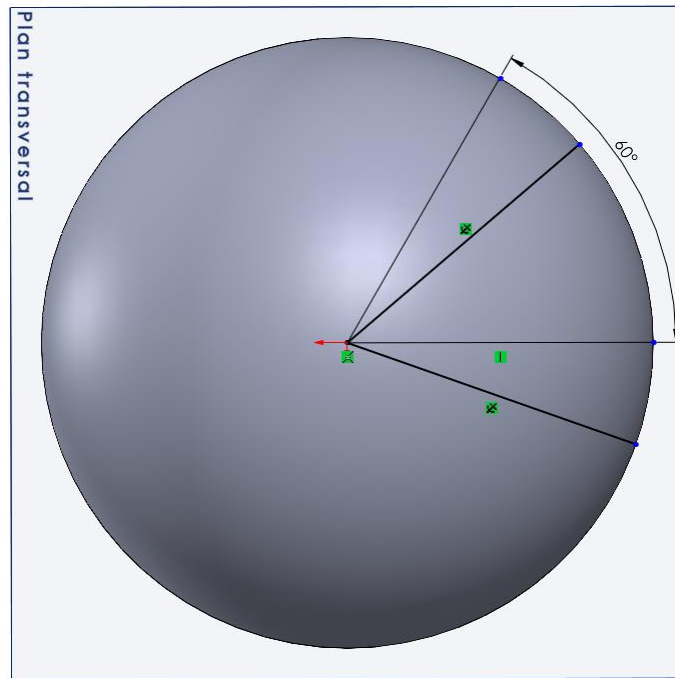


Figure F.15 - Angle entre le plan horizontal et la projection des nœuds sur le plan transversal pour les câbles additionnels

- Deuxième étape :

Ce plan permet de définir l'angle entre la droite passant par les points BT5 et K et la droite passant par les points BT5 et BT1 et ainsi, avoir la direction exacte de l'axe de ce câble par rapport au nœud théorique BT5 (voir Figure F.16).

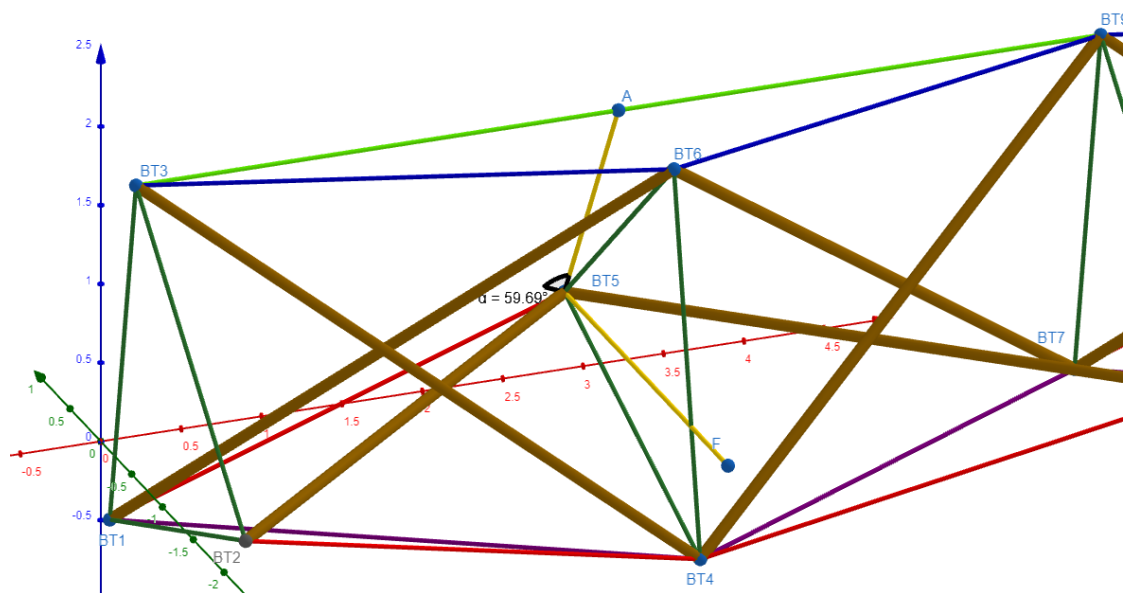


Figure F.16 - Détermination de l'angle entre la droite passant par BT5 et A et celle passant par BT5 et BT3 sur Geogebra

Dès lors, nous trouvons que cet angle est de $59,69^\circ$. En connaissant les deux angles que nous venons de trouver, il est désormais possible d'introduire dans Solidworks les directions des axes des câbles additionnels, visibles à la Figure F.17.

