

# UNE STRUCTURE ACTIVE DE TYPE TENSEGRITÉ

THÈSE N° 2701 (2003)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

SECTION DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Etienne FEST**

DEA MAISE, ENS Cachan-ENPC, France  
et de nationalité française

acceptée sur proposition du jury:

Prof. I. Smith, directeur de thèse  
Dr D. Gillet, rapporteur  
Prof. Th. Keller, rapporteur  
Prof. R. Motro, rapporteur  
Dr M. Pedretti, rapporteur  
Dr K. Shea, rapporteur

Lausanne, EPFL  
2003



**A mes parents Andrée et Robert**

**A Marie-Madeleine et Alphonse**



# Sommaire

<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Résumé</b>	<b>vii</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>viii</b>
<b>Riassunto</b>	<b>ix</b>
<b>Summary</b>	<b>x</b>
<b>Abréviations</b>	<b>xi</b>
<b>Table des matières</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Etat des connaissances</b>	<b>7</b>
<b>3 Techniques expérimentales</b>	<b>29</b>
<b>4 Essais statiques</b>	<b>73</b>
<b>5 Contrôle actif en mode quasi-statique</b>	<b>105</b>
<b>6 Perspectives et travaux futurs</b>	<b>131</b>
<b>7 Conclusions</b>	<b>141</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>145</b>
<b>Annexes</b>	<b>155</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>159</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>165</b>
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>167</b>

---

## Remerciements

Cette recherche a été réalisée au sein du laboratoire d'Informatique et de Mécanique Appliquées à la Construction (IMAC) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), sous la direction du Professeur I. Smith. Je tiens à lui exprimer mes plus sincères remerciements pour ses conseils, sa grande disponibilité, son soutien, ses tours en bateau sur lac et les ski-days. Ma reconnaissance s'adresse également à l'EPFL pour l'importance des moyens mis à disposition et notamment au Doyen, L. Vuillet de l'ENAC soutenant le projet dans une période critique.

Je tiens à remercier les autres membres du jury, à savoir le Professeur A.-G. Dumont de l'EPFL, président du jury, le Professeur T. Keller de l'EPFL (CCLab), le Professeur R. Motro du LMGC de Montpellier, le Maître d'Enseignement et Recherche D. Gillet de l'EPFL (IA), le Docteur M. Pedretti (Passera & Pedretti, Consulting Engineering, Lugano, Suisse) et le Docteur K. Shea (University of Cambridge, UK).

Mes remerciements vont au Docteur M. Pedretti dont les travaux ont été une source d'inspiration du projet, et au Docteur K. Shea pour son appui informatique, ses conseils et son suivi pendant une grande partie de la thèse. Je remercie B. Domer (doctorant à l'IMAC) et le Docteur B. Raphael (IMAC-EPFL) pour leur soutien informatique et leurs entretiens fructueux. Je remercie le Prof. R Motro pour ses conseils sur les structures de tensegrité.

Je témoigne toute ma gratitude au Docteur S. Rossier pour son intérêt au projet et la mise à disposition de ses travaux sur la modélisation des systèmes non-linéaires.

Au niveau financier, ce travail a été rendu possible en grande partie grâce au Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique. L'acquisition des matériaux de construction et des équipements électroniques et électromécaniques a été facilitée par les sociétés Maag Technic (Crissier) pour les barres en Fiberline® d'une part et les sociétés Hi-Tech Engineering (Zurich), Lust-tec (Zurich) et HBM (Darmstadt, Allemagne) d'autre part.

Je témoigne toute ma gratitude aux techniciens du laboratoire, R. Delez, P. Gallay et C. Gilliard et M. Pascual., qui ont contribué au succès des travaux expérimentaux de part leur motivation, leur ingéniosité, leur écoute et leur bonne humeur.

Je remercie le Docteur S. Vurpillot, le Docteur V. Dubois, le Docteur P. Lestuzzi, F. Laferrière, L. Eltschinger et J. de Castro pour avoir contribué à la clarté de ce rapport et des articles s'y rattachant. Je remercie aussi A. Herzog pour ses photos de qualité et J-L. Guignard pour ses conseils dans l'élaboration des figures.

Je remercie le Professeur P. Jacquot (MET) et le Docteur M. Facchini de l'EPFL pour leurs conseils sur les systèmes de mesure optique et S. Demierre et P. Seppey (National Instruments) pour leurs conseils dans l'instrumentation.

Mes remerciements vont à Y. Perelli, F. Baumann et D. Marguccio pour leur participation aux travaux expérimentaux

Au cours de ce travail, j'ai souvent eu l'occasion d'échanger des idées et des informations avec beaucoup de collègues de l'EPFL et de l'extérieur. Je les remercie tous pour leur disponibilité et l'intérêt qu'ils ont manifestés, en particulier le Professeur R. Longchamp, le Docteur P. Müllhaupt, le Docteur P. Kronenberg, le Docteur P. Volgers et Y. Robert-Nicoud.

Je tiens à remercier mes collègues de laboratoire de la bonne ambiance qu'ils ont su instaurer dans le laboratoire durant ces années de travail. Je pense particulièrement au Dr Kronenberg, mon « colocataire de bureau », pour m'avoir convaincu d'effectuer des changements techniques dans la conception des assemblages et de sa bonne humeur quotidienne.

La réussite d'un tel travail n'aurait été possible sans activités extraprofessionnelles : je remercie vivement dans ce cadre le Docteur G. Krueger, E. Bonvin et le Docteur P. Laurencet d'avoir contribué à ma bonne intégration en Suisse et de m'avoir fait découvrir ses particularités si précieuses. Je remercie encore G. Krueger pour son agréable colocation.

Je remercie aussi Paul et Paulette Kippelen pour leur générosité et leur soutien.

Finalement, je remercie de tout cœur mon amie Julia de Castro de m'avoir facilité la vie pendant la rédaction de ma thèse, soutenu et encouragé pendant ce travail de longue haleine.

---

## Résumé

La structure de tensegrité est un système spatial réticulé dont la rigidité et la stabilité proviennent de la combinaison de compression dans les barres et de traction dans les câbles. Cette structure légère, facilement démontable, offre aux constructeurs des opportunités de modularité, réutilisation, et de réalisations architecturales inédites. Ce type de structures n'a été construit pour l'instant qu'à titre d'oeuvres d'art ; la construction de prototype est croissante, mais peu d'essais statiques ont été entrepris. La structure de tensegrité est souple et est ainsi gouvernée par un critère d'aptitude au service. Equipée de capteurs et d'actuateurs, pouvant adapter sa géométrie en modifiant son état d'autocontrainte, elle est prédisposée à être rendue active et à faire partie de l'exposition.

Jusqu'à présent le contrôle des structures s'est principalement concentré sur des systèmes pouvant réagir aux sollicitations extrêmes. Bien que l'aptitude au service soit identifiée comme un objectif de contrôle, elle n'a pas suscité une attention particulière.

Une structure modulaire à vocation réutilisable de type tensegrité composée d'abord de trois modules, puis de cinq modules et finalement une structure active, jouant sur la longueur des barres, unique et inédite composée de cinq modules, a été construite à une grandeur proche du réel et testées avec succès. Un module est composé de six éléments comprimés et de vingt quatre éléments tendus partagés entre trois longueurs distinctes. La thèse souligne l'importance de la conception judicieuse des assemblages pour de telles structures ; il décrit minutieusement le montage, les assemblages, les éléments et le dispositif de contrôle. Des barres, en polyester renforcées de fibres de verre, sont choisies pour alléger la structure.

Les essais numériques et expérimentaux du contrôle actif en mode quasi-statique montrent que la mise en place d'un contrôle actif, avec un nombre limité d'actuateurs, permet de satisfaire un critère d'aptitude au service. Cela a été réalisé pour des structures sensibles aux charges asymétriques et aux faibles changements de sollicitations extérieures et caractérisées par un comportement non-linéaire et couplé. Le comportement de la structure est linéaire pour des charges ponctuelles. Par contre, il est non-linéaire pour des charges multiples ou des changements de longueur des éléments comprimés. De fait, la simplification de l'analyse structurale telle que la superposition, n'est pas valable même pour les petits déplacements. La relaxation dynamique, méthode d'analyse formulée explicitement, s'est montrée robuste et rapide pour simuler le comportement non-linéaire mesuré sur les structures. Le comportement et les objectifs de contrôle, soit le maintien de la pente initiale, n'ont pas de formulation directe. Les commandes de contrôle sont ainsi déterminées à l'aide de PGSL et le recuit simulé, algorithmes de recherche stochastique. Un contrôle en mode quasi-statique consistant à allonger une barre après l'autre s'est avéré efficace et sûr pour maintenir la pente.

Les travaux réalisés sur le contrôle actif d'une tensegrité, utilisant les bonnes commandes stockées, sous un critère d'aptitude au service sont une contribution importante dans la projection de la création de structures améliorant leur comportement durant leur exploitation. Finalement, un concept étendue de structure active pour la réparation est proposé : « les structures autoréparables ».



## Zusammenfassung

Tensegrities sind räumliche Tragwerke des Leichtbaus deren Steifigkeit und Stabilität durch den Eigenspannungszustand eines Systems aus Druck- und Zugelementen erreicht wird. Diese Strukturen, aus Stäben und Seilen bestehend, bieten Reversibilität, einen modularen Aufbau und eröffnen vielfältige Möglichkeiten für Architekten. Tensegrities wurden bis jetzt meist nur als Kunstwerke gebaut; trotz wachsender Zahl von Prototypen gibt es jedoch nur wenige experimentelle Untersuchungen zum statischen Tragverhalten. Da derartige Tragwerke eine relativ geringe Steifigkeit aufweisen, kommt der Gebrauchstauglichkeit besondere Bedeutung zu. Ausgerüstet mit Sensoren und Aktuatoren können Tensegrities durch Modifikation des Eigenspannungszustands ihre Form ändern, entwickeln sich zu aktiven Strukturen und bieten damit z. B. die Chance statt nur Bedachung auch Teil einer Exposition zu werden.

Bis heute beschränkte sich die Forschung im Gebiet der Regelung von Tragwerken im Bauwesen vorwiegend auf die aktive Regelung zur Sicherstellung der Tragwerkssicherheit unter aussergewöhnlicher Belastung. Obwohl die Strukturkontrolle zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit in früher Literatur erwähnt ist, ist dieses Anwendungsfeld noch wenig erforscht.

Eine Verbesserung der Tensegrity-Leistungsfähigkeit durch aktive Regelung muss den folgenden Herausforderungen genügen: Bau und Bemessung, Strukturanalyse sowie Suche und Anwendung von Steuerbefehlen. Passive Dreimodul- und Fünfm modulprototypen sowie ein einzigartiger aktiver Fünfm modul-Tensegrity-Prototyp wurden in anwendbaren Dimensionen gebaut und erfolgreich getestet. Die Form kann mittels Längenänderung der Druckstäbe angepasst werden. Jeder Modul setzt sich aus sechs Stäben und 24 verschiedenlangen Kabel zusammen. Die vorliegende Arbeit unterstreicht die Bedeutung der konstruktiven Durchbildung der Knotenpunkte, sie beschreibt detailliert die Tragwerksteile, die Verbindungen, die Montage und die Steuereinheit. Die Verwendung von polyesterverstärkten Glasfaserstäben für die Druckstäbe dient der Gewichtsreduzierung des Tragwerks.

Tensegrities sind nicht-lineare, hochgradig gekoppelte Systeme, die empfindlich auf nicht-symmetrische Lasten und geringe Änderungen des Beanspruchungszustands reagieren. Numerische und experimentelle Versuche haben gezeigt, dass eine aktive Regelung mit einer beschränkten Anzahl an Aktuatoren die Gebrauchstauglichkeit gewährleisten kann. Obwohl sich Tensegrities unter vertikalen Einpunkt-Lasten linear verhalten, führen Mehrpunkt-Lasten und Modifikationen der Druckstablänge zu nicht-linearen Strukturantworten. Dadurch ist auch für kleine Verschiebungen das Superpositionsprinzip nicht gültig. Die dynamische Relaxation, eine explizite Methode der Strukturanalyse, erwies sich als robust und schnell für die numerische Simulation des nicht-linearen Verhaltens unter Anwendung stochastischer Suchtechniken wie Simulated annealing und PGSL. Diese werden notwendig, da es für bestimmte Verhaltens- und Kontrollziele, wie z. B. eine konstante Dachneigung unter veränderlicher Last keine geschlossenen analytischen Lösungen gibt. Die Speicherung von erfolgreichen Regelungsbefehlen verbessert die Steuerungseffizienz. Quasi-statische Regelung durch eine sequentielle Längenänderung der Stäbe führt effizient und sicher zur Erhaltung eines Kontroll- und Verhaltenziels.

Die vorliegende Arbeit trägt zur Weiterentwicklung von neuartigen Tragwerken bei, im Besonderen im Hinblick auf ihre Nutzungsperformance. Schliesslich wird ein aktives Regelungskonzept zur Autoreparation vorgestellt.

---

## Riassunto

La struttura “tensegrity” è un sistema spaziale reticolare la cui rigidità e stabilità è data dalla combinazione di barre in compressione e cavi in trazione. Questa struttura leggera, facilmente smontabile, è modulare, riutilizzabile e permette soluzioni costruttive inedite. Ad oggi, questo tipo di struttura è stato impiegato solamente per realizzazioni di tipo artistico; la costruzione di prototipi è in crescita, anche se pochi test statici sono stati finora condotti. La struttura “tensegrity” è flessibile e governata dal criterio di capacità di servizio. Dotata di sensori ed attuatori, è in grado di adattare la propria forma modificando lo stato delle tensioni interne.

Fino ad oggi, la ricerca nel campo delle strutture attive si è focalizzata su sistemi in grado di reagire a sollecitazioni estreme. Poche indagini invece sono state fatte nel campo della capacità di servizio, benchè rientri tra gli obiettivi del controllo strutturale.

Sono state costruite e testate con successo delle strutture a scala reale a moduli riutilizzabili: una costituita da tre moduli, una da cinque moduli ed infine una struttura attiva, unica ed innovativa, costituita da cinque moduli. Ogni modulo è composto da sei elementi compressi e ventiquattro elementi tesi di tre diverse lunghezze.

La tesi sottolinea l'importanza di un'attenta progettazione per questo tipo di strutture e dà una dettagliata descrizione degli elementi utilizzati, dei dispositivi di controllo e del processo di assemblaggio. Per rendere la struttura più leggera, sono state impiegate delle barre in poliestere rinforzato con fibra di vetro.

Le prove numeriche e sperimentali di controllo attivo condotte in modo quasi-statico mostrano che un controllo attivo con un numero limitato di attuatori permette di soddisfare il criterio di capacità di servizio. Ciò è stato realizzato per delle strutture sensibili ai carichi asimmetrici e ai leggeri cambiamenti di sollecitazione esterna e caratterizzate da un comportamento non lineare.

Il comportamento della struttura è lineare per i carichi verticali applicati in un singolo punto; è invece non lineare per carichi applicati in più punti o al cambiamento di lunghezza degli elementi compressi. Dunque, un'analisi strutturale semplificata, come la sovrapposizione degli effetti, non è applicabile in questo caso, neanche per piccoli spostamenti. Il rilassamento dinamico, metodo di analisi esplicito, si è dimostrato essere un metodo robusto e rapido per simulare il comportamento non lineare misurato nelle strutture. Il comportamento e gli obiettivi di controllo, come il mantenimento della pendenza iniziale, non hanno una formulazione diretta. Dunque i comandi di controllo sono definiti da algoritmi di ricerca stocastica, come PGSL e “simulated annealing”. Un controllo in modo quasi statico condotto allungando una barra dopo l'altra si è dimostrato efficace per mantenere la pendenza.

Il lavoro svolto dà un contributo importante allo sviluppo delle strutture che migliorano il loro comportamento durante l'utilizzo. Infine, è proposto un concetto ampliato di struttura attiva : la struttura “autoriparabile”.

## Summary

A tensegrity is a lightweight space reticulated structure consisting of compression members — struts — surrounded by a network of tension members — cables — that provide rigidity and stability. They can be easily dismantled and therefore, they provide innovative possibilities for reusable and modular structures. To date, tensegrity construction has been limited to sculptures. The number of full-scale prototypes built is increasing though few have been tested experimentally statically. Tensegrities are flexible structures and are thus often governed by serviceability criteria. They are able to adapt their shape by changing their selfstress, and when equipped with sensors and actuators, they can actively adapt to changing environments. In this way, they have the potential to become a part of an exhibition rather than merely provide shelter for one.

Until now, most structural control research in civil engineering has focused on active control of structures in order to enhance safety under extreme loading. While maintaining serviceability was mentioned in early work as a goal of structural control, there has been little investigation in this area.

Improving tensegrity performance through active control needs to meet the following challenges: construction and design, structural analysis, finding and applying control commands. Full-scale prototypes of three-module, five-module and unique active five-module, modular and reusable tensegrity structures have been built and successfully tested. Shape is adapted through changing the length of a limited number of bars. Each module contains six struts and twenty-four cables of three different lengths. Good joint design is a priority for this type of structure. The thesis gives a detailed description of an assembly process, pin-joint design, elements and control set-up. Polyester reinforced fiber glass bars lighten the structure.

Tensegrities are non-linear, highly coupled structures, that are sensitive to asymmetric loads and small environmental changes. Numerical and experimental tests show that active control satisfy serviceability criteria with a limited number of actuators. Tests show that the structure behaves linearly when subjected to vertical loads applied to a single joint. Non-linearities are detected for small displacements for loads applied to several joints and for adjusting combinations of telescoping compression members. Therefore, simplifications such as load superposition are not possible. Simulation of the nonlinear behavior using dynamic relaxation, an explicit analysis method, proved successful for predicting the response. Behavior and the control objectives, such as maintaining a constant roof slope, do not have closed loop form solutions. Therefore, stochastic search algorithms are required to find control commands. Simulated annealing search and PGSL proved successful for determining control commands. Storing good control commands improves control efficiency. Quasi-static control, through elongating active struts one by one, is effective and safe for maintaining the slope.

The present work contributes to developing structures that, through computational control and recording previous good adjustments, improve their performance during service life. Finally, an extended active control concept is suggested for self repair.

# Abréviations

## Technique

3M            Structure de tensegrité composée de trois modules

5M            Structure de tensegrité composée de cinq modules

PGSL        Probabilistic Global Search Lausanne

## Associations, groupements

EPFL        Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

IMAC        Laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte	1
1.2	Motivations	3
1.3	Objectifs	3
1.4	Tâches et contributions	4
1.5	Importance de la recherche proposée	5
1.6	Contenu	5
<b>2</b>	<b>Etat des connaissances</b>	<b>7</b>
2.1	Contrôle des structures	7
2.2	Les structures de tensegrité	12
2.2.1	Définitions et historique	13
2.2.1.1	Comportement mécanique	14
2.2.1.2	Recherche de forme des structures de tensegrité	14
2.2.1.3	Analyse de la stabilité	15
2.2.1.4	Etudes numériques du comportement	20
2.2.1.5	Etudes numériques illustrées expérimentalement	21
2.2.2	Structures déployables	23
2.2.3	Problèmes liés à la construction	24
2.2.4	Contrôle des structures de tensegrité	25
2.3	Conclusions	27
<b>3</b>	<b>Techniques expérimentales</b>	<b>29</b>
3.1	Géométrie globale des structures	29
3.1.1	Topologie d'un module	30
3.1.2	Structure composée de 3 modules	31
3.1.3	Structure composée de 5 modules	33
3.2	Géométrie locale des structures	36
3.2.1	Eléments à rigidité unilatérale	36

---

3.2.1.1	Caractéristiques du tube	36
3.2.1.2	Caractéristiques du câble	38
3.2.1.3	Système télescopique	40
3.2.1.3.1	Barre	40
3.2.1.3.2	Câble	41
3.2.2	Assemblages	41
3.2.2.1	Rotule	41
3.2.2.2	Nœud central	42
3.2.2.3	Assemblage modulaire	46
3.2.3	Appuis	47
3.2.3.1	Appui fixe	48
3.2.3.2	Appui unidirectionnel	48
3.2.3.3	Appui bidirectionnel	49
3.2.4	Systèmes de sécurité	49
<b>3.3</b>	<b>Protocole de montage des structures</b>	<b>49</b>
3.3.1	Systèmes de mesure de la tension des câbles	50
3.3.2	Structure composée de 3 modules	51
3.3.2.1	Mise en place du système	51
3.3.2.2	Rectification des tensions du système	52
3.3.3	Structure composée de 5 modules	53
3.3.3.1	Mise en place du système	53
3.3.3.2	Rectification des tensions du système	54
<b>3.4</b>	<b>Système de contrôle actif</b>	<b>55</b>
3.4.1	Position des éléments constitutifs	56
3.4.1.1	Actuateur	57
3.4.1.1.1	Choix de l'actuateur	58
3.4.1.2	Contrôle en mode quasi-statique	60
3.4.1.3	Capteur de déplacement et de rotation	61
3.4.1.4	Montage des éléments actifs	62
3.4.1.5	Tableau regroupant les appareils	64
3.4.2	Bus de communication	65
3.4.2.1	Le bus de terrain	65
3.4.2.2	Fonctionnement du bus CAN	66
3.4.2.3	Paramètres du bus dans l'application	67
3.4.3	Programme LabVIEW®	67
3.4.3.1	Structure et paramètres du programme	68
3.4.4	Systèmes de sécurité et d'avertissement	69
<b>3.5</b>	<b>Conclusions partielles</b>	<b>71</b>

<b>4</b>	<b>Essais statiques</b>	<b>73</b>
<b>4.1</b>	<b>Techniques numériques</b>	<b>73</b>
4.1.1	Analyse statique	74
4.1.1.1	Méthode des éléments finis	74
4.1.1.2	Analyse structurale par la Relaxation Dynamique	74
4.1.1.3	Choix de la méthode d'analyse structurale	75
4.1.2	Contrôle de la forme	75
<b>4.2</b>	<b>Description et paramètres des essais</b>	<b>78</b>
4.2.1	Essais statiques	78
4.2.2	Contrôle de la forme de la structure	81
<b>4.3</b>	<b>Résultats des essais statiques</b>	<b>86</b>
4.3.1	Corrélation entre le modèle structural et expérimental	86
4.3.2	Linéarité locale	88
4.3.3	Non-linéarité	91
4.3.3.1	Superposition élastique des charges ponctuelles	91
4.3.3.2	Changement de longueur des barres	93
<b>4.4</b>	<b>Essais vérificatifs sur la structure composée de cinq modules</b>	<b>94</b>
4.4.1	Linéarité	95
4.4.2	Non-linéarité	96
<b>4.5</b>	<b>Contrôle de la forme de la structure trois modules</b>	<b>98</b>
<b>4.6</b>	<b>Conclusions partielles</b>	<b>102</b>
<b>5</b>	<b>Contrôle actif en mode quasi-statique</b>	<b>105</b>
<b>5.1</b>	<b>Position des actuateurs</b>	<b>105</b>
<b>5.2</b>	<b>Techniques numériques</b>	<b>107</b>
5.2.1	Analyse statique et modèle structural	107
5.2.2	Contrôle de la forme	107
5.2.2.1	Scénario de contrôle	110
5.2.2.2	Cas de charge	115
<b>5.3</b>	<b>Résultats des essais</b>	<b>118</b>
5.3.1	Charge ponctuelle	120
5.3.1.1	Corrélation initiale	120
5.3.1.2	Compensation de la pente	121
5.3.2	Chargement deux nœuds	124
5.3.2.1	Corrélation initiale	124
5.3.2.2	Compensation de la pente	125
5.3.3	Comparaison des commandes de qualité équivalente	127

---

<b>5.4 Conclusions partielles</b>	<b>128</b>
<b>6 Perspectives et travaux futurs</b>	<b>131</b>
<hr/>	
<b>6.1 Recherche multicritère</b>	<b>131</b>
6.1.1 Amélioration de la qualité de la solution	134
6.1.1.1 Sollicitation itérative à partir de la configuration déformée	134
6.1.1.2 Utilisation d'une solution d'un autre cas de charge	135
6.1.1.3 Autres natures de cas de charge	135
6.1.1.4 Etalonnage du modèle	136
<b>6.2 Identification du système</b>	<b>136</b>
6.2.1 Environnements changeants	136
6.2.2 Structure autoréparable	137
<b>6.3 Etude du mode dynamique - Planification de la trajectoire</b>	<b>138</b>
<b>6.4 Etude de la séquence</b>	<b>138</b>
<b>6.5 Délocalisation du contrôle</b>	<b>138</b>
<b>6.6 Caractérisation statique et cinématique de la structure modulaire</b>	<b>139</b>
<b>7 Conclusions</b>	<b>141</b>
<hr/>	
<b>Références bibliographiques</b>	<b>145</b>
<hr/>	
<b>Annexes</b>	<b>155</b>
<hr/>	
<b>Liste des figures</b>	<b>159</b>
<hr/>	
<b>Liste des tableaux</b>	<b>165</b>
<hr/>	
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>167</b>
<hr/>	



# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

Inventées il y a une quarantaine d'années [37, 48, 134], les structures de tensegrité ne peuvent pas être qualifiées d'innovantes, mais le fait que seules des œuvres d'art aient été érigées, confère à leur construction à l'état de service un caractère novateur et excitant. En tout cas, l'aide fournie par un modèle de comportement de tensegrité à la compréhension du fonctionnement du cytosquelette de la cellule, dont l'impact scientifique est identifié comme majeur [61], peut promettre un avenir favorable à court terme à la recherche inhérent à l'étude de la structure de tensegrité.

Le mot anglais « Tensegrity » est dû à Richard Buckminster Fuller [48]. Il résulte de la contraction des mots « tensile » et « integrity », ce qui illustre l'une des caractéristiques principales de ces systèmes. Il illustre le concept des systèmes de tensegrité par « des îlots de compression au sein d'un océan de tension ». Motro [91] choisit pour sa part un néologisme : « tensegrité ».

Aux vues de la littérature croissante dans le domaine durant ces dix dernières années, ces structures suscitent l'intérêt de nombreux chercheurs d'horizons hétéroclites : le génie civil, la biologie [61], l'aéronautique [144] et les mathématiques [114]. Les structures de tensegrité intéressent même les fabricants de jouets pour enfants.

La structure de tensegrité est un système spatial dont la rigidité et la stabilité proviennent de son état d'autocontrainte. L'équilibre est ainsi assuré par la combinaison de compression et de traction dans les éléments à rigidité unilatérale du treillis [91]. Des chercheurs [116,151] ont démontré que la discontinuité des éléments comprimés ne doit pas être limitative et que la convergence de ceux-ci augmente sa capacité porteuse. Cette structure légère, facilement démontable, offre aux constructeurs des opportunités de modularité et de réutilisation. De plus, la construction d'une tensegrité ne nécessite pas de fondations massives (appuis) comme pourraient l'exiger des tentes ou des structures membranaires. Des modules tensegrités imbriqués les uns dans les autres conduisent à la création d'une surface pouvant servir, par exemple, comme plateforme d'une toiture d'exposition temporaire. Etant donné que la

configuration et la forme d'une telle structure, équipée d'un système de contrôle actif des longueurs des barres, peuvent être modifiées pendant son exploitation, elle deviendrait ainsi une part intégrale de l'exposition [41].

La recherche en génie civil dans le domaine de la tensegrité s'est largement concentrée sur l'étude théorique de la rigidification de la structure par des états d'autocontraintes. La construction de prototype est croissante [93], mais peu d'essais statiques ont été entrepris. De même, la construction de structures plus grandes est rare; la plus récente est une oeuvre d'art, l'artéplage d'Yverdon construit pour l'exposition nationale suisse, Expo 02 [39, 102], qui est un type de structure hybride. Une des difficultés majeures de la construction réside dans la conception des assemblages [28] réunissant uniquement des éléments comprimés ou des éléments comprimés et tendus. Dans la philosophie d'une structure légère, modulaire et réutilisable, les assemblages se doivent d'être légers et modulables.

Jusqu'à présent le contrôle des structures s'est principalement concentré sur des systèmes pouvant réagir aux sollicitations extrêmes telles que les tremblements de terre, les vents violents et les vibrations indésirables dans les structures spatiales. Pour ces structures, la plupart des systèmes de contrôle actif impliquent un coût de maintenance élevé pour assurer leur fiabilité sur la durée de vie de l'ouvrage. D'autres travaux relatifs au contrôle structural, mettent en évidence que l'état de service est un objectif qui n'a pas encore suscité une attention particulière pour des investigations plus approfondies [58]. Mis à part les études menées sur des gratte-ciel et des projets maritimes, la recherche reposant sur les critères de l'état de service pour contrôler activement les structures, reste superficielle. Dans le cadre de l'amélioration du comportement à l'état de service, un concept de structure active étendu, structures intelligentes, est proposé par Shea et al. [125]. Le terme « structures intelligentes » trouve sa source dans la convergence de la recherche dans les disciplines telles que l'ingénierie des structures, l'automatique et l'intelligence artificielle. Les conséquences directes de cette nouvelle façon de concevoir le contrôle structural sont l'amélioration de l'état de service et la maintenance des structures au travers des technologies d'avant garde.

Comme la majorité des structures légères, leur souplesse force à considérer leur comportement à l'aptitude au service comme un priorité. Ces structures étant sensibles aux charges asymétriques et aux faibles changements des sollicitations extérieures, le contrôle actif pourrait étendre leur utilisation à l'état de service. Skelton et al. [129] prouvent que contrairement aux structures classiques, le contrôle de forme de structure de tensegrité serait alors peu coûteux en énergie à introduire dans le système. De plus, compte tenu de son comportement non linéaire et couplé, des techniques sophistiquées d'intelligence artificielle doivent être utilisées pour déterminer la commande puisque des objectifs de contrôle ne peuvent pas être atteints par les techniques classiques d'automatique.

Les structures de tensegrité semblent rassembler toutes les prédispositions pour être rendues actives dans un premier temps et être les cobayes pour prouver la faisabilité d'une structure intelligente dans un deuxième temps. Reste qu'à ce jour, aucune structure active de type tensegrité permettant d'illustrer ses prédispositions n'a été construite. De plus, les problèmes supplémentaires de construction et sécurité n'ont pas été abordés.

## 1.2 Motivations

Ce travail a été motivé par :

- l'intérêt croissant de l'étude des structures de tensegrité dans des domaines très variés : le génie civil, la biologie, l'aéronautique et les mathématiques ;
- le besoin d'identifier les défis de construction d'une structure de tensegrité et en plus une structure active de tensegrité, et de proposer des solutions ;
- le besoin de vérifier expérimentalement le comportement des structures de tensegrité ;
- le besoin d'améliorer l'aptitude au service d'une structure flexible, modulaire et réutilisable.

## 1.3 Objectifs

Le but général de cette thèse est d'étudier expérimentalement et numériquement le contrôle en mode quasi-statique d'une structure de type tensegrité. Ce travail est une étape nécessaire à l'extension de cette structure active à une structure intelligente. Les objectifs de ce travail de doctorat consistent à :

- construire une structure tensegrité à une échelle réduite mais représentative pour identifier les problèmes liés à une construction à une échelle réelle et pour proposer par la suite, des solutions pour y faire face ;
- approfondir la connaissance du comportement de ce type de structure au travers d'études numériques et expérimentales ;
- développer un système de contrôle actif ;
- contrôler un système non linéaire, sous-actionné et couplé respectant un critère d'aptitude au service grâce à une nouvelle approche de la commande et identifier les outils numériques s'y rattachant ;
- montrer que le stockage des bonnes commandes de contrôle permet d'accélérer le contrôle du système et ainsi d'augmenter son efficacité ;

- examiner la faisabilité d'appliquer le concept de structure intelligente à la structure de type tensegrité.

## 1.4 Tâches et contributions

Les tâches de ce travail sont :

- la construction d'une structure incluant la conception des assemblages et le choix des matériaux ;
- la construction d'une structure active incluant le système de motorisation et de contrôle ;
- le développement, essai et comparaison d'un modèle analytique et expérimental ;
- la définition d'un critère d'aptitude au service pour le contrôle ;
- le contrôle d'un système complexe.

Les contributions de ce travail sont :

- la proposition d'une structure de tensegrité modulaire et réutilisable ;
- le développement d'un système de contrôle actif en mode quasi-statique d'une structure au comportement non linéaire, sous-actionné et couplé ;
- la démonstration de l'amélioration du comportement à l'aptitude au service par l'intégration d'un système actif ;
- l'observation que des actionneurs surabondants n'améliore pas forcément l'efficacité du contrôle ;
- la démonstration que l'utilisation d'information explicite est utile pour commander une structure ;
- le développement d'un assemblage réticulé pour éléments en compression;
- la démonstration que le métal peut être remplacé par un matériau composite pour ce type de structure ;
- la proposition d'une technique d'identification du système par autointerrogation et d'une heuristique pour accélérer la recherche d'une commande de contrôle ;
- la proposition d'un concept de structure autoréparable.

Ce travail a un caractère pluridisciplinaire. Il intègre des éléments d'ingénierie des structures, d'intelligence artificielle, d'automatique et d'électronique.

## 1.5 Importance de la recherche proposée

« Est-ce possible de créer une structure active de type tensegrité pour assurer un critère d'aptitude au service ? » est la question scientifique de ce travail de doctorat. Celle-ci implique la recherche d'une nouvelle stratégie de contrôle d'un système non-linéaire, couplé et non déterministe.

Jusqu'à présent, la recherche et les applications en génie civil dans le contrôle structural se sont focalisées sur la sécurité des structures sous les conditions extrêmes. Les conséquences directes de notre nouvelle façon de concevoir le contrôle structural sont l'amélioration de l'état de service et la maintenance des structures au travers des technologies informatiques. A cet effet, nous associons les recherches récentes dans les domaines tels que l'ingénierie des structures, l'intelligence artificielle et les techniques d'automatique.