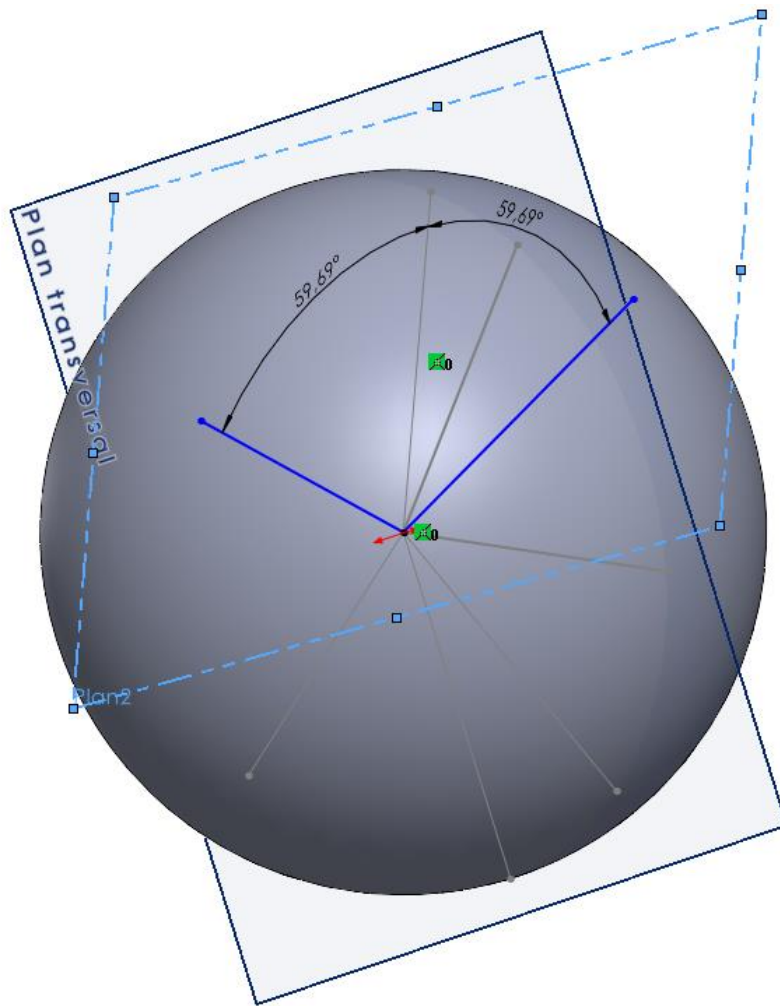


Figure F.17 - Direction des axes des câbles longitudinaux

Ces axes seront utiles pour souder les goussets servant à l'attache des câbles additionnels afin que les éléments soient bien concourants.

F.2.6 Goussets

Une fois tous ces axes définis, il est désormais possible d'ajouter les goussets. Ces goussets possèdent un axe numérique (en bleu sur les figures ci-dessous) permettant de l'aligner avec l'axe correspondant dans la boule lors de l'assemblage.

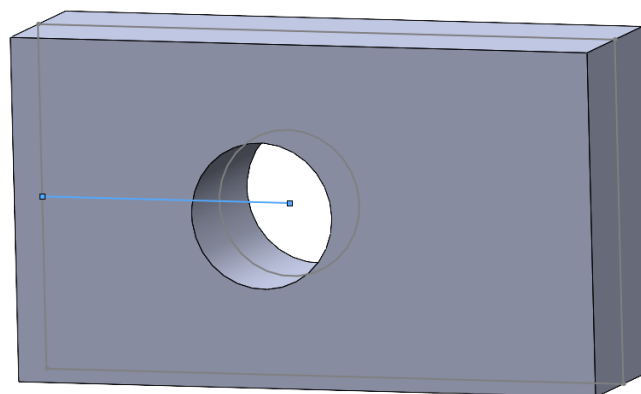


Figure F.18 - Gousset câble longitudinale

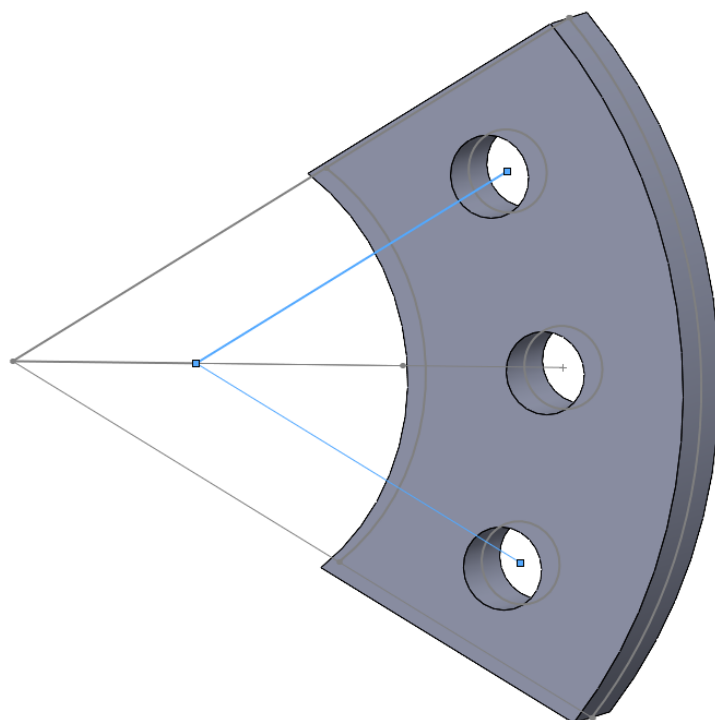


Figure F.19 -Gousset triple câble transversaux

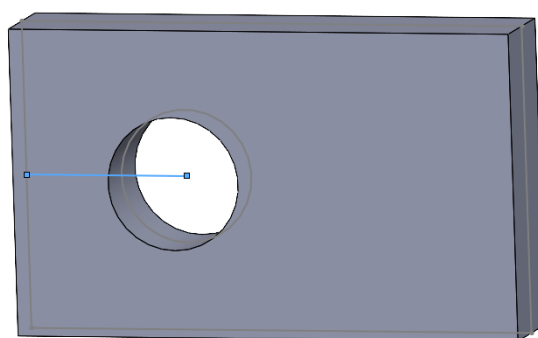


Figure F.20 -Gousset câble additionnel

F.2.7 Différents alésages

Afin de charger la structure, il est important de créer des taraudages afin que les axes de chargements soient aussi concourants. Dès lors, en utilisant les mêmes méthodes, il est possible de trouver l'angle entre l'axe vertical et le plan des boutons pour chaque type de nœud.

ANNEXE G

PHOTOS DE L'USINAGE DES NŒUDS

ANNEXE G : PHOTOS DE L'USINAGE DES NŒUDS

Un premier trou taraudé est réalisé afin de la visser dans la prochaine machine.



FIGURE G.1 – Réalisation du premier trou taraudé

La boule est ensuite passée dans la machine : centre d'usinage 5 axes Agie-mikron HEM 700u. Elle est utilisée pour réaliser les alésages, les trous taraudés et la préparation de la boule afin d'utiliser le principe de tenon et mortaise lors de la fixation des goussets.



(a)



(b)



(c)

Figure G.2 – Machine 5 axes (a) (b) réalisation (c) résultat

Ensuite, le principe de tenon et mortaise est utilisé pour placer parfaitement les goussets avant la soudure.