Les applications potentielles de structures de tensegrité sont destinées aussi bien au maintien du patrimoine bâti qu'à la conception de nouvelles structures et plus spécialement celles élancées.

## 1.6 Contenu

Ce travail se subdivise en cinq parties dont la lecture est guidée par la Figure 1.1:

**Chapitre 2 :** Etat des connaissances : le chapitre illustre l'originalité de la recherche. Il souligne par une revue générale de la littérature des travaux entrepris par la communauté scientifique sur les structures de tensegrité et le contrôle des structures.

**Chapitre 3 :** Les techniques expérimentales liées à la construction d'une structure de tensegrité et d'une structure active de tensegrité sont mises en évidence. Les assemblages, le montage modulaire, et les techniques de mesure sont décrits. Le fonctionnement du dispositif actif est expliqué.

**Chapitre 4 :** Des essais statiques illustrent le comportement non linéaire d'une structure composée de trois modules. Le chapitre montre la faisabilité du contrôle de la forme d'une structure de tensegrité soumise à un critère d'aptitude au service ;

**Chapitre 5 :** Le contrôle actif en mode quasi-statique d'une structure composée de cinq modules est étudié. Il démontre l'amélioration du comportement à l'aptitude au service par l'intégration d'un système actif.

**Chapitre 6 :** Travaux futurs. Des idées d'amélioration de l'efficacité du contrôle actif sont proposées pour se diriger vers les structures intelligentes. Différentes observations sont soulignées.

## Chapitre 7 : Conclusions

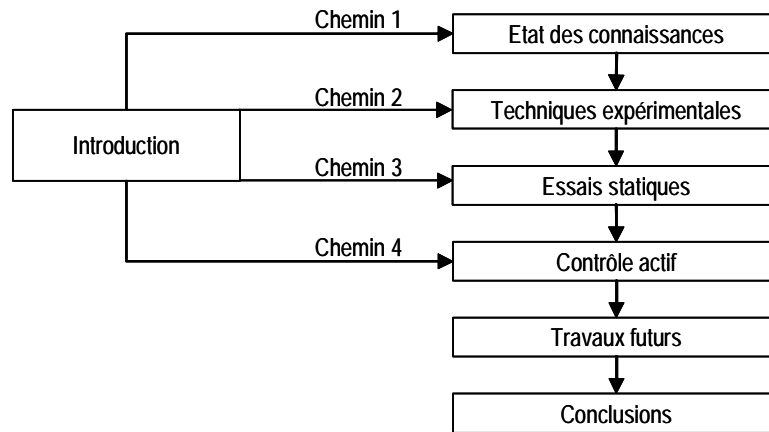


Figure 1.1: Différents chemins de lecture de la thèse

Le chemin 1 s'adresse au chercheur du domaine, le chemin 2 au lecteur sensible aux développements technologiques, le chemin 3 au lecteur qui s'intéresse uniquement aux résultats des essais et le chemin 4 au lecteur se focalisant sur la question du contrôle.

---

## 2 Etat des connaissances

### 2.1 Contrôle des structures

La signification du mot « contrôle » appliquée aux structures ne doit pas être confondue avec l'auscultation d'une structure, laquelle est uniquement mesurée ou observée d'une manière ou d'une autre au contrôle de la structure, laquelle est mesurée et pour laquelle une sollicitation supplémentaire est introduite. Cette sollicitation supplémentaire, appelée commande, doit remplir le rôle fixé par l'observateur. Cette commande peut être, par exemple, une force ou un déplacement.

Le mot « contrôle » a été utilisé pour la première fois durant les années soixante par Eugène Freyssinet dans l'optique de stabiliser les structures élancées par un système de contrôle des câbles de précontrainte. Néanmoins, le travail réalisé par Lev Zetlin rentre mieux dans le concept de contrôle actif utilisé de nos jours : il proposa des structures pilotées au niveau de leur fondations par des vérins hydrauliques. La publication de Yao en 1972 [156], propose la première théorie rigoureuse sur le contrôle actif et développe le concept du contrôle des structures de génie civil. Le contrôle actif des structures est apparu pour permettre la construction de bâtiment plus haut en les contrôlant activement face à des vents violents. Depuis, le contrôle actif des structures de génie civil s'est concentré sur la conception de système capable de faire face aux sollicitations extérieures extrêmes, telles que les tremblements de terre et le vent d'une part ou la conception de structures actives d'autre part.

Dans le domaine des structures de l'aérospatiale, le contrôle actif est mis en œuvre pour le contrôle des structures de haute précision soumise à des vibrations et déformations indésirables d'une part, mais aussi pour le déploiement des structures déployables et la création de structure à géométrie variable.

L'objectif du contrôle actif consiste à créer un système auxiliaire capable de réagir à un chargement en appliquant une sollicitation sur l'ouvrage de telle sorte que la réponse de celui-ci améliore la sécurité et l'aptitude au service.

Les quatre différents systèmes sont le contrôle passif, actif, hybride et plus récemment semi-actif. Au début, le système passif a été rajouté dans une étape ultérieure pour réagir à des

sollicitations aussi indésirables qu'imprévues. Prenons comme exemple la Tour Hancock à Boston qui s'est vu greffée un amortisseur massique. Dorénavant, il est très courant de concevoir le système passif comme partie intégrale de l'ouvrage dont l'une des premières applications est celle du centre CityCorp [108] à New York. L'amortisseur massique (TMD) est un système de contrôle passif très couramment utilisé. Le mécanisme est composé d'une masse reliée à un amortisseur et une rigidité capable de contrebalancer le mouvement d'une structure pour en réduire les amplitudes. Le système à fondation isolante est un autre système de contrôle passif : il est composé par des couches d'élastomères amortissantes prises entre des plaques souvent métalliques. Il est de plus en plus utilisé pour les ponts en Californie afin de réduire les coûts de maintenance. Les systèmes de contrôle actif, tels que l'amortisseur massif actif (AMD), utilise des capteurs pour guider l'action des actionneurs pour compenser la sollicitation [58]. Bien que ce système améliore le comportement dynamique de l'ouvrage, il reste insuffisant pour se prémunir contre des risques majeurs. De fait, les scientifiques ont associés le TMD à l'AMD permettant d'appliquer des forces de contrôle pour améliorer les performances de la structure. La dernière statistique datant de 1999, met en évidence que des systèmes de contrôle équipaient quarante et une tours ou gratte-ciel favorisant le système hybride [136, 137]. Le système semi-actif ou système à rigidité variable profitent d'un dispositif actif permettant de modifier la rigidité par la connexion alternée pouvant être des barres ou des câbles. Certains couplent à cette rigidité un amortisseur magnéto-résistif [4, 5] pour améliorer l'efficacité du dispositif. La première application en grandeur nature a été réalisée aux Etats-Unis [136]. Cette technique est désormais très à la mode au Japon où les nouvelles constructions de gratte-ciel sont équipées de ce dispositif de contrôle semi-actif.

Jusqu'à présent le contrôle des structures s'est principalement concentré sur des systèmes pouvant réagir aux sollicitations extrêmes telles que les tremblements de terres, les applications de contrôle privilégiant l'aptitude au service [162, 161] sont limitées et n'ont pas encore suscité une attention particulière pour des investissements plus approfondis. Citons le projet de système pour maintenir le confort d'une structure flottante pour les Jeux olympiques 2008 [85]. Pour les structures, dont la conception repose sur les critères de sécurité, la plupart des systèmes de contrôle actif impliquent un coût élevé de maintenance et d'entretien élevé pour assurer leur fiabilité sur la durée de vie de l'ouvrage. D'ailleurs, certains systèmes actifs (AMD et système hybride) installés sur les gratte-ciel au Japon sont mis hors service. Hansen et al. [56] mettent en garde qu'un système actif, mal utilisé ou mal modélisé, sur un pont peut être nocif pour la structure. Les coûts liés maintenance des systèmes semi-actif mis en place au Japon sont des sujets que le fournisseur évite d'aborder [discussions issues de « Third World Conférence on Structural Control »].

A ce jour, le nombre de travaux de recherche, dans le domaine du génie civil, sur l'adaptation globale et continu de la forme privilégiant les éléments actifs comme une partie intégrante de la structure plutôt que les systèmes auxiliaires, est restreint [136]. Soong et Manioli, en tant



que précurseurs, proposent le développement de structures actives intégrant aussi bien des éléments de contrôle passif qu'actif pour réagir aux sollicitations extérieures [135]. Cette idée n'a été appliquée que récemment pour la conception d'un pont utilisant ses propres éléments pour le contrôle des vibrations [124]. Les architectes, en proposant des environnements construits actifs, montrent aussi leur intérêt pour le contrôle actif de la forme ou l'adaptation de la géométrie des structures [47]. Calatrava [16] voit dans les structures actives un plus grand intérêt pour la cinématique du système permettant d'améliorer la fonctionnalité des structures et leur perception que pour maintenir leur comportement structural.

Des travaux similaires existent dans l'aérospatiale où le contrôle de la forme a conduit au développement de structures déployables [104]. Ces structures légères se distinguent couramment par leur amortissement faible et par leur grande souplesse. De fait, elles nécessitent un système de contrôle actif pour compenser les vibrations [21, 60] et les déformations parasites [98]. Des barres actives ont d'ailleurs été employées aussi bien pour le contrôle des vibrations de vaste treillis [127, 157] que pour le contrôle de précision de la forme d'une structure [121]. Bien que Wada et Das [149] suggèrent de profiter des travaux réalisés sur les structures adaptatives de l'aérospatiale pour l'ingénierie civile, de telles structures n'ont pas encore vu le jour [136].

Un grand désavantage du contrôle de la forme actuel réside dans le manque d'adaptabilité des attributs sur lesquels il s'appuie. En effet, une technique  $x$ , est souvent très spécifique à une configuration et ne peut être réutilisée pour une autre. Cette approche rend difficile l'extension d'un système de contrôle d'un module structural, à une configuration multimodulaire interconnectée.

L'utilisation d'une boucle de contrôle permet de définir une commande imposée aux actionneurs définie par un modèle, représentant le système physique, grâce aux informations des capteurs mesurant l'état du système physique. Une des difficultés du contrôle réside dans la modélisation du système et des perturbations dont les incertitudes peuvent créer des instabilités [58]. La littérature dans le domaine du contrôle des structures au comportement linéaire est riche, celle pour le contrôle non-linéaire l'est déjà beaucoup moins. Le comportement des structures légères soumises à une sollicitation extérieure peut devenir rapidement très difficile à modéliser compte tenu qu'elles peuvent engendrer des grands déplacements (non-linéarité géométrique). La linéarisation de tels problèmes devient rapidement ardue.

Pour les applications de l'ingénierie civile où l'efficacité du contrôle classique, moderne ou robuste classique est limitée, le contrôle intelligent permet d'aborder les problèmes non conventionnels (modèle incertain, phénomène non quantifiable...). L'application du contrôle intelligent est pour l'instant limitée aux utilisations des techniques des réseaux artificiels de neurones [115, 157, 50] et de la logique « floue » (fuzzy logic) [40, 141]. Un réseau de

neurones a été créé, par exemple, pour contrôler la variation de la tension d'un tendon attaché à un pont-poutre dans un laboratoire afin de limiter les déformations de celui-ci sous des sollicitations dynamiques [159]. Ce type de structures regroupe uniquement les technologies allant des structures avec des éléments actifs aux structures commandées par des réseaux de neurones.

Les récents développements issus de l'intelligence artificielle sont utilisés dans l'ingénierie des structures pour l'auscultation des ouvrages, le suivi du comportement et la maintenance. Ils ont montré leur potentiel d'aider à mieux comprendre le comportement des structures [123], la gestion de la sécurité [25] et l'auscultation des ouvrages [51, 78]. Pour le génie civil, les techniques d'intelligence artificielle ont contribué à des avancées significatives grâce à leur puissance pour l'interprétation des données, mais pas suffisamment pour étendre les possibilités du contrôle des structures.

Les systèmes de contrôle conventionnels sont en général limités au contrôle d'un unique actuateur ou de plusieurs actuateurs indépendants. Pour le contrôle des vibrations d'un câble de pont haubané, chaque câble est équipé d'un instrument de mesure et d'un actuateur de telle sorte que la tension est réglée individuellement. L'interaction entre le câble et la structure est faible.

Shea et al [125, 126, 132] dépassent le concept de structure active et proposent des structures pouvant apprendre : les « Structures Intelligentes ». Cette définition rentre dans le cadre de la structure active proposée par Wada [149] dont l'intelligence est relative à la hiérarchie du contrôle intelligent de Passino [101]. Cette technique semble prédisposée pour des cas où il y a des fortes interactions entre les éléments actifs et le comportement de la structure. Dans les structures complexes, la modification de la géométrie implique le contrôle de sous-systèmes structuraux couplés.

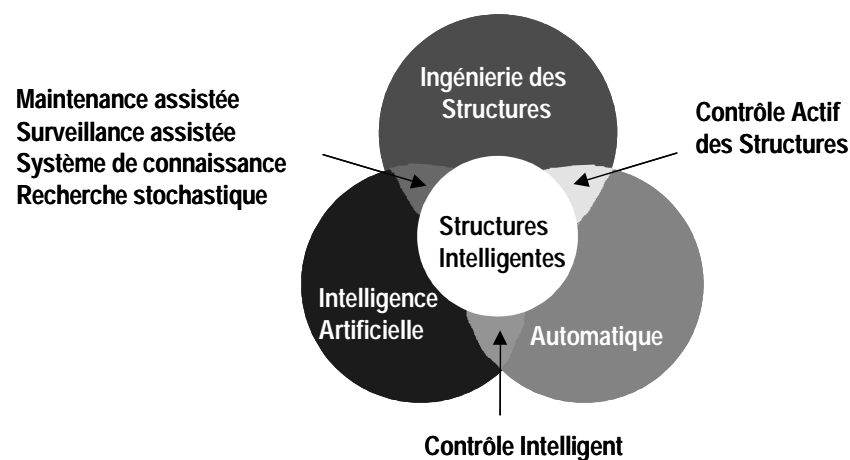


Figure 2.1: Convergence de trois disciplines

Le terme « structures intelligentes » trouve sa source dans la convergence de la recherche dans les disciplines telles que l'ingénierie des structures, l'automatique et l'intelligence artificielle [125, 126, 132].

De plus, le contrôle dans les structures actives est le plus souvent limité à un unique objectif, tel que les vibrations créées par le vent ou les tremblements de terre. Dans le but de lier les changements des critères de performance aux effets du temps, la modification des objectifs de contrôle doit être possible par les ingénieurs. Ces objectifs peuvent aussi être influencés par le génie logiciel qui permettrait l'apprentissage et la planification dans ce cadre. Un point clef des structures intelligentes est l'existence de la connaissance explicite du comportement issue des commandes de contrôle. Cette connaissance implique des modèles de comportement, des objectifs aussi bien que des algorithmes de contrôle et des commandes intervenues dans le passé. La séparation du domaine spécifique de la connaissance et des méthodes de contrôle est bénéfique pour la création de systèmes efficaces pour remplir des objectifs comportementaux.

Le dernier objectif de ces structures intelligentes est l'amélioration du comportement à l'état de service des structures. Ceci est possible par l'apprentissage et la planification. L'apprentissage implique l'utilisation des événements du passé pour améliorer le comportement futur de la structure par la recherche de la correspondance des événements du passé à ceux du présent dans le but d'améliorer la qualité des commandes de contrôle. La planification implique la recherche des commandes de contrôle satisfaisant les objectifs basés sur la prédiction des événements futurs. L'apprentissage permet d'améliorer les modèles de comportement et les commandes de contrôle en adaptant les solutions connues alors que la planification fixe des priorités parmi les objectifs basés sur la prédiction des événements futurs.

Les objectifs des structures intelligentes définies par Shea sont donc différents de ceux traditionnellement rencontrés dans le domaine du génie civil (Figure 2.2).

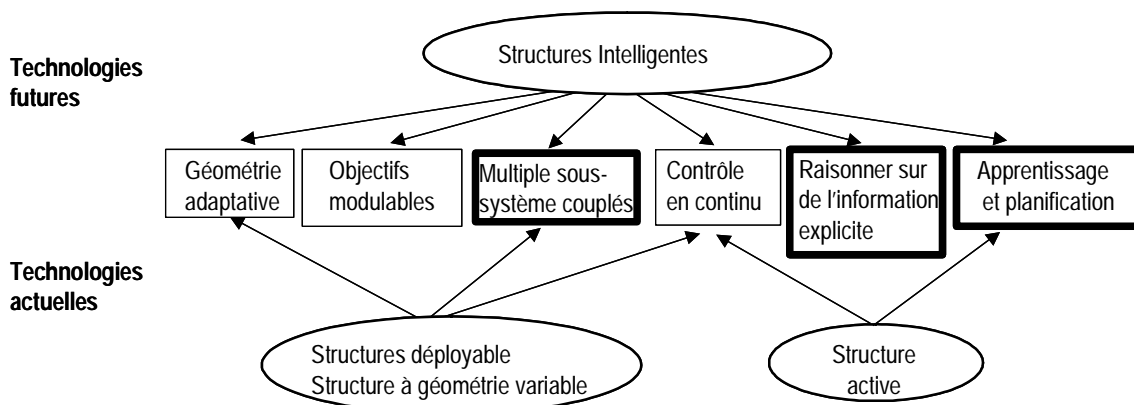


Figure 2.2: Comparaison de la nouvelle approche avec l'approche classique [125]

Adaptabilité de la géométrie, objectifs modifiables, utilisation de la connaissance explicite et contrôle de sous-systèmes couplés convergent vers des structures actives innovantes. A cet effet, un support informatique rigoureux et une organisation des tâches sont indispensables.