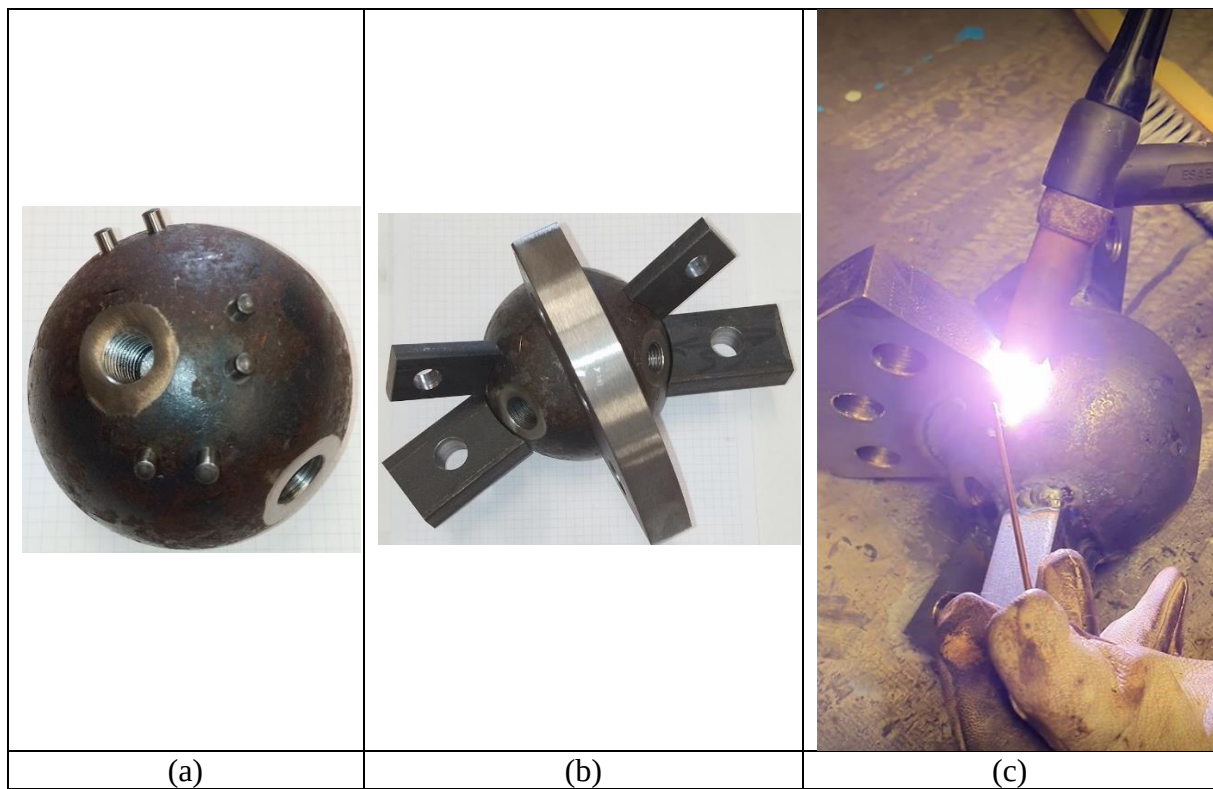


FIGURE G.3 – (a) Préparation pour utilisation du principe de tenon et mortaise (b) Placement des goussets (c) Soudure des goussets

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1 – Richard Buckminster Fuller [1].....	3
FIGURE 1.2 – Gleichgewichtskonstruktion [2].....	4
FIGURE 1.3 – X-Piece [3]	4
FIGURE 1.4 – Tore hélicoïdal [4].....	5
FIGURE 1.5 – Simplex étudié lors du mémoire 2020-2021 [6].....	6
FIGURE 1.6 – Cellules élémentaires : (a) quadruplex [7] (b) pentaplex [7] (c) hexaplex [7]	6
FIGURE 1.7 – Schéma angle relatif α [8].....	7
FIGURE 1.8 – Vue d'une face d'un simplex régulier [8].....	8
Figure 1.9 – Variation de l'angle de rotation d'un simplex régulier [8]	8
FIGURE 1.10 – Assemblages unidimensionnels : (a) bouton sur bouton en spirale (b) bouton sur bouton alterné (c) bouton sur câble en spirale (d) bouton sur câble alterné [illustration de l'auteur]	9
FIGURE 1.11 – Assemblage unidimensionnel avec courbure [illustration de l'auteur]	10
FIGURE 1.12 – Assemblages bidimensionnels : (a) Grille plane [9] (b) Grille à double courbure [9]	10
FIGURE 1.13 – Needle Tower II [10].....	11
FIGURE 1.14 – Sleeping Dragon [11]	11
FIGURE 1.15 – The 2003 Warnowturn [12]	12
FIGURE 1.16 – Parametric Tensegrity Structure for Local Art Fair by students of Ball State University in Muncie, Indiana [13]	12
FIGURE 1.17 – Tensegritree : (a) réalisation (b) schéma [14].....	13
FIGURE 1.18 – Kurpula bridge [15]	13
FIGURE 1.19 – Projet de passerelle de tensegrité Meadows bridge [16]	14
FIGURE 1.20 – White Rhino [17].....	14
FIGURE 1.21 – Pliage de Furuya [18]	15
FIGURE 1.22 – Hanaor [18].....	15
FIGURE 1.23 – Plateforme de tensegrité déployable [19].....	16
FIGURE 1.24 – Modèle réduit d'une passerelle de tensegrité déployable [14].....	16
FIGURE 2.1 – Dimensions de la passerelle [illustration de l'auteur]	17
FIGURE 2.2 – Structure en vue latérale, conditions d'appuis en bleu [illustration de l'auteur]	19
FIGURE 2.3 – ELS [illustration de l'auteur].....	19
FIGURE 2.4 – ELU [illustration de l'auteur]	20
FIGURE 2.5 – Exemple de déformation d'un simplex sans câble additionnel en orange, avec câble additionnel en vert [20].....	20
FIGURE 2.6 – Emplacement des sangles à cliquet sur la passerelle [illustration de l'auteur] ..	21

FIGURE 2.7 – Appellation des sangles à cliquet [illustration de l’auteur]	21
FIGURE 2.8 – Schéma outil d’optimisation Galapagos [illustration de l’auteur].....	22
FIGURE 2.9 – Passerelle dimensionnante – Efforts précontrainte [illustration de l’auteur]	22
FIGURE 2.10 – Passerelle dimensionnante – Efforts ELS [illustration de l’auteur]	23
FIGURE 2.11 – Passerelle dimensionnante – Efforts ELU [illustration de l’auteur].....	24
FIGURE 2.12 – Structure expérimentale 2 modules – Efforts précontrainte [illustration de l’auteur]	25
FIGURE 2.13 – Structure expérimentale 2 modules – Efforts chargement [illustration de l’auteur]	26
FIGURE 2.14 – Modèle numérique d’un nœud (BT7) [illustration de l’auteur]	28
FIGURE 2.15 - Disposition des nœuds sur la structure [illustration de l’auteur]	28
FIGURE 2.16 - Dimensions gousset longitudinal [illustration de l’auteur]	29
FIGURE 2.17 - Dimensions gousset triple [illustration de l’auteur].....	30
FIGURE 2.18 - Dimensions gousset additionnel [illustration de l’auteur]	30
FIGURE 2.19 - Connexion des éléments à un nœud (BT7) [illustration de l’auteur].....	31
FIGURE 2.20 - Dispositif chargement d'un nœud (BT7) [illustration de l’auteur].....	31
FIGURE 2.21 – Schéma de la composition d’un bouton [illustration de l’auteur]	32
FIGURE 2.22 - Défaut de rectitude initial [22]	34
FIGURE 2.23 – Implémentation Eurocode 5 dans Grasshopper [illustration de l’auteur].....	34
FIGURE 2.24 - Modèle numérique d'un embout [illustration de l’auteur]	35
FIGURE 2.25 – Géométrie embout [illustration de l’auteur]	35
FIGURE 2.26 - Chemin de contrainte dans bouton [illustration de l’auteur].....	36
FIGURE 2.27 – Modélisation en éléments finis de la plaque d’épaisseur 20mm sous 66 kN [illustration de l’auteur].....	36
FIGURE 2.28 - Encombrement du nœud [illustration de l’auteur]	37
FIGURE 2.29 – Excentricité de la force de compression [illustration de l’auteur].....	37
Figure 2.30 - Géométrie d'un manchon [illustration de l’auteur].....	38
FIGURE 2.31 - Géométrie plaque de déploiement [illustration de l’auteur]	38
FIGURE 2.32 - Assemblage de 2 modules [illustration de l’auteur].....	39
FIGURE 2.33 – Emplacement des éléments tendus dans la structure 5 modules [illustration de l’auteur]	39
FIGURE 2.34 - Jonction d'une corde au nœud [illustration de l’auteur].....	40
FIGURE 2.35 Allure de la relation force – déformation pour un câble synthétique. La courbe en traits forts illustre un essai de traction simple ; celle en pointillés illustre un essai à rupture précédé d’un cycle de charge – décharge. [23]	41
FIGURE 2.36 - Phénomène de relaxation [24].....	41
FIGURE 2.37-Corde Steelsafe SK78 [illustration de l’auteur]	42

FIGURE 2.38 - Configuration de l'essai du nœud de chaise [illustration de l'auteur]	43
FIGURE 2.39 – Épissure réalisée [illustration de l'auteur]	44
FIGURE 2.40 - Schéma de l'épissure [illustration de l'auteur]	44
FIGURE 2.41 - Configuration de l'essai de l'épissure [illustration de l'auteur]	45
FIGURE 2.42 - Configuration de l'essai de traction de machine compliance [illustration de l'auteur]	46
FIGURE 2.43 - Premier chargement sur nœuds de chaise : (a) force appliquée F en fonction du déplacement du vérin (b),(c),(d) Evolution des nœuds lors du chargement [illustration de l'auteur]	47
FIGURE 2.44 - Force exercée en fonction du déplacement du vérin : (a) premier cycle de chargement (b) deuxième et troisième cycle de chargement [illustration de l'auteur]	48
FIGURE 2.45 – Essai avec nœud de chaise (a) schéma (b) mesures de la corde à différents moments de l'essai [illustration de l'auteur]	49
FIGURE 2.46 - Graphe de contrainte/déformation de la corde avec nœuds de chaise des cycles 2 et 3 [illustration de l'auteur]	50
FIGURE 2.47- Essai avec épissures (a) schéma (b) mesures de la corde [illustration de l'auteur]	50
FIGURE 2.48 - Force exercée en fonction du déplacement du vérin (a) premier cycle de chargement (b) deuxième et troisième cycle de chargement [illustration de l'auteur]	51
FIGURE 2.49 - Graphe de contrainte/déformation de la corde avec épissures des cycles 2 et 3 [illustration de l'auteur]	52
FIGURE 2.50 – Dispositif de l'essai sur sangle à cliquet (a) Machine compliance (b) Essai sur SAC	54
FIGURE 2.51 – Essai sur la sangle (a) Photo (b) Mesures sous $F=0,5$ kN	55
FIGURE 2.52 - Graphe de contrainte/déformation de la sangle à cliquet [illustration de l'auteur]	56
FIGURE 2.53 - Bras de levier pour sangle à cliquet [illustration de l'auteur]	56
FIGURE 2.54 - Schéma moments stabilisant et déstabilisant [illustration de l'auteur]	58
FIGURE 2.55 – Schéma assemblage chevrons [illustration de l'auteur]	59
FIGURE 2.56 - Disposition des chevrons au pied de l'appui [illustration de l'auteur]	59
FIGURE 2.57 - Plaque percées : (a) pour simplement la visser (b) pour bloquer la direction y (c) pour bloquer les directions x et y [illustration de l'auteur]	59
FIGURE 2.58 – Nœuds posés sur appuis : (a) simplement posé (b) bloqué en y (c) bloqué en x et y [illustration de l'auteur]	60
FIGURE 2.59 – Module Orientation 1 [illustration de l'auteur]	61
FIGURE 2.60 – Module Orientation 2 [illustration de l'auteur]	62
FIGURE 2.61 - Schéma assemblage de 2 modules [illustration de l'auteur]	62
FIGURE 2.62 – Emplacement des extrémités de bouton pour déploiement [illustration de l'auteur]	62