Les structures concernées sont :

- gouvernées par l'aptitude au service ;
- très sensibles aux sollicitations extérieures et dont l'aptitude au service est difficile à évaluer (structures légères) ;
- actives où la cinématique est très présente (toit d'un stade à position variable) ;
- soumises à des charges de fatigue (ponts) ;
- pour lesquelles les coûts de maintenance sont comparables aux coût initiaux et dont le comportement à long terme est une priorité (ponts).

Finalement, l'accent est mis sur des structures, équipées d'éléments actifs, réagissant aux changements de leur environnement au travers de :

- la mesure du comportement de la structure ;
- l'évaluation du comportement utilisant des bases de connaissances ;
- l'utilisation d'un contrôle informatique pour adapter activement les caractéristiques structurales ;
- l'utilisation des évènements passés pour améliorer le modèle et la commande de contrôle.

D'autre part, les chercheurs n'ont pas considéré l'utilisation du système actif pour l'adaptation de la géométrie de la structure soumise à une ruine locale. Le corollaire, étant l'identification de(s) élément(s) défaillant(s) à l'aide du système actif, n'a pas été exploré.

## **2.2 Les structures de tensegrité**

Parallèlement à l'étude du contrôle, un type de structures légères appelé « système de tensegrité » est étudié.

Ces dernières présentent les avantages suivants qui seront développés dans ce paragraphe ci-dessous :

- faible poids/résistance ;
- possibilité de pliage ;
- montage modulaire ;
- réutilisable.

Les caractéristiques comportementales de cette structure sont :

- stabilité dans un état autocontraint ;
- souplesse ;
- comportement non linéaire ;
- sensibilité aux sollicitations extérieures et chargements asymétriques;
- construction gouvernée par l'aptitude au service.

Le nom même de « système de tensegrité » intrigue dans la mesure où leur réalité reste inconnue pour la plupart des personnes. Les systèmes tensegrités eux-mêmes surprennent et fascinent ceux qui les voient pour la première fois. Ils les surprennent car le principe de leur équilibre ne répond pas toujours à leur culture constructive, ils les fascinent parce qu'au delà des raisons cachées de leur équilibre, ces systèmes sont caractérisés par une esthétique indéniable jouant sur le flottement d'éléments lourds dans un réseau arachnéen de câbles qui ajoute encore à leur mystère [90].

En 2002, Motro [93] conclu dans sa dernière revue de la littérature que les systèmes de tensegrité sont maintenant reconnus comme des systèmes structuraux efficaces. Il met en avant que l'étude sur l'évolution de l'autocontrainte à long terme doit être un axe de recherche privilégié. Il identifie ainsi les problèmes de fatigue et de relaxation.

### 2.2.1 Définitions et historique

De nombreux écrits ont été consacrés à l'historique des systèmes tensegrité. Les deux références les plus explicites sont contenues dans les parutions de l'International Journal of Space Structures, l'une datant de 1992 [96], et l'autre de 1996 [77]. Trois personnes David Georges Emmerich, Richard Buckminster Fuller et Kenneth Snelson ont déposé un brevet convaincant. Ils y décrivent tous des structures identiques. Ces systèmes se sont principalement développés lors des cinquante dernières années, mais n'ont été construits qu'à l'état d'œuvre d'art. L'œuvre la plus célèbre est sans équivoque la « Tour Aiguille » (Needle Tower) de Snelson [133]. La dernière structure hybride de tensegrité construite est celle de l'artelage d'Yverdon, construite pour l'exposition nationale suisse, Expo 02 [102]. Elle a été imaginée par le bureau d'ingénieur Passera & Pedretti, Consulting Engineering Switzerland. Récemment, Kawaguchi K. et Lu [66] ont construit une double tente dont la pente est assurée par deux modules de tensegrité. Cette construction pourrait être plutôt qualifiée de structure lourde que de structure légère.

Donner une définition universelle au vu des controverses citées ci-dessus est un exercice très périlleux. Néanmoins, le concept proposé est illustré sans difficultés par Richard Buckminster

Fuller pour les système de tensegrité : « des îlots de compression au sein d'un océan de tension ».

La structure décrite par ces messieurs correspond à un système de trois barres et neuf câbles, appelé souvent simplex, témoignant de l'impossibilité de construire une structure comportant moins d'éléments et répondant au concept énoncé. Précisons que le propos est d'ordre spatial ce qui exclu les systèmes plans et linéaires.

Encore aujourd'hui, deux doyens du domaine, Motro et Pellegrino, ne convergent pas sur la même définition. D'ailleurs, ils l'affinent au cours du temps par l'émergence de nouvelles configurations. Citons le dôme Geiger [103] sur lequel ils sont en désaccord. La dernière définition proposée par Motro éclaire la configuration de ces systèmes : les systèmes de tensegrité sont des systèmes réticulés spatiaux en état d'autocontrainte ; les éléments en compression sont englobés par les éléments en traction.

La majorité des travaux effectués ou en cours reposent sur le simplex, ou sur des cellules dans lesquelles les barres ne se touchent pas. Compte tenu que les barres en compression sont soumises au flambage, la hauteur statique d'une grille, par exemple, est limitée. Robbin [116] et Wang [151] mettent en évidence l'efficacité structurale moyenne de cette configuration comparée à celle d'un module dans lequel les barres en compression convergent vers un nœud central. Saitoh [120] et Pedretti [Pré projet Expo 01] considèrent aussi une telle topologie.

### **2.2.1.1 Comportement mécanique**

Une analyse complète d'un système tensegrité passe par trois étapes [69], la première est la recherche de forme (sans chargement, ni autocontrainte) et des états d'autocontrainte correspondants, la seconde est la mise en prétension (création de l'autocontrainte conformément à un état donné) et la troisième consiste à solliciter la structure par un chargement. La création d'un état d'autocontrainte dans la structure est assurée en se donnant des longueurs de câbles légèrement inférieures à la distance entre les nœuds qu'ils relient ou le corollaire en donnant la longueurs des barres légèrement supérieures à la distance entre les nœuds qu'elles relient.

### **2.2.1.2 Recherche de forme des structures de tensegrité**

Les géométries des structures de tensegrité définies par les techniques de recherche de forme doivent être compatibles avec au moins un état d'autocontrainte pour assurer leur stabilité. Tibert et Pellegrino [145] ont comparé sept différentes techniques de recherche de forme dans une publication. Il ressort de cette étude que :

- les techniques cinématiques sont adaptées pour des structures dont la configuration initiale est proche de celle d'équilibre ;
- la méthode de densité des force est la plus adaptée pour la recherche de nouvelles configurations, mais souffre de la définition initiale fixant la longueur des éléments ;
- la méthode des coordonnées réduites offre un intervalle des possibilités de variation de la longueur des éléments, mais nécessite des manipulations symboliques conséquentes.

Compte tenu que la configuration de la structure de tensegrité étudiée était déjà définie, une étude exhaustive et comparative de ces techniques n'a pas été entreprise. Néanmoins, une méthode cinématique, la relaxation dynamique a attiré notre attention car elle peut être utilisée pour l'analyse structurale.

Belkacem [11] et Motro [95] ont mené des études approfondies pour la recherche de forme des tensegrités avec la relaxation dynamique. Ce dernier conclue que la méthode est convergente pour des structures ayant un nombre restreint de nœuds. Adrienssens [3] utilise la relaxation dynamique pour la recherche de forme et l'analyse statique d'une grille de tensegrité.

### 2.2.1.3 Analyse de la stabilité

La compréhension de la stabilité d'un treillis réticulé réside dans la caractérisation statique et cinématique du système. A cet effet, rappelons brièvement quelques définitions globales pour aider le lecteur à suivre la compréhension de la stabilité d'un treillis.

*Système statiquement déterminé ou isostatique* : système stable pour lequel les équations d'équilibre suffisent pour déterminer les efforts et les déplacements dans le système où la connaissance des positions des nœuds est uniquement déterminée par la longueur des éléments.

*Système statiquement indéterminé*, hyperstatique ou admettant un état d'autocontrainte : système stable pour lequel les équations d'équilibre ne suffisent pas pour déterminer les efforts et les déplacements dans le système. Dans ce cas, il y a des éléments redondants.

*Système cinématiquement indéterminé ou mécanisme* : les nœuds du système peuvent se déplacer sans variation de la force ou de la longueur dans les éléments sous l'effet d'une charge extérieure. Par exemple, le nœud à l'intersection des 2 deux barres de même longueur du treillis réticulé (Figure 2.3) peut de se déplacer contre le lecteur sans que les barres ne changent leur longueur, c'est un mécanisme fini.

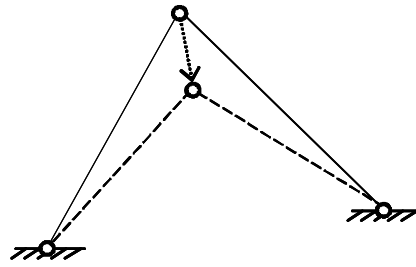


Figure 2.3: Exemple d'un mécanisme fini

*Système cinématiquement déterminé ou mécanisme infinitésimal* : la modification de la longueur des éléments est de l'ordre inférieur à celui du déplacement ou les petits déplacements des noeuds induisent une petite variation de la longueur ou de la force des éléments. Dans la Figure 2.4, le treillis est composé de deux barres de longueur et prétension égale. Le déplacement du nœud M implique des variations des tensions dans les éléments résultant en une sorte « d'opposition au mouvement ou rigidité ».

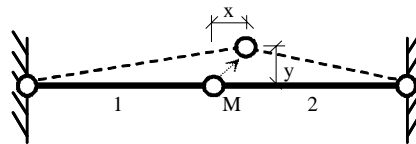


Figure 2.4: Exemple d'un mécanisme infinitésimal

*Mécanisme d'ensemble* (rigid body mecanism) : le système complet est en mouvement d'ensemble sans qu'il n'y ait de variation de longueur des éléments (le système peut bouger en translation par exemple). Pellegrino [105] a démontré comment identifier ce type de mécanisme des 2 autres cités ci-dessus. Pour bloquer ces mouvements d'ensemble, il est nécessaire de bloquer six degrés de liberté dans un repère tridimensionnel.

*Etat d'autocontrainte* : état dans lequel le système est en équilibre grâce aux efforts unilatéraux dans les éléments.

Dans leur géométrie autocontrainte, les systèmes de tensegrité admettent généralement des mécanismes infinitésimaux. La recherche des états d'autocontrainte est un secteur clef de la stabilité de ce type de structure.

Les lois de la statique classique ne permettent pas d'analyser leur comportement. Les conditions de la loi de Maxwell (Equation 2.1-système isostatique) qualifiant la rigidité d'un système réticulé en liant le nombre d'éléments au nombre de nœuds et d'appuis d'un système réticulé définissent certaines structures de tensegrité comme des mécanismes finis. Néanmoins, Maxwell souligne des nuances, laissant paraître l'existence d'exceptions et de mécanismes infinitésimaux sans pour autant réussir à les quantifier.

$$3j - k - b = 0 \quad (2.1)$$



$j$  est le nombre de nœuds,  $k$  est le nombre de degrés de liberté bloqués et  $b$  est le nombre d'éléments.

Calladine [18] revisite les travaux de Maxwell, en s'appuyant sur un modèle physique tensegrité composé de 12 nœuds et 24 éléments. Sa structure est en équilibre alors que la loi de Maxwell la caractérise comme un mécanisme fini. Son étude aboutit à une nouvelle formulation (Equation 2.2) de cette dernière permettant inclure les cas omis auparavant. Cette loi est référencée comme la loi de Maxwell étendue. Notez que celle-ci ne tient pas compte de l'unilatéralité de rigidité des éléments des structures de tensegrité.

$$3j - k - b = m - s \quad (2.2)$$

$m$  : nombre de mécanismes

$s$  : nombre d'états d'autocontrainte

Les valeurs de  $m$  et  $s$  ne dépendent alors plus uniquement du nombre d'éléments, du nombre de nœuds et de la topologie, mais des spécifications géométriques complètes du système. Pellegrino et Calladine [105] mettent en évidence que la compréhension globale des treillis réside dans leurs propriétés statiques et cinématiques. Ils développent une méthode matricielle permettant de déterminer une base des vecteurs d'autocontrainte (*auto*) et des mécanismes (*meca*) pour des systèmes en équilibre.

Cette technique est fondée sur l'analyse de la matrice d'équilibre  $A$  (Equation 2.3) et la matrice de comptabilité  $H$  (Equation 2.4).

$$A t_c = f \quad (2.3)$$

$A$  est la matrice d'équilibre  $[(3j-k) \times b]$ , où  $j$  est le nombre de nœuds et  $k$  le nombre de degrés de liberté bloqués et  $t_c$  est le coefficient de tension, rapport entre la tension dans l'élément  $b_j$  et sa longueur  $L_j$

$$H d = e \quad (2.4)$$

$H$  est la matrice de comptabilité  $[b \times (3j-k)]$ ,  $d$  est le vecteur des déplacements de  $s$  nœuds et  $e$  est le vecteur des élongations des éléments  $[3j-k]$

Ils démontrent que par l'application du principe des travaux virtuels :

$$A^t = H \quad (2.5)$$

L'Equation 2.5 explique la dualité statique-cinématique des treillis [104].

La connaissance de ces deux matrices apporte les informations nécessaires à l'explication de l'équilibre des treillis. Les méthodes d'algèbre linéaire permettent de décomposer ces matrices en quatre sous-espaces vectoriels et de faire ressortir comment déterminer les mécanismes et les états d'autocontrainte.

Un vecteur d'autocontrainte correspond au noyau de  $A$  (Equation 2.6) pour une structure dans sa configuration d'équilibre soumise à aucune force extérieure.

$$\text{selfs} = \text{Ker}(A), [b \times s] \quad (2.6)$$

Un mécanisme correspond au noyau de  $H$  (Equation 2.7) pour une structure dans sa configuration d'équilibre soumise à aucune élongation de ces éléments.

$$\text{meca} = \text{Ker}(H), [3j - k \times m] \quad (2.7)$$

Le nombre d'états d'autocontrainte et de mécanismes pour un système cinématiquement et statiquement indéterminé sont donnés par  $s$  (Equation 2.9) et  $m$  (Equation 2.8).

$$m = 3j - k - ra \quad (2.8)$$

$$s = b - ra \quad (2.9)$$

$ra$  est le rang de la matrice  $A$ .

Les propriétés d'un treillis peuvent être classées dans quatre catégories (Tableau 2.1) suivant les valeurs de  $s$  et  $m$  [54, 92].

Catégorie	$ra$	$m, s$	Classification
I	$ra=b$ $ra=N$	$s=0$ $m=0$	Système statiquement et cinématiquement déterminé
II	$ra=b$ $ra < N$	$s=0$ $m=3j-k-ra$	Système cinématiquement indéterminé
III	$ra < b$ $ra=N$	$s=b-ra$ $m=0$	Système statiquement indéterminé
IV	$ra < b$ $ra < N$	$s=b-ra$ $m=3j-k-ra$	Système statiquement et cinématiquement indéterminé

Tableau 2.1: Récapitulatif des propriétés d'un treillis [92]

Les structures tensegrités sont classées dans la catégorie IV, signifiant qu'un tel système, sous l'effet de l'autocontrainte, est doté d'une rigidité au minimum du deuxième ordre. Les petits déplacements dus aux mécanismes infinitésimaux engendrent des variations de longueurs des éléments au minimum du deuxième ordre. En reprenant l'exemple de la Figure 2.4,  $s=1$  et  $m=1$ . En l'absence de précontrainte dans les éléments, le système n'a aucune rigidité verticale dans sa configuration initiale : le Nœud M, peut se déplacer sans modifications de longueur des éléments. Par contre, le système dont les barres sont légèrement plus courtes que la distance les reliant à M, soient des barres précontraintes; le déplacement du point M est petit ( $x$  horizontalement et  $y$  verticalement), dépend de la quantité de précontrainte et implique une variation de longueur  $\Delta_1$  dans la barre 1 et  $\Delta_2$  dans la barre 2 d'ordre deux (Equation 2.10 et Equation 2.11).

$$\Delta_1 \approx x + \frac{y^2}{2} \quad (2.10)$$

$$\Delta_2 \approx \frac{y^2}{2} - x \quad (2.11)$$

Dès lors que pour un déplacement du premier ordre d'un nœud, les variations de longueur sont au minimum d'ordre deux, le mécanisme est infinitésimal d'ordre un. Compte tenu qu'elle engendre les grands déplacements d'un mécanisme fini, la catégorie III est la catégorie critique.

De nombreux auteurs se sont penchés sur la détermination de l'ordre des mécanismes infinitésimaux des systèmes cinématiquement indéterminés. Tarnai [143] propose une méthode géométrique s'appliquant aux systèmes réticulés simples ou périodiques. Il applique toute sorte de déplacements et cherche quels sont ceux induisant les variations de longueur minimales. Kuznetsov [75, 76] propose dans une série d'articles, résumant plusieurs décades de recherche, une méthode fondée sur la décomposition d'un système en sous systèmes. Salerno [122] propose une technique numérique reposant sur les propriétés énergétiques du système. Calladine et Pellegrino [17] définissent une procédure de test permettant de différencier les mécanismes de premier ordre et d'ordre supérieur reposant sur une analyse numérique énergétique.

Dans le cas des tensegrités, il est nécessaire d'étudier la stabilité de ces systèmes réticulés statiquement et cinématiquement indéterminés pour savoir quels sont les états d'autocontrainte compatibles avec la rigidité de leurs éléments stabilisant la position d'équilibre considérée. En effet, cette méthode ne distingue pas câbles et barres, pour lesquels les efforts internes sont opposés.

La base *auto*, est composée de  $s$  vecteurs indépendants  $self_i$ . Un état d'autocontrainte,  $auto_1$  est ainsi la combinaison linéaire de ces  $s$  vecteurs ( $s$  est le nombre d'état d'autocontrainte)

$$auto_1 = \sum_{i=0}^{s-1} \beta_i self_i \quad [b], \quad \beta_i \in \mathbb{R}, \quad (2.12)$$

Soit  $t_j$ , la force dans le membre  $j$  parmi les  $b$  éléments

$$t_j = auto_j \cdot L_j \quad (2.13)$$

Pour les tensegrités, les contraintes sont  $t_j > 0$  pour les câbles et  $t_j < 0$  pour les barres.

Finalement, l'existence d'un état d'autocontrainte compatible consiste à déterminer les valeurs  $\beta_j$  respectant les contraintes énoncées ci-dessus [67]. La stabilité des mécanismes infinitésimaux est vérifiée par la méthode proposée par Vassart [147].

Ce dernier a développé une méthode plus complète permettant d'évaluer l'ordre du mécanisme infinitésimal sans limitation de l'ordre d'une part ; mais aussi en fixant un critère

maximal de l'ordre, permettant d'identifier un mécanisme fini. La méthode analytique conjuguée à un algorithme, fondée sur les propriétés géométriques calcule itérativement, les variations de longueur dans les éléments pour en déterminer l'ordre. Il illustre sa méthode sur différents exemples et conclut que cette méthode permet d'identifier les mécanismes finis sur la plupart des treillis.

Kazi-aoual et al. [67] proposent une technique pour extrapoler les propriétés d'un module à une structure multimodulaire. Celle-ci est formulée pour des modules qui se juxtaposent les uns aux autres. Par contre, dans notre type de tensegrité, les modules non seulement se juxtaposent, mais se recouvrent.

Il ressort que toutes ces méthodes sont applicables facilement pour des structures simples (1 ou 2 modules), mais nécessitent un appui informatique pour des structures plus larges.

#### **2.2.1.4 Etudes numériques du comportement**

Les principales études numériques du comportement statique et dynamique sont résumées dans ce paragraphe.

Kebiche et al. [68] étudient numériquement le comportement géométriquement non-linéaire d'une poutre composée de cinq modules. A cet effet, ils mettent en place une formulation lagrangienne totale pour évaluer les non-linéarités. Ils soulignent que les effets non-linéaires proviennent de la flexibilité du système. Il ressort de son étude que la rigidité augmente avec la charge et le niveau de précontrainte. De plus, compte tenu l'amplitude des déplacements varie suivant la direction de la sollicitation le comportement est complexe et anisotrope. Ils proposent d'ailleurs de faire une étude comparative au comportement des matériaux anisotropes.

Ben Khala et al. [12] mènent une étude numérique élastoplastique sous chargement d'une poutre composée de cinq modules. Ils soulignent que la rupture d'un câble intervient avant le flambage d'une barre pour leur structure. La configuration initiale, est modifiée après la ruine numérique de plusieurs câbles.

Béchir et Pons [10] mettent en relation tension et fréquence. Compte tenu qu'in situ, les vibrations devraient être facilement mesurables, cette relation peut servir de moyen d'accès à la connaissance de l'état de tension dans le système.

Zhang et al. [160] étudient l'effet du flambage local d'un ou plusieurs membres sur le transfert des efforts dans le reste de la structure. Il compare ainsi le comportement de plusieurs types de toiture circulaire construite sur la base de tensegrité. Zhang [160] propose le remplacement des tubes en acier par des tubes en verre pour différents types de toiture.

Williamson et Skelton [154] classent des types de structure de tensegrité. Skelton et al. [130] mettent en évidence numériquement que les caractéristiques géométriques des éléments ont une grande influence sur la rigidité comparée à celle de la précontrainte. Ils soulignent que la rigidité d'une structure chargée ne baisse pas quand la charge augmente avant qu'un câble ne se détende.

Oppenheim [99] montre l'évolution non-linéaire de la rigidité pour une structure de tensegrité chargée. A partir d'une formulation énergétique, il propose des solutions analytiques pour la relation force – déplacement.

Hanaor [54] étudie numériquement le comportement d'un dôme double nappe. Il souligne l'influence prépondérante des conditions aux limites sur la rigidité et le comportement non-linéaire de la structure sollicitée.

Ben Khala et al. [13] développent une technique d'analyse non-linéaire du comportement dynamique d'une poutre composée de cinq modules. Ils soulignent que l'amplification des mouvements issue du phénomène de résonance n'apparaît pas pour les premiers modes de vibration et implique une augmentation importante des efforts que dans quelques éléments.

Ces études considèrent les éléments constitutifs étant des éléments barres. La plupart des études menées utilisent la méthode des éléments finis pour l'analyse du comportement. Compte tenu que les éléments de la structure sont des éléments barres et les non-linéarités géométriques, un solveur ayant une formulation explicite est sûrement plus adapté que la méthode des éléments finis pour analyser le comportement non-linéaire géométrique. De plus, les temps de calcul ne sont pas abordés, ceux-ci sont importants pour des études paramétriques ou itératives.

### **2.2.1.5 Etudes numériques illustrées expérimentalement**

Hanaor [55, 53] illustre ses travaux théoriques par des essais sur une grille symétrique composée de sept modules de hauteur statique 0.36 mètres et diamètre 1.42 mètres. Il propose un montage modulaire. Compte tenu du nombre important d'éléments redondants, il souligne que la ruine d'un élément influence peu la capacité porteuse de la structure. Il met l'accent sur la nécessité d'utiliser un modèle analytique non-linéaire de comportement pour évaluer les déplacements. L'utilisation d'un modèle linéaire lui semble en général dangereuse. Bien que son modèle non-linéaire lui assure des meilleurs résultats, il n'arrive pas à expliquer les différences entre ses mesures et ses prédictions.

Pellegrino [103] étudie le comportement d'une maquette d'un dôme rentrant dans le cadre de sa définition des structures de tensegrité. La maquette mesure 1.7 mètres de diamètre, les diamètres des câbles et des barres sont de 0.42 mm et 6 mm. Il confirme par ses mesures l'apparition des non-linéarités quand des câbles se détendent. Il montre clairement

l'importance de la position des charges (contenues dans le noyau gauche de la matrice d'équilibre) sur l'amplitude des déformations. Il montre expérimentalement les mécanismes infinitésimaux de sa structure. Les prédictions de son modèle se détériorent dès l'apparition des non-linéarités. Compte tenu de la conception de ses assemblages, il souligne les limites de sa maquette. Au dessus d'une certaine charge, les extrémités de ses éléments ne peuvent plus être modélisées comme des rotules.

Saitoh [120] a construit un arc pour mieux comprendre l'utilisation des tensegrités pour les dômes. Il sollicite expérimentalement un arc composé de treize modules, d'épaisseur 0.9 mètres, de hauteur 3.6 mètres d'écartement entre appuis de 12 mètres. Il souligne qu'un compromis entre la valeur de l'autocontrainte et les dimensions des éléments doit être déterminée. Bien que l'augmentation de l'autocontrainte rigidifie la structure, celle-ci limite la capacité porteuse en sursollicitant certains éléments. Un modèle analytique, calculé par NASTRAN, permet de suivre correctement le comportement sous différentes charges de l'arc. Une étude expérimentale des modes de vibration de l'arc montre que sa stratégie d'introduction de l'autocontrainte et son modèle sont valables.

La structure développée par Raducanu [111] et son équipe dans le cadre du projet « Tensarch » [89] est sûrement la structure de tensegrité la plus impressionnante de part sa taille. Il s'agit d'une grille double couche d'une surface de 80 m<sup>2</sup>. Cette structure est construite à une échelle réelle et est la seule dimensionnée selon une norme (Eurocode 3). Son but était de montrer la possibilité de construire une structure de tensegrité comme une autre structure plus classique. Il souligne aussi son intégration dans le contexte architectural. Remarquez que l'auteur n'a pas choisi une technique de montage modulaire.

Crosnier [27] règle le niveau d'autocontrainte d'une grille de tensegrité d'une dimension de 80 m<sup>2</sup> [111] en évaluant la tension des câbles. Celles-ci sont déterminées en mesurant la fréquence de vibration du câble par un accéléromètre. Il réussit à se rapprocher significativement d'un état d'autocontrainte théorique (corrélation des tensions simulées et mesurées > 95%). Sa stratégie de réglage permet de compenser les incertitudes issues des tolérances sur les longueurs des éléments constitutifs. Malheureusement, aucun essai statique n'a été réalisé pour identifier le comportement de la grille et pour valider le modèle numérique dont les résultats étaient prometteurs.

Averseng [6] règle le niveau d'autocontrainte d'une double grille de tensegrité d'un peu plus de 9 m<sup>2</sup>. Il s'agit en fait de la même topologie que la structure plus grande citée précédemment. Il introduit les efforts en agissant sur des câbles de longueur réglable. Malgré la non-linéarité géométrique, il fait l'hypothèse que pour des petits déplacements la superposition des tensions des câbles est valable. De fait, il réussit à compenser les tolérances de fabrication des câbles et à se rapprocher d'un état d'autocontrainte (corrélation des tensions

des mesurées et simulées > 95 %) en agissant sur la longueur d'un nombre limité de câbles. Il propose d'étendre l'utilisation de sa technique à des structures plus complexes.

Perelli et al. [106] étudient numériquement et expérimentalement le comportement d'une grille composée de trois modules [43]. Ils mettent en évidence la bilinéarité du comportement pour une structure soumise à des charges ponctuelles. De plus, ils soulignent l'évolution non-linéaire de la rigidité en fonction du niveau d'autocontrainte.

Kono et al. [74] mènent un travail expérimental dynamique sur une structure en grandeur nature.

Liapi [80] a construit une grille composée de six modules. Il n'a pour l'instant pas caractérisé le comportement de sa structure. Il prône un assemblage modulaire et rapide pour des structures destinées aux expositions temporaires.

Les études expérimentales illustrant le comportement non-linéaire des structure de tensegrité sont rares et la plus part ont été réalisées sur des maquettes dont la taille n'est pas représentative d'une structure réelle et les assemblages des éléments limitent des investigations poussées. Remarquez que toutes les études numériques, dans lesquelles un modèle analytique est implanté, font l'hypothèse que les assemblages sont des rotules alors qu'il est souvent difficile de comprendre comment certains assemblages construits le sont. Les matériaux des éléments constitutifs sont souvent limités à l'acier, d'autres matériaux ayant un meilleur rapport poids-rigidité pourraient être utilisés : la structure de tensegrité serait encore plus légère et les déformations issues du poids propre seraient réduites.

### **2.2.2 Structures déployables**

Les structures de tensegrité de part leur nature sont prédisposées à être déployables : légèreté, faible volume des constitutifs, et nombre réduit de noeuds. Furuya [49] a été le précurseur dans le domaine, il propose le concept de déploiement d'un mât en tensegrité pour une application spatiale pour laquelle il construit une maquette. Les travaux les plus récents sont ceux de Tibert [144], Lesaux et al. [79] et Wang et al. [153]. Tibert montre l'intérêt des structures de tensegrité déployables pour des applications aérospatiales. Il réalise une étude sur le déploiement d'un mât et d'un panneau de réflexion d'une antenne spatiale. Son étude est illustrée par des maquettes dont le déploiement est manuel, et est réalisée en étroite collaboration avec Pellegrino. Lesaux et al. [79] travaillent théoriquement sur les contacts barre-barre et la rigidité unilatérale des éléments lors du déploiement. Wang et al. [153] illustrent le potentiel du déploiement de son type de grille brevetée, AP & ATP Grids.

### 2.2.3 Problèmes liés à la construction

La plus grande difficulté dans la création d'une structure de tensegrité est la conception des assemblages. Rappelons que les assemblages liant les éléments se doivent d'être des rotules pour que les éléments comprimés agissent comme des éléments barres.

Crosnier et Cevaer [28] soulignent que la clé du problème est le nœud et le montage d'une structure sans rigidité dans la phase transitoire peut être critique. Pellegrino [103] souligne les limites dans la modélisation de sa maquette par des assemblages mal conçus. Liapi admet qu'elle doit investir des efforts dans la conception de ses assemblages pour profiter d'un montage modulaire. Au vu des larges dimensions des assemblages de sa structure, Kono et al. [74] soulignent les problèmes de conception. Hanaor [53] n'arrive pas expliquer les incertitudes de son modèle. Pour la grille de Radacanu [111], il n'est pas évident de comprendre comment les barres vissées dans ses assemblages ne reprennent pas d'efforts de flexion. Par contre, Wang [151], soulignant l'avantage de connecter les barres pour réduire la longueur de flambage, vante la facilité de connecter des éléments comprimés ou des éléments tendus et comprimés alors qu'il ne propose aucun prototype.

A ce jour, il existe qu'une étude systématique, non publiée [Rapport de DEA de Radacanu], de la conception des assemblages pour les structures de tensegrité. Compte tenu que chaque configuration implique ses propres contraintes géométriques, le problème est ardu.

Pour des assemblages réunissant des éléments comprimés les problèmes à résoudre sont :

- faire converger l'axe longitudinal des éléments ;
- minimiser les frottements, phénomènes non-linéaires.

Dans ce cas il faut trouver une solution technique de telle sorte à minimiser l'excentricité des barres et ainsi éviter les moments parasites dans le nœud ou dans les éléments comprimés. En d'autres mots, comment réussir à faire converger en un unique point les axes longitudinaux des barres alors que la structure doit sa stabilité grâce aux efforts internes et est très souple. Compte que les efforts dans les éléments comprimés sont conséquents, le nœud doit être capable de les assimiler. Les problèmes de construction d'une maquette construite avec des élastiques et des tubes en aluminium et d'une structure grandeur nature ne sont pas du même ordre.

Bien que les éléments tendus soient la plupart du temps des câbles, ne reprenant pas de flexion, les problèmes à résoudre pour les assemblages réunissant des éléments comprimés sont identiques à ceux énoncés ci-dessus.

Reste que la structure de tensegrité est une structure légère et flexible, ainsi les assemblages massifs et lourds sont à éviter.



Une contrainte de cinématique doit être ajoutée dans la conception des assemblages pour les structures déployables.

Des assemblages pour des applications générales de treillis ont été brevetés. Ventrella et Volpe [148] et Mazzolani [87] proposent un assemblage rotule pour le treillis formant la toiture de l'aéroport de Milan, Malpensa 2000 [30]. Cet assemblage breveté s'appelle VESTRUT. Il a été développé pour éviter aux éléments du treillis de reprendre des efforts de flexion. Le principe consiste à rapprocher le plus possible les extrémités elliptiques des barres contenues dans un châssis dont la forme intérieure est sphérique. En fait, l'assemblage fait l'hypothèse que la combinaison des rotules locales forme une rotule globale. Compte de la forme sphérique de l'intérieur du châssis, ce système semble mieux adapté pour des éléments uniquement en traction car l'axe longitudinal des barres reste convergent. Compte tenu que la technique de fabrication consiste à partir d'un élément de matière plein pour usiner les extrémités elliptiques, le nœud semble coûteux. Le nœud de Mero [88], M12, breveté en 1972 est sûrement le plus connu pour son application dans de multiples treillis. La clef de son succès réside dans son potentiel d'adaptation de part sa forme sphérique de faible rayon. Néanmoins, la fixation par vissage ne semble pas adaptée à supporter les grandes déformations des structures de tensegrité, alors qu'en 1983 Motro construit des simplex avec des nœuds MERO.