FIGURE 2.63 – Connexion boutons dans nœud [illustration de l’auteur]	63
FIGURE 2.64 - Plaque de déploiement [illustration de l’auteur]	63
FIGURE 2.65 - Emplacement des différents types de nœud [illustration de l’auteur]	64
FIGURE 2.66 - Notation des éléments d'un module déployé [illustration de l’auteur]	64
FIGURE 2.67 - Système de poulies [illustration de l’auteur]	64
FIGURE 2.68 - Placement des boutons et accroche des câbles [illustration de l’auteur]	65
FIGURE 2.69 - Elévation d'un module [illustration de l’auteur]	65
FIGURE 2.70 - Enfillement des tiges filetées [illustration de l’auteur]	66
FIGURE 2.71 - 2 modules assemblés [illustration de l’auteur]	66
FIGURE 2.72 – Structure à 2 modules – prétension initiale [illustration de l’auteur]	67
FIGURE 2.73 – Structure à 2 modules – Mise en prétension (a) première sangle (b) deuxième sangle (c) troisième sangle (d) quatrième sangle [illustration de l’auteur]	67
FIGURE 2.74 – Structure à 2 modules - Coordonnées des nœuds après précontrainte [illustration de l’auteur]	68
FIGURE 2.75 – Structure à 2 modules – Angles relatifs entre les bases après précontrainte [illustration de l’auteur]	68
FIGURE 3.1 – (a) Capteur de force fabriqué pour le projet [illustration de l’auteur] (b) Scanner 3D Faro M70 [26]	69
FIGURE 3.2 – Emplacement des 10 capteurs [illustration de l’auteur]	70
FIGURE 3.3 – Maillon sur assemblage [illustration de l’auteur]	70
FIGURE 3.4 - Schéma général d'un maillon [illustration de l’auteur]	71
FIGURE 3.5 - Schéma et dimensions d'après le fournisseur Godet [27]	71
FIGURE 3.6 – (a) Marquage d'un maillon (b) Collage de jauge sur la face interne [illustration de l’auteur]	72
FIGURE 3.7 - Déplacement du maillon selon l'axe Z sous un chargement selon l’axe X de 35kN avec un module de Young de 210GPa [illustration de l’auteur]	73
FIGURE 3.8 - Modélisation du maillon en SCIA [illustration de l’auteur]	73
FIGURE 3.9 - Contraintes 1D dans la partie longue du maillon [illustration de l’auteur]	74
FIGURE 3.10 - Efforts internes dans le maillon : (a) effort normal (b) moment de flexion [illustration de l’auteur]	74
FIGURE 3.11 - Configuration de l'essai de tension du premier maillon équipé de deux jauges [illustration de l’auteur]	75
FIGURE 3.12 - Résultats de trois cycles de chargement sur un maillon équipé de deux jauges : (a) mesures de la jauge en face externe (b) mesures de la jauge en face interne [illustration de l’auteur]	76
FIGURE 3.13 – Résultats des facteurs de calibrations externe C_e , interne C_i , moyen C_m et du module de Young E du maillon M01 [illustration de l’auteur]	77
FIGURE 3.14 – Exemple de fenêtre générée par le logiciel [illustration de l’auteur]	80
FIGURE 3.15 – (a) Conditionneur (b) Boîtier d’acquisition [illustration de l’auteur]	81