## 2.2.4 Contrôle des structures de tensegrité

La structure tensegrité, équipée de capteurs et d'actuateurs, pouvant adapter sa géométrie en modifiant son état d'autocontrainte est prédisposée à être rendue active. Skelton et al. [129], Djouadi et al. [31, 32], Sultan et al. [139, 138], et Kanchanasaratool et Williamson [65] ont montré par des simulations, le potentiel d'une tensegrité active dans le cadre du contrôle des vibrations et de l'adaptation de sa géométrie.

Djouadi [31] dans son travail de thèse propose de contrôler activement les structures tensegrité pour une application spatiale. Il souligne notamment les faibles études pour le contrôle des systèmes non-linéaires en opposition à la littérature abondante pour le contrôle des systèmes linéaires. Il teste une méthode de contrôle des systèmes non linéaires reposant sur la combinaison de l'algorithme optimal instantané à la théorie des grands déplacements. Des simulations uniquement numériques sont faites sur un exemple de poutre composée par l'assemblage de plusieurs modules de base appelés « simplex ». Cette poutre simule un bras d'antenne d'un satellite pouvant faire l'objet d'un critère de forme géométrique imposé. Des actuateurs sont placés sur certaines barres afin de réduire les déplacements des nœuds dans l'espace. Les résultats de cette étude numérique montrent l'efficacité du contrôle conférant à la structure une plus grande sécurité. L'étude de Djouadi met en évidence l'intérêt de se pencher sur la réduction du nombre de capteurs sans que cela ne dégrade l'efficacité du

contrôle. En corollaire, il faudrait aussi étudier l'effet du nombre d'actuateurs sur la qualité de la commande de contrôle.

Skelton et al. [130] proposent des applications du contrôle actif pour améliorer la manœuvrabilité des ailes d'avion, des antennes et des appareils de microchirurgie. Ils prouvent que la modification substantielle de la forme d'une structure de tensegrité n'implique que des faibles variations de l'énergie potentielle du système. Contrairement aux structures classiques, le contrôle de forme de structure de tensegrité serait alors peu coûteux en énergie à introduire dans le système. Ils proposent aussi de définir la configuration de la structure en fonction de l'objectif de contrôle [128]. De plus, Skelton souligne par une approche énergétique l'existence d'un optimum entre le poids de la structure et le nombre d'actuateurs [« After Structural Control - Then What? », Keynote Lecture 3<sup>rd</sup> WSC ]. Par ailleurs, dans l'optique de minimiser le changement d'un état d'équilibre à l'autre, Skelton propose un contrôle plus efficace de la tension des câbles que celui des barres.

Sultan et al. [139] développe un modèle mathématique décrivant la dynamique non-linéaire de structures de tensegrité. Ils dérivent les équations du mouvement en utilisant une modélisation Lagrangienne. Pour des structures symétriques, ils linéarisent le problème et montre la restriction du nombre d'équations du mouvement pour des reconfigurations symétriques. Ils proposent ainsi de contrôler la tension des câbles d'une structure composée de deux modules pour ajuster l'altitude du plan supérieur. A cet effet, ils négligent les déformations des barres, la masse des câbles, et supposent que le plan inférieur et supérieur sont indéformables et que les câbles sont toujours tendus et non amortis . . .

Kanchanasaratool et Williamson [65] proposent de contrôler l'orientation du plan supérieur d'un module de tensegrité en contrôlant la longueur des barres. Ils modélisent la dynamique du système en appliquant des contraintes entre les nœuds du système en équilibre. Chaque barre est composée de deux points, la contrainte en force entre ceux-ci garantie l'existence de la barre. Il dérive les contraintes. Ils montrent que leur modèle linéarisé permet de faire une bonne approximation du comportement non-linéaire de la structure. Remarquez que leur stratégie de contrôle en boucle fermée nécessite la mesure des vitesses et des positions de chaque nœud.

Shea et al. [125] soulignent que les structures de tensegrité rassemblent toutes les prédispositions pour être rendues actives d'une part et de servir de cobaye pour prouver la faisabilité d'une structure intelligente. Ils soulignent que les structures de tensegrité sont légères et réutilisables et qu'elles offrent un nombre attractif de scénarios de contrôle structural. De plus, la construction d'une tensegrité ne nécessite pas de fondations massives (appuis) comme pourraient l'exiger des tentes ou des structures membranaires. Des modules tensegrités imbriqués les uns dans les autres conduisent à la création d'une surface pouvant servir, par exemple, comme plateforme d'une toiture d'exposition temporaire. Etant donné

que la configuration et la forme d'une telle structure, équipée d'un système de contrôle actif des longueurs des barres, peuvent être modifiées pendant son exploitation, elle deviendrait ainsi une partie intégrante de l'exposition. Une des caractéristiques de la tensegrité étant d'être une structure souple, son comportement à l'état de service en est d'autant plus sensible. De plus, compte tenu que son comportement est non-linéaire et couplé, des techniques sophistiquées d'intelligence artificielle sont proposées pour définir la commande pour des objectifs de contrôle ne pouvant être atteints par les techniques classiques d'automatique.

Reste qu'à ce jour, aucune structure active de type tensegrité permettant d'illustrer ses prédispositions n'a été construite. De plus, les problèmes supplémentaires de construction et de sécurité n'ont pas été abordés.

## 2.3 Conclusions

La recherche dans le domaine de la tensegrité s'est largement concentrée sur l'étude théorique de la rigidification de la structure par des états d'autocontrainte et la recherche de forme. L'analyse structurale numérique est rarement réalisée par un solveur à formulation explicite (section 4.1.1) étant plus adaptée pour traiter les non-linéarités géométriques que la méthode des éléments finis.

La construction de prototype est croissante, mais peu d'essais statiques ont été entrepris pour illustrer le comportement non linéaire identifié numériquement (section 4.3 et section 4.4). Une des difficultés majeures de la construction réside dans la conception des assemblages réunissant uniquement des éléments comprimés ou des éléments comprimés et tendus (section 3.2.2). Le montage d'une structure n'ayant pas de rigidité intermédiaire est aussi un frein à la construction de structures proches d'une grandeur réelle (section 3.3). Dans la philosophie d'une structure modulaire et réutilisable, les assemblages se doivent d'être légers et modulables (section 3.2.2.3). Les matériaux des éléments constitutifs sont souvent limités à l'acier alors que d'autres matériaux ayant un meilleur rapport poids-rigidité pourraient être utilisés, rendant la structure plus légère (section 3.2.1.1).

Jusqu'à présent le contrôle des structures s'est principalement concentré sur des systèmes pouvant réagir aux sollicitations extrêmes telles que les tremblements de terres et les vents violents. Pour ces structures, la plupart des systèmes de contrôle actif impliquent un coût élevé de maintenance et d'entretien pour assurer leur fiabilité sur la durée de vie de l'ouvrage. D'autres travaux relatifs au contrôle structural, mettent en évidence que l'état de service est un objectif qui n'a pas encore suscité une attention particulière pour des investigations plus approfondies. Mises à part les études menées sur des gratte-ciel et des projets maritimes, la recherche reposant sur les critères de l'état de service pour contrôler activement les structures

(section 4.5 et section 5), reste superficielle. Dans le cadre de l'amélioration du comportement à l'état de service, un concept étendu de structure active, structure intelligente, est souligné.

Une des caractéristiques de la tensegrité étant d'être une structure souple, son comportement à l'état de service en est d'autant plus sensible. De plus, compte tenu que son comportement est non-linéaire et couplé (section 4.4.2), des techniques sophistiquées d'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour déterminer la commande quand les objectifs de contrôle ne peuvent pas être atteints par les techniques classiques d'automatique (section 4.1.2 et section 5.2.2).

Les structures de tensegrité semblent rassembler toutes les prédispositions pour être rendues actives d'une part et d'être le cobaye pour prouver l'utilité de l'information explicite et la faisabilité d'une structure intelligente d'autre part. Reste qu'à ce jour, aucune structure active de type tensegrité (section 3.4) permettant d'illustrer ces prédispositions n'a été construite. De plus, les problèmes supplémentaires de construction et sécurité n'ont pas été abordés.

Des études numériques ont montré le changement du comportement lors de la ruine d'un élément d'une structure de tensegrité non active. Néanmoins, aucune étude n'a été consacrée à l'utilisation d'un système actif pour identifier et adapter la géométrie de la structure soumise à une ou des ruines d'éléments (section 6.2).

## **3           Techniques expérimentales**

Ce chapitre illustre des techniques utiles à l'ingénieur pour la conception et la construction d'une structure de tensegrité à une échelle significative proche du réel d'une part, et d'une structure active d'autre part. Il propose des solutions innovantes à une des difficultés majeures de la construction à savoir la conception des assemblages : un assemblage réticulé pour éléments en compression et un assemblage modulaire sont développés. D'ailleurs, un des assemblages proposés dans ce chapitre est l'objet d'un dépôt de brevet. Une technique de montage modulaire rapide est mise en évidence pour une structure réutilisable. Des techniques efficaces de mesure absolue pour vérifier la tension des câbles, sont identifiées. L'utilisation d'un nouveau matériau de construction pour les éléments comprimés est proposée afin de rendre la structure encore plus légère.

Ce chapitre donne les détails de la construction de la première structure active de tensegrité. Il fournit des indications précises des nouveaux défis à surmonter pour motoriser et contrôler la structure à l'aide d'un ordinateur en toute sécurité. Il souligne la nécessité de combiner les domaines tels que la mécanique des structures, l'électronique, le génie mécanique, et l'informatique et les outils s'y rattachant afin d'y parvenir.

La réalisation des travaux décrits dans ce chapitre est indispensable pour aborder la question scientifique de la thèse.

### **3.1           Géométrie globale des structures**

La configuration des prototypes de type tensegrité construit à l'IMAC s'est inspirée de celle développée par le bureau d'ingénieurs Passera & Pedretti Lugano [102] prévue à son origine pour l'Exposition Nationale Suisse. La topologie du module proposé par le bureau a servi de base à l'élaboration de notre module.

### 3.1.1 Topologie d'un module

Un module contient six barres et vingt-quatre câbles, soit 6 éléments comprimés et 24 éléments tendus (Figure 3.1). Il compte 13 assemblages ou nœuds, soient un assemblage réunissant uniquement les barres et douze regroupant à la fois les barres et les câbles.

Des barres télescopiques permettent de mettre la structure dans un état stable autocontraint. La longueur réglable des câbles permet d'ajuster leur tension dans l'état autocontraint de la structure.

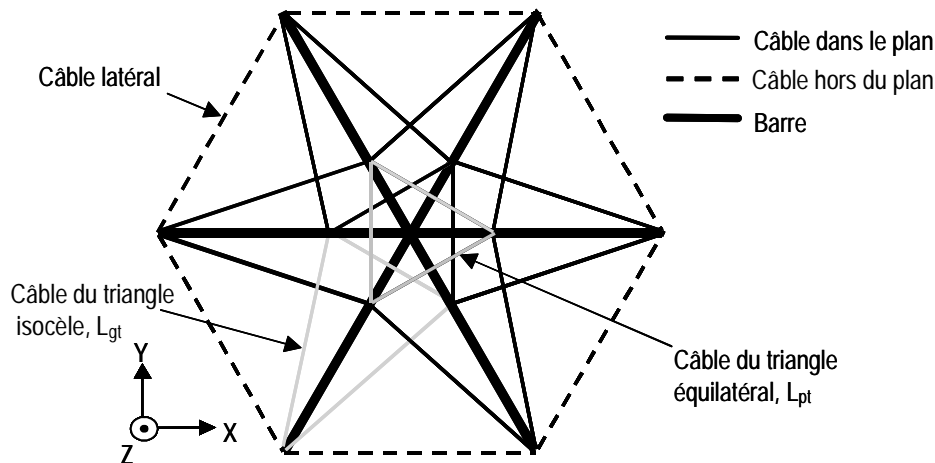


Figure 3.1: Vue en plan de l'élément modulaire

Chaque groupe de trois barres forme un tétraèdre régulier. Les tétraèdres, l'un renversé par rapport à l'autre et en rotation de  $60^\circ$ , se rejoignent en leur sommet ; les six barres convergent en un point appelé, nœud central du module. Les câbles forment une structure à double couche connectée l'une à l'autre par des câbles latéraux. Des câbles, de deux longueurs différentes, composent chaque couche formant un squelette de trois triangles isocèles et d'un triangle équilatéral au centre (Figure 3.2).

Le contour de l'arrangement des éléments dans le plan représente un hexagone (Figure 3.1). Le contour de l'arrangement des éléments en élévation montre un parallélogramme (Figure 3.2).

Les dimensions d'un module sont dépendantes de trois paramètres (Figure 3.1) :

- rayon du petit triangle formé par les câbles du triangle équilatéral :  $r_{pt}$  ;
- rayon du grand triangle formé par les câbles du triangle isocèle :  $r_{gt}$  ;
- distance entre les deux couches de câbles de la structure :  $h$  ;

Le module a une hauteur de 1.10 mètres; il permet de recouvrir une surface d'un peu plus de  $3 \text{ m}^2$  pour une masse de  $30 \text{ kg/m}^2$ . A la différence de systèmes de tensegrité plus classiques,

les barres convergent vers un nœud central afin de réduire leur longueur de flambage. Ce type de module, dans lequel les barres convergent, se rapproche des cellules proposées par Wang [151] et Saitoh [119, 120]. Les grilles doubles couches, composées de trois et cinq modules, décrites ci-dessous sont construites sur la base de ce module.

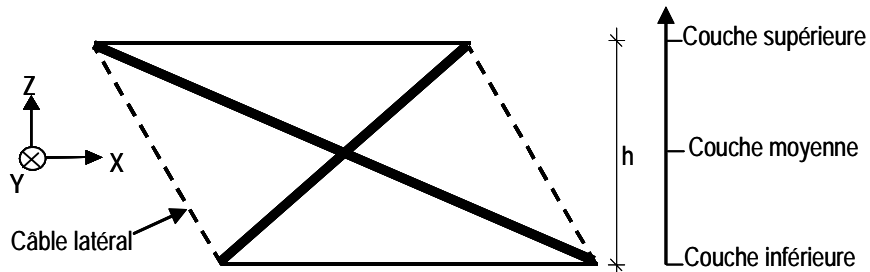


Figure 3.2: Vue en élévation de l'élément modulaire

### 3.1.2 Structure composée de 3 modules

La structure composée de trois modules (Figure 3.3 et Figure 3.5), structure 3M, forme un système symétrique appuyé en trois points (Figure 3.5). Six degrés de liberté sont bloqués afin d'éviter les mouvements d'ensemble de la structure. Le Nœud 1 est bloqué dans les trois directions, le Nœud 51 suivant les direction y et z, et le Nœud 60 suivant la direction z.

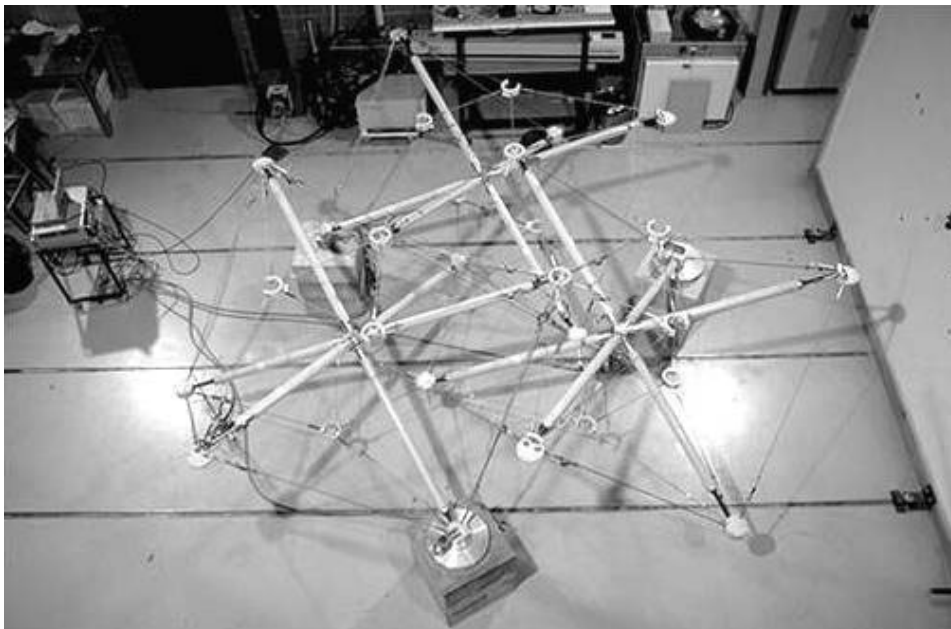


Figure 3.3: Photo plan de la structure composée de trois modules. Remarquons qu'entre modules les éléments comprimés ne se touchent pas. Des plots en béton surélèvent la structure de 0.75 mètres

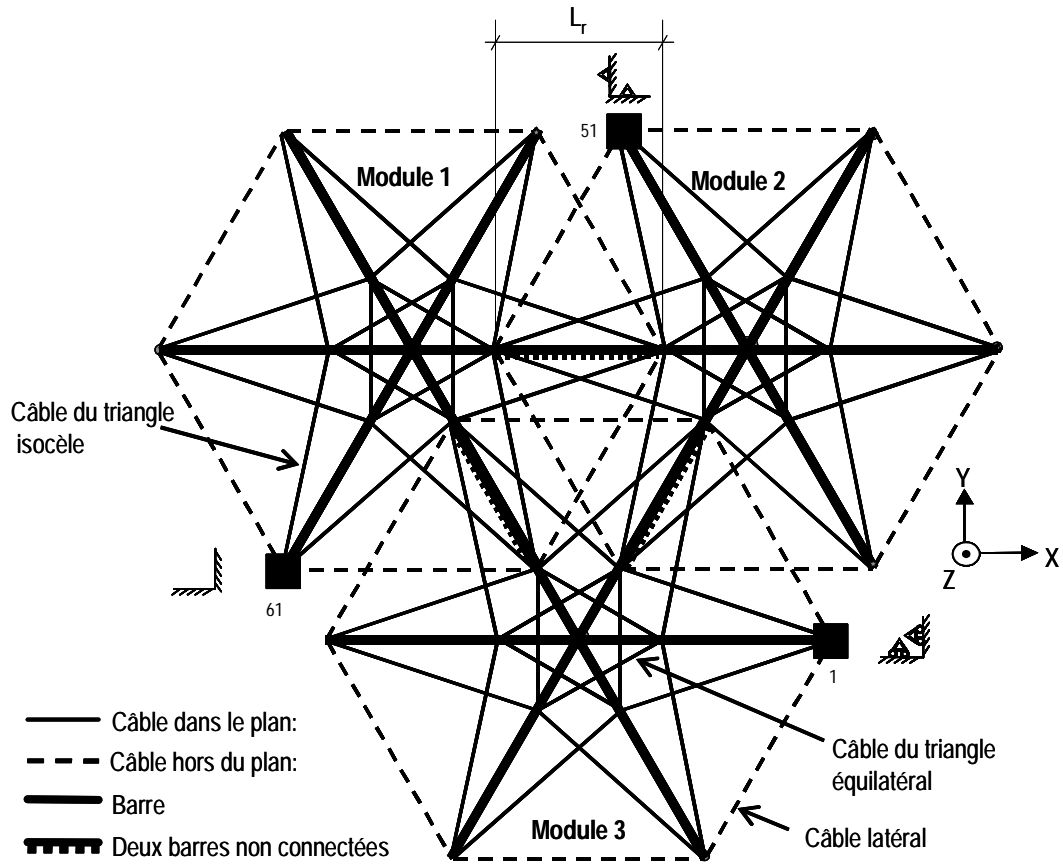


Figure 3.4: Vue en plan de la structure composée de trois modules

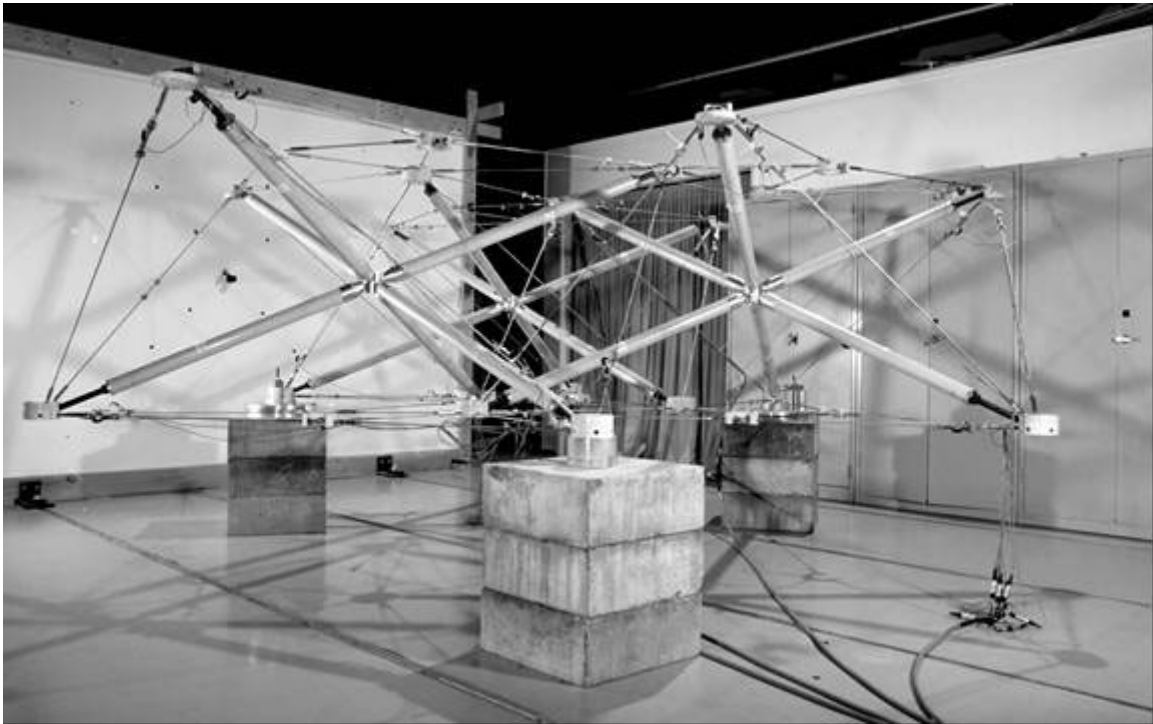


Figure 3.5: Photo en élévation mettant en évidence les appuis en béton surélevant la structure



Deux modules sont connectés l'un à l'autre en deux points, l'un sur la couche supérieure et l'autre sur la couche inférieure (Figure 3.6). La liaison intervient entre un sommet du triangle équilatéral et un sommet du triangle isocèle du module ajouté. Les assemblages modulaires sont les pièces assurant la liaison entre les modules. Pour trois modules, le nombre de connexions s'élève alors à six. Les modules ne sont pas uniquement disposés les uns à côté des autres, ils se chevauchent pour un recouvrement linéaire dans l'axe de la barre considérée,  $L_r$ , de la différence entre les rayons du petit et grand triangle, soit 0.801 mètres (Figure 3.4). Il faut noter que les modules ne sont reliés entre eux que par des câbles (Figure 3.3).

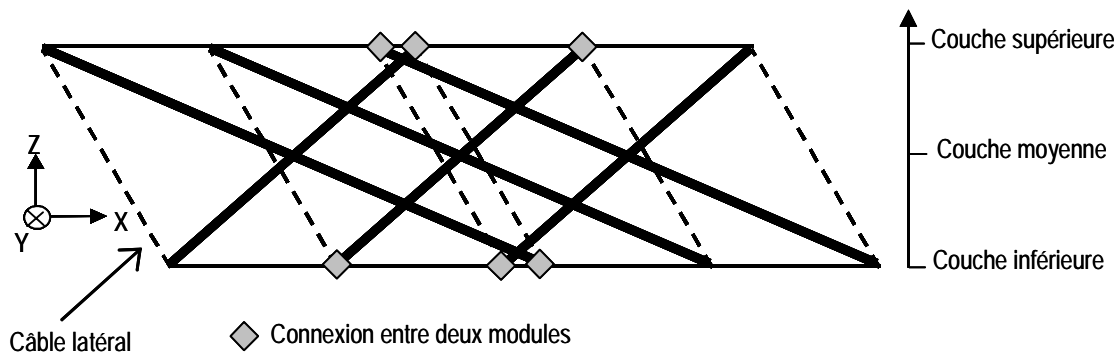


Figure 3.6: Vue en élévation de la structure composée de trois modules : les trois couches de la structure sont mises en évidence

Le nœud central est lieu de convergence des barres, il se situe sur la couche moyenne de la structure (Figure 3.6). Les assemblages modulaires sont placés sur la couche inférieure et supérieure (Figure 3.5). Les deux types de nœuds montés dans cette structure sont de la première génération. 3M a été construite de façon modulaire, à savoir que les trois modules montés indépendamment, ont été connectés dans l'étape ultime. Finalement, 3M est composée de 18 barres, 72 câbles et 33 nœuds, ce qui lui permet de recouvrir une surface d'un peu plus de  $9 \text{ m}^2$  pour une masse de  $30 \text{ kg/m}^2$ . Cette structure est exploitée par les essais permettant l'identification du comportement linéaire local et non-linéaire de ce type de structure (Sections 4.3 et 4.4).

### 3.1.3 Structure composée de 5 modules

La structure composée de cinq modules, structure 5M, forme un système asymétrique (Figure 3.7) appuyé en trois points sur des plots en béton surélevant la structure de 0.75 mètres (Figure 3.8). La topologie modulaire reste semblable à celle de 3M, par contre, deux modules ont été rajoutés.

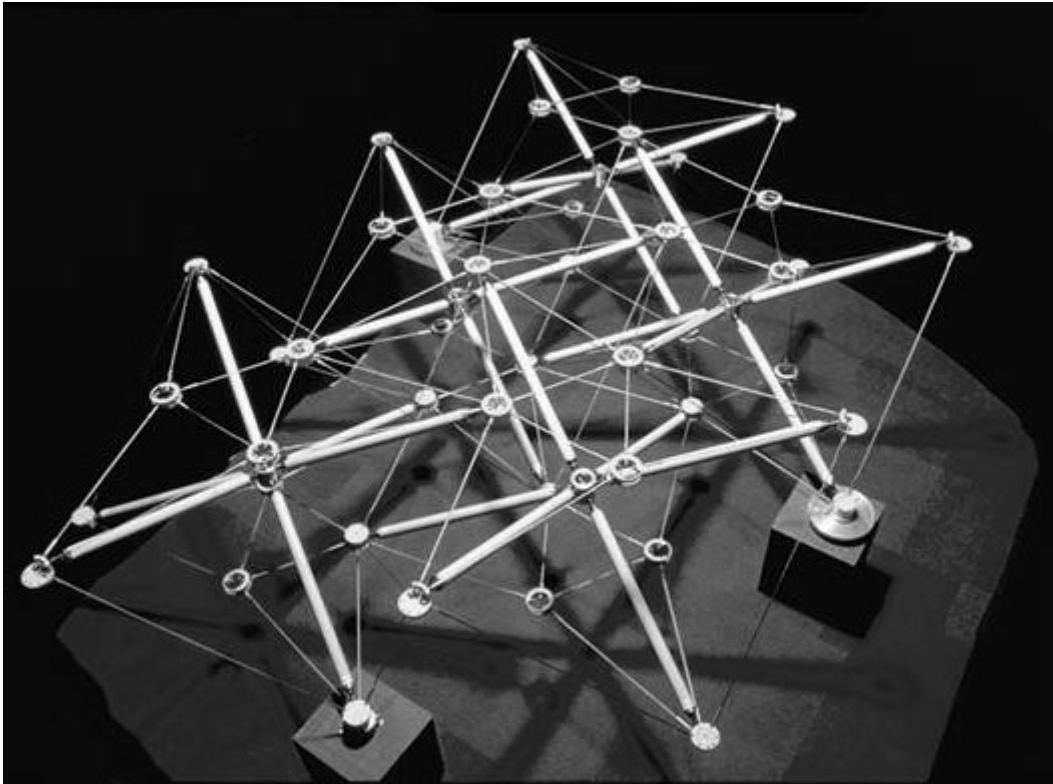


Figure 3.7: Photo en perspective de la structure composée de cinq modules. Remarquons l'asymétrie de la structure et que deux modules ne sont pas appuyés

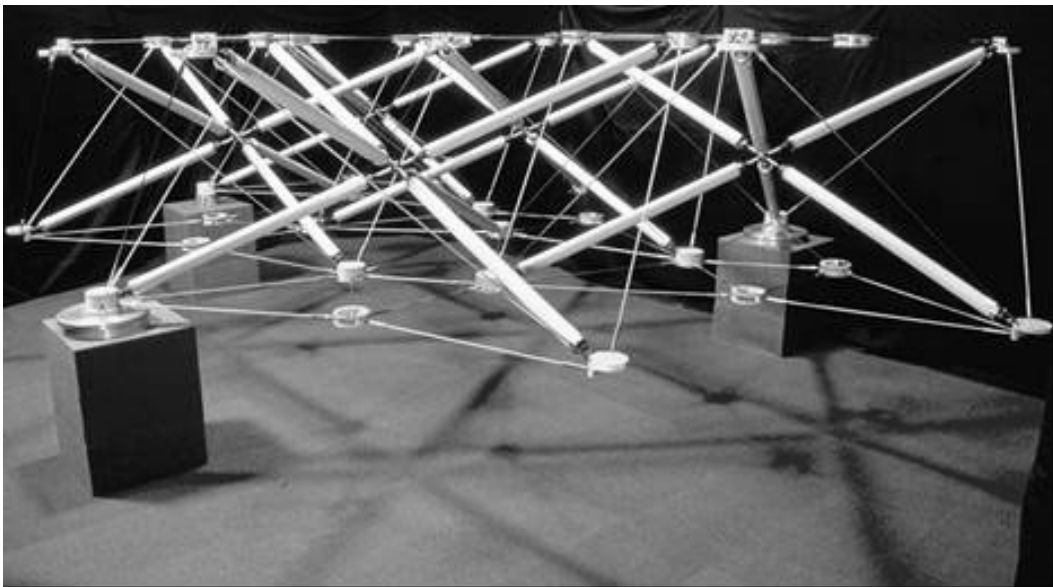


Figure 3.8: Photo en élévation de la structure composée de cinq modules surélevée par trois appuis. Notez le noeud central se résumant à une sphère

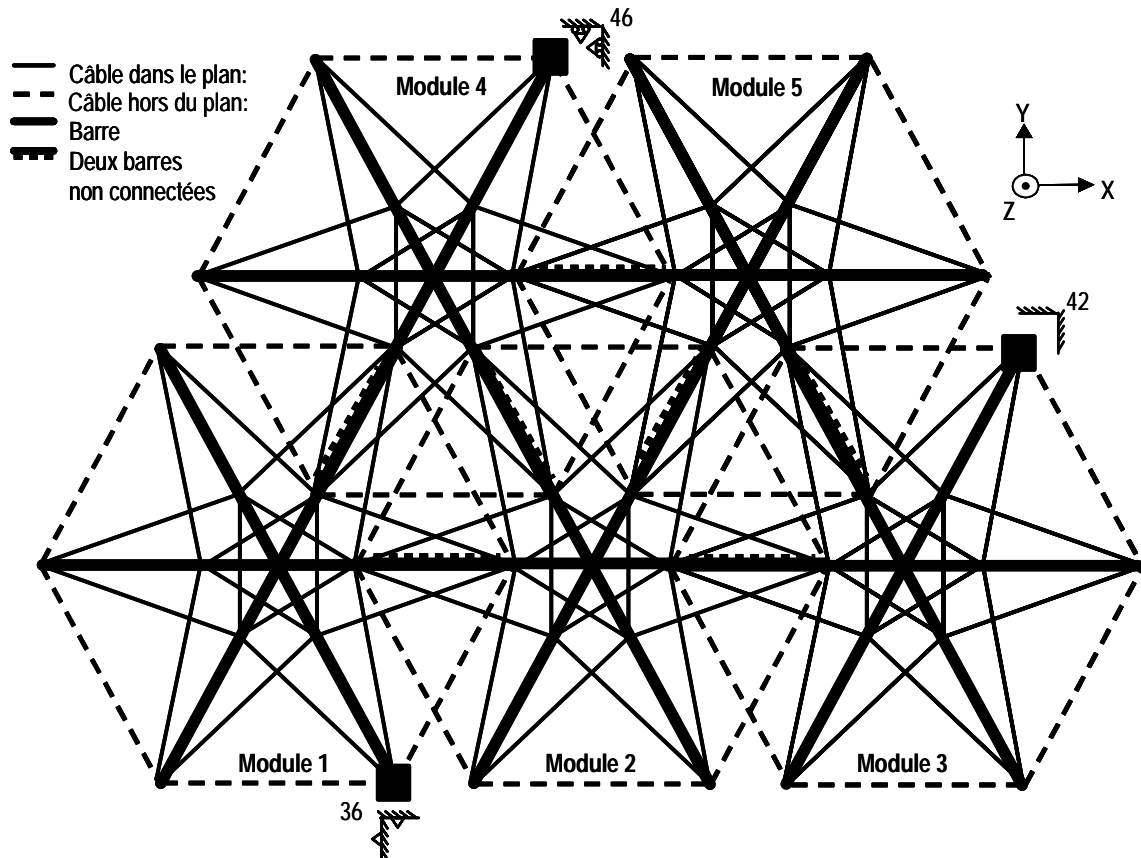


Figure 3.9: Vue en plan de la structure composée de cinq modules la structure : remarquons que le Module 2 et Module 5 ne sont pas appuyés

Six degrés de liberté sont bloqués afin d'éviter les mouvements d'ensemble de la structure. Le Nœud 42, est bloqué dans les trois directions, le Nœud 36 suivant les direction y et z, et le 46 suivant la direction z (Figure 3.9). Cette nouvelle configuration se rapproche d'un cas réel dans la mesure où deux modules ne sont désormais pas appuyés (Figure 3.9 et Figure 3.7). En effet, l'objectif de ce type de structure est d'augmenter la portée.