FIGURE 3.16 – (a) Capteur de force Sensy [28] (b) Adaptateur capteur (c) Assemblage avec capteur transparent [illustration de l’auteur]	81
FIGURE 3.17 – Fonctionnement Scanner Faro M70 [26].....	82
FIGURE 3.18 – Placement du scanner [illustration de l’auteur]	83
FIGURE 3.19 – Exemple de cibles [illustration de l’auteur].....	83
FIGURE 3.20 - Cibles vues dans le logiciel SCENE [illustration de l’auteur]	84
FIGURE 3.21 – Scène 3D de la structure à 2 modules [illustration de l’auteur]	84
FIGURE 3.22 – Nuage de points des nœuds (a) au milieu de la structure (b) sur appuis [illustration de l’auteur].....	85
FIGURE 3.23 – Sélection de points sur la surface de nœuds [illustration de l’auteur].....	86
FIGURE 3.24 – Schéma méthode de la définition par 4 point représenté en 2D [illustration de l’auteur]	88
FIGURE 3.25 – Schéma méthode des moindres carrés représentée en 2D [illustration de l’auteur]	89
FIGURE 3.26 – influence d’un mauvais point pour l’approche : (a) définition par 4 points (b) moindres carrés [illustration de l’auteur]	90
FIGURE 3.27- Exemple de fichier : (a) créé pour le code (ici pour le nœud 4) (b) résultat renvoyé par le code [illustration de l’auteur]	90
FIGURE 3.28 – Définition du repère dans le modèle numérique [illustration de l’auteur]	91
FIGURE 3.29 – Situation avant transformation de repère. Rouge pointillé = numérique. Vert continu = expérimental [illustration de l’auteur].....	91
FIGURE 3.30 – Situation après translation. Rouge pointillé = numérique. Vert continu = expérimental [illustration de l’auteur].....	92
FIGURE 3.31 - Situation après rotations. Rouge pointillé = numérique. Vert continu = expérimental [illustration de l’auteur].....	92
FIGURE 3.32 – Implémentation de la transformation de système de coordonnées dans Grasshopper [illustration de l’auteur]	93
Figure 4.1 – Photo du dispositif expérimental [illustration de l’auteur]	94
FIGURE 4.2 – Dispositif de chargement d’un nœud [illustration de l’auteur]	95
FIGURE 4.3 – Schéma des angles relatifs et diamètres mesurés [illustration de l’auteur].....	96
FIGURE 4.4 – Schéma des angles de rotation des plans β et γ par rapport au plan perpendiculaire à la direction de la structure (axe x) [illustration de l’auteur].....	96
FIGURE 4.5 - Espace intérieur de la structure [illustration de l’auteur].....	97
FIGURE 4.6 - Système de numérotation des éléments pour 2 modules [illustration de l’auteur]	98
FIGURE 4.7 – Structure étape 1 : numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes	101
FIGURE 4.8 - Structure étape 6 : numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes	103

FIGURE 4.9 - Evolution des efforts dans les sangles : numérique en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	104
FIGURE 4.10 - Evolution des angles relatifs du module 1 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	104
FIGURE 4.11- Evolution des angles relatifs du module 2 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	104
FIGURE 4.12 - Evolution des diamètres des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	105
FIGURE 4.13- Evolution des angles β des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	105
FIGURE 4.14 – Evolution des angles γ des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	105
FIGURE 4.15 – Evolution de la coordonnée en z des nœuds de la base du milieu N3, N4 et N5 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	106
FIGURE 4.16 – Schéma simplifié de la géométrie initiale expérimentale (en rouge) en vue latérale [illustration de l’auteur]	107
FIGURE 4.17 – Inclinaison β du plan de la base 0-1-2 [illustration de l’auteur].....	107
FIGURE 4.18 – Structure précontrainte de 6kN (étape 1): numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes [illustration de l’auteur].....	111
FIGURE 4.19 - Evolution des efforts dans les sangles : numérique en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	112
FIGURE 4.20 - Evolution des angles relatifs du module 1 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	112
FIGURE 4.21 - Evolution des angles relatifs du module 2 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	112
FIGURE 4.22- Evolution des diamètres des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	113
FIGURE 4.23 - Evolution des angles β des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	113
FIGURE 4.24 - Evolution des angles γ des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	113
FIGURE 4.25 - Evolution de la coordonnée en z des nœuds de la base du milieu N3, N4 et N5 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	114
FIGURE 4.26 - Evolution des efforts dans les sangles : numérique en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	115
FIGURE 4.27 - Evolution des diamètres des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	115
FIGURE 4.28 - Evolution de la coordonnée en z des nœuds de la base du milieu N3, N4 et N5 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	115
FIGURE 4.29 - Evolution des angles relatifs du module 1 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	116

FIGURE 4.30 - Evolution des angles relatifs du module 2 : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	116
FIGURE 4.31 - Evolution des angles β des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	116
FIGURE 4.32 - Evolution des angles γ des bases : numériques en lignes pointillées ; expérimentales en lignes continues	116
FIGURE 4.33 – Structure précontrainte de 10kN : numérique en lignes pointillées rouges ; expérimental en lignes continues vertes [illustration de l’auteur].....	119
FIGURE 4.34 - Evolution des efforts dans les sangles.....	119