Les deux types de nœuds montés dans cette structure ont évolué depuis la première génération installée dans 3M : le nœud central a été complètement repensé et l'assemblage modulaire a été rigidifié. 5M a été aussi construite de façon modulaire. 3M a été néanmoins complètement démontée. Chaque module a été reconstruit avec le nouveau nœud central. La différence de montage réside dans sa facilité issue de la cinématique du nouvel élément. De plus, les barres ont été remplacées par le même matériau d'une qualité supérieure (module de Young plus élevé et tolérance sur les dimensions de la section améliorée).

Finalement, 5M est composée de 150 éléments partagés entre 30 barres, 130 câbles et 51 nœuds ; ce qui lui permet de recouvrir une surface d'un peu plus de  $15 \text{ m}^2$  pour une masse de  $30 \text{ kg/m}^2$ . Cette structure a été montée dans le but de tester les nouveaux assemblages et la technique de montage dans une configuration où des modules ne sont pas appuyés. Seuls des essais (sans mesure des déplacements) vérifiant statiquement sa stabilité ont été réalisés et ce

avant d'implanter, en toute confiance, les éléments actifs. 5M est rendue active par le remplacement de deux barres, dont l'allongement est automatisé, pour chaque module.

## **3.2 Géométrie locale des structures**

Cette section illustre la topologie et la géométrie locale des structures construites. La nature, la fonction et la manière de lier les éléments entre eux sont expliquées. Les travaux effectués sur la géométrie locale ont été entrepris dans l'idée qu'une structure tensegrité est un système réticulé, dont les éléments travaillent uniquement parallèlement à leur rigidité unilatérale.

### **3.2.1 Éléments à rigidité unilatérale**

#### **3.2.1.1 Caractéristiques du tube**

Compte tenu que les barres d'une structure tensegrité ne travaillent qu'en compression, il laisse libre choix à l'utilisation de nouveaux matériaux de construction. En effet, les barres choisies sont des profilés ronds en polyester renforcés de fibres, Fiberline® [46]. Ce type de profilé est fabriqué par un procédé spécial de pultrusion. La résine utilisée est thermodurcissable entièrement réticulée et non thermoplaste. Les matériaux de renforcement sont des fibres de verre disposés par superposition de couche de fil dans la longueur de l'élément et de couches de tissus. Le matériau anisotrope révélant des propriétés mécaniques longitudinales supérieures aux transversales, s'adapte à la sollicitation de compression des éléments de type barre de notre étude. Les qualités principales de ce matériau sont :

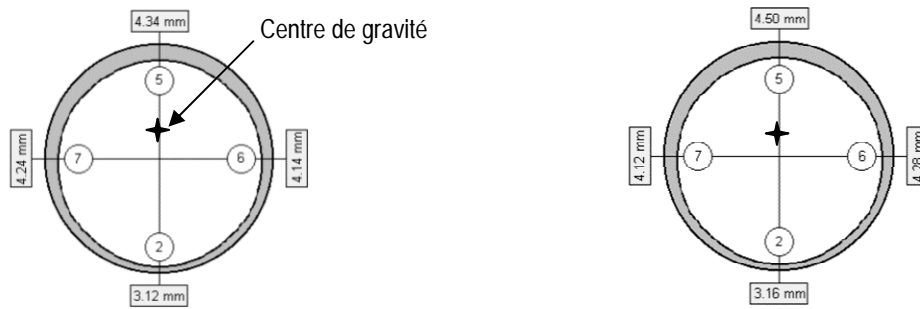
- haut rapport rigidité - poids propre et résistance - poids propre;
- matériau non corrosif ;
- coefficient de dilatation thermique faible ;
- isolant électrique et thermique ;
- esthétique.

Keller [70], dans sa réalisation de passerelle dans les Grisons, fut le précurseur dans l'utilisation de ce nouveau matériau à des fins constructives. Néanmoins, son manque de ductilité est son principal désavantage en comparant ses propriétés à celle de l'acier. Les dimensions du tube choisies dans l'application font que le phénomène de flambage intervient alors que la charge n'est qu'à environ 60 % de la limite de rupture matérielle. Compte tenu que la sollicitation maximale d'utilisation de l'élément comprimé la place dans le domaine linéaire, ces deux phénomènes n'ont pas interféré dans notre étude. Des essais de flambage

ont été entrepris pour identifier le domaine d'utilisation et les propriétés mécaniques moyennes (Tableau 3.1).

Longueur [m]	Masse [Kg/m]	Section [mm <sup>2</sup> ]	Module d'Young (1999) [GPa]	Module d'Young (2001) [GPa]	Charge critique [kN]	Charge critique - Choc [kN]	Limite Linéarité [kN]
1	1.7	703	23	28	42	37	20

Tableau 3.1: Récapitulatif des caractéristiques mécaniques et géométriques moyennes du tube en Fiberline



a) section supérieure d'un tube

b) section inférieure d'un tube

Figure 3.10: Section variable du tube. Notez l'excentricité du centre de gravité, source d'excentricité et de frottement dans les assemblages

Par ailleurs, des variations sur les épaisseurs du tube ont été mesurées (Figure 3.10) sur la première série d'échantillon livrée en 1999. La différence dans l'épaisseur des parois pouvait varier de plus d'un millimètre. Les tubes, dont les dimensions étaient les plus équilibrées, ont été montés sur 3M. Une nouvelle série (2001) de tubes affichant des tolérances raisonnables (écart-type sur l'épaisseur égal à 0.2 mm), laisse penser que la technique de fabrication par pultrusion a gagné en précision en deux ans. Ces nouveaux tubes ont été montés sur 5M. Des essais expérimentaux (Figure 3.11) et numériques de flambage pour des dimensions imparfaites (variation de l'épaisseur), ont montré qu'une épaisseur variable ne conduisait pas forcément à une baisse de la charge critique. Dans ce cas, l'excentricité de la section intérieure sur la section extérieure n'a que peu d'influence sur la charge critique.

D'autres paramètres ont été étudiés expérimentalement sur la sensibilité au flambage [86]. L'étude de barres endommagées par un choc (Figure 3.12), action accidentelle pouvant survenir à tout moment au montage ou simplement par mauvaise manipulation sur un chantier, a mis en évidence que la valeur de la charge critique baisse d'environ 12%. L'endommagement a été réalisé au niveau de l'épaisseur la plus fine de la barre (cas le plus défavorable). La rupture intervient au niveau de l'endommagement. Sa capacité à reprendre des grandes déformations au flambage est plus faible que celle d'une barre non endommagée sans que la rigidité n'en soit affectée. Des essais sur des barres refroidies (-20°C) ont souligné une augmentation de la rigidité et de la valeur de la charge critique. Par ailleurs, le module

d'Young de la deuxième série de barres (2001) est supérieur d'environ 15% à celui de la première série (1999).



Figure 3.11: Photo du flambage d'un tube



Figure 3.12: Endommagement d'une barre en Fiberline créée par un choc

### 3.2.1.2 Caractéristiques du câble

Le choix des éléments tendus s'est porté sur des éléments en acier inoxydable de la maison Jakob A.G. [64]. Ils sont composés de deux embouts liés par un câble. Ce dernier est fabriqué à partir de fils préétirés de haute résistance. Il est composé de plusieurs torons pour lesquels les extérieurs s'enroulent autour des intérieurs (Figure 3.13a). La section transversale montre sept torons munis chacun de six fils de diamètre 0.6 mm (Figure 3.13b). Le diamètre apparent du câble est de 6 mm. La torsade des torons leur donne une belle allure d'une part, mais apporte aussi de la souplesse et une meilleure répartition des contraintes dans le câble d'autre part.

Les extrémités du câble sont serties avec des embouts à tiges filetées. Ces embouts (Figure 3.13c) peuvent tourner librement autour du câble. Ces pièces tournantes sont pratiques pour éviter la torsion du câble lors du réglage de la longueur d'un élément tendu.

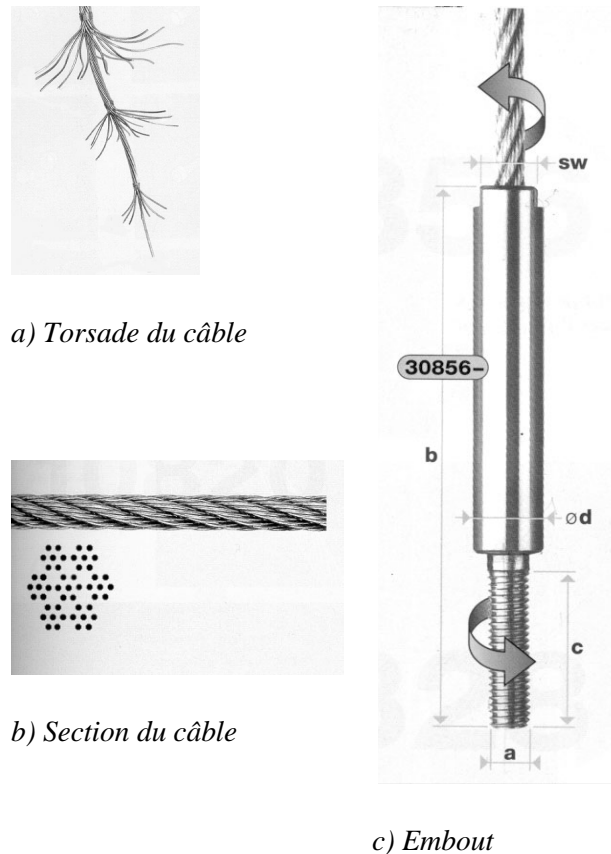


Figure 3.13: Description d'un câble

Les extrémités des câbles montées avec les billes sont de deux types. A une extrémité, la bille est taraudée et bloquée sur la tige filetée de l'embout par un écrou (Figure 3.14). À l'autre extrémité, la bille est libre, sa position est réglée par la position de l'écrou sur la tige filetée (Figure 3.16)

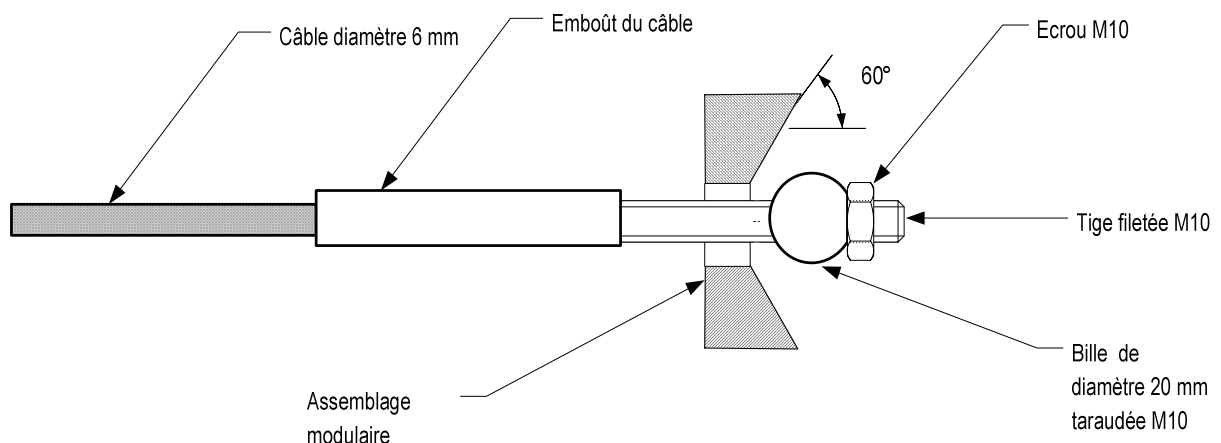


Figure 3.14: Extrémité du câble de longueur fixe

Des essais, jusqu'à la rupture, ont été réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques du type de câble utilisé. La rupture n'intervient pas au niveau du matériau acier proprement dit, mais

par glissement du sertissage du câble dans l'embout. La désolidarisation des deux parties intervient environ à 90% de la charge de rupture du câble, s'il était ruiné sans embout. Les résultats sont illustrés dans le Tableau 3.2.

Diamètre apparent [mm]	Section [mm <sup>2</sup> ]	Module d'Young [GPa]	Charge rupture [kN]	Masse [Kg/100m]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	sw [mm]
6	13.86	115	17	13	M10	138	60	13	10

Tableau 3.2: Caractéristiques mécaniques et géométriques du câble

Pour augmenter leur rigidité et surtout pour éviter des phénomènes non-linéaires, les câbles ont été prétendus à 60% de leur charge de rupture. Cette prétension met les torons en place et donne la longueur utile du câble. L'élongation du câble est de l'ordre de 1 pour 1000. Une faiblesse dans le sertissage peut être décelée par la mesure d'une variation trop importante de la longueur du câble après la prétension.

### 3.2.1.3 Système télescopique

Le système télescopique des barres permet de mettre la structure dans un état stable autocontraint. Le système télescopique ou de réglage des câbles permet d'ajuster leur tension dans l'état autocontraint de la structure.

#### 3.2.1.3.1 Barre

Les tubes en Fiberline sont dotés à une de leur extrémité d'un système télescopique (Figure 3.15) pour permettre la mise en autocontrainte du module. L'extension est réalisée par la rotation d'un écrou contre un manchon sur une tige filetée. Le pas de vis est de 1.5 mm pour un diamètre de M24. Compte tenu que l'écrou compte six faces, la précision sur la variation de longueur est au moins de 0.25 mm.

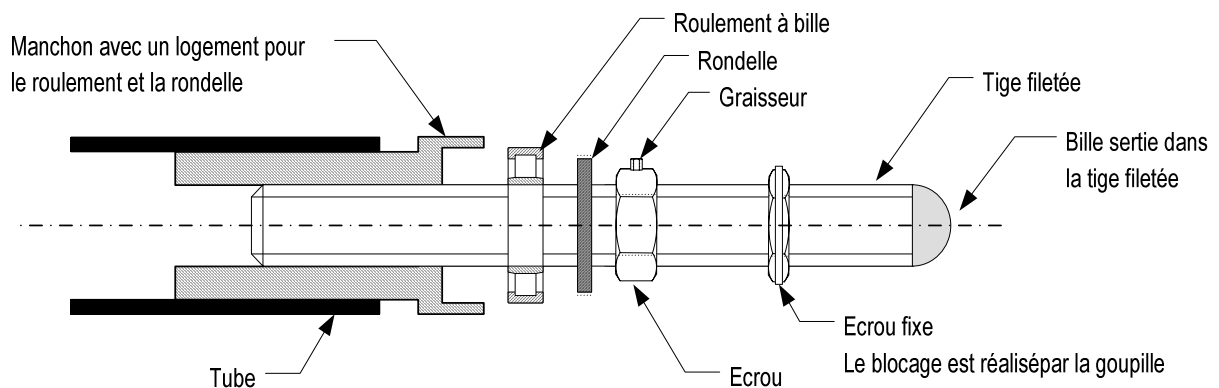


Figure 3.15: Système télescopique décomposé pour la structure composée de trois et cinq modules



### 3.2.1.3.2 Câble

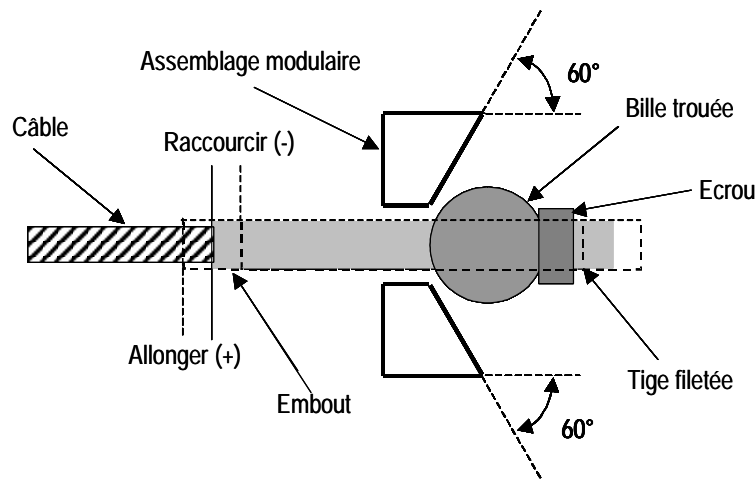


Figure 3.16: Système de réglage de la longueur du câble

A une extrémité, le câble est pourvu d'un système télescopique permettant d'ajuster sa longueur et par la suite de régler sa tension. Ce système permet aussi à l'embout de pénétrer dans l'assemblage modulaire. Le pas de vis est de 1 mm pour un diamètre M10. Compte tenu que l'écrou compte six faces, la précision sur la variation de longueur est au moins de 0.2 mm.

## 3.2.2 Assemblages

Les assemblages entre