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Arch2o, «How do Tensegrity Structures Defy Gravity? Explained with 10 Examples,» [En ligne]. Available: <https://www.arch2o.com/how-do-tensegrity-structures-defy-gravity-explained-with-10-examples/>.
- [2] K. Johansons, 1920. [En ligne]. Available: <https://jenikirbyhistory.getarchive.net/amp/topics/karlis+johansons>. [Accès le 13 août 2022].
- [3] E. Heartney, Kenneth Snelson : Art and ideas, 2013.
- [4] D. G. Emmerich, «Tore hélicoïdal,» [En ligne]. Available: https://www.frac-centre.fr/_en/art-and-architecture-collection/emmerich-david-georges/structures-autotendantes-317.html?authID=66&ensembleID=622. [Accès le 13 août 2022].
- [5] B. Fuller, Synergetics : explorations in the geometry of thinking, MacMillan publishing co, 1975.
- [6] R. Antoine et N. Danzin, Structures de tensegrité : analyse critique des résultats numériques sur base d'essais expérimentaux sur un simplex instrumenté de grande taille, Louvain-La-Neuve, 2021.
- [7] I. Bouckaert, Optimisation d'une passerelle de tensegrité soumise à des charges aléatoires, Louvain-La-Neuve, 2019.
- [8] A. Flamant, Tensegrité : design, calcul et optimisation sur base d'une approche paramétrique, Louvain-La-Neuve, 2020.
- [9] J. Feron, Optimisation des structures de tensegrité sur base d'indicateurs morphologiques, Louvain-La-Neuve, 2016.
- [10] K. Snelson, «Needle Tower II,» 1969. [En ligne]. Available: <http://kennethsnelson.net/sculptures/outdoor-works/needle-tower-ii/>. [Accès le 13 août 2022].
- [11] K. Snelson, «Sleeping Dragon,» 2002. [En ligne]. Available: <http://kennethsnelson.net/sculptures/outdoor-works/sleeping-dragon>. [Accès le 2022 août 13].
- [12] Schlaich Bergermann Partner, 2003. [En ligne]. Available: <https://www.sbp.de/en/project/tower-at-the-fair-of-rostock/>. [Accès le 13 août 2022].
- [13] «Students of Ball State Construct Parametric Tensegrity Structure for Local Art Fair,» 4 Octobre 2014. [En ligne]. Available: <https://www.archdaily.com/553311/students-of-ball-state-construct-parametric-tensegrity-structure-for-local-art-fair>. [Accès le 13 août 2022].

- [14] A. Micheletti et P. Podio-Guidugli, *Seventy years of tensegrity*, 2022.
- [15] Arup, «The world's first tensegrity bridge,» [En ligne]. Available: <https://www.arup.com/projects/kurilpa-bridge>. [Accès le 13 août 2022].
- [16] Atelier Architecture 64, «Tensegrity bridge,» [En ligne]. Available: <http://www.aa64.net/tensegrity-bridge-atelier>. [Accès le 13 août 2022].
- [17] K. KAWAGUCHI, S. OHYA et S. VORMUS, *Long-Term Monitoring of White Rhino*, Tokyo.
- [18] A. D. NGUYEN, *Etude du comportement mécanique et du pliage d'un anneau de tenségrité à base pentagonale*, Montpellier, 2009.
- [19] F. J. J. Q. Julien Averseng, *Système de tenségrité déployable et modulaire pour le développement de l'accessibilité*, Montpellier, 2017.
- [20] J. Feron, «A deployable tensegrity footbridge : static design and optimization,» 2021.
- [21] Afribam, «Comparing Mechanical Properties of Bamboo: Guadua vs Moso,» [En ligne]. Available: http://www.afribam.com/index.php?option=com_content&view=category&id=13&Itemid=105&fbclid=IwAR3ue4MR9UnKHD9G-UrsZZM9xhzEV_Yv1sNkstUDsyTyqiWfqxv6_UiNVYE. [Accès le 2022 août 2022].
- [22] «Portail du Bois lamellé,» [En ligne]. Available: <https://handbook.glulam.org/volume-2-4-poutres-droites-et-poteaux/>. [Accès le 13 août 2022].
- [23] C. Lechat, *Comportement mécanique de fibres et d'assemblages de fibres en polyester pour câbles d'amarrage de plates-formes offshore*, Paris, 2008.
- [24] G. Pot, *Caractérisation mécanique du bois vert au cours de sa maturation et modélisation de la réaction gravitropique de jeunes peupliers*, Paris, 2012.
- [25] Lancelin, «Catalogue,» [En ligne]. Available: https://www.lancelin.com/catalogue/NAUTISME_FR/mobile/index.html?fbclid=IwAR0VdXxNOD7119oSWriIGUtmAVQn16yNegMIHyp48vCF8LZVUcNg8Of6hWU#p=20. [Accès le 13 août 2022].
- [26] Faro, «Manuel d'utilisation du Faro Focus Laser Scanner,» 2019. [En ligne]. Available: <https://downloads.faro.com/index.php/s/gandJooBGMZFtxm?dir=undefined&openfile=41209>. [Accès le 13 août 2022].
- [27] Godet, «Catalogue,» [En ligne]. Available: <https://www.godet.fr/downloads/Catalogue-distributeur-2022.pdf>. [Accès le 13 août 2022].

- [28] Sensy, «Capteur de force en compression,» [En ligne]. Available: https://files.sensy.com/datasheets/FP_5900_FR.pdf. [Accès le 13 août 2022].
- [29] Faro, «Logiciel SCENE,» [En ligne]. Available: https://fr-knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/User_Manual_for_SCENE. [Accès le 18 août 2022].

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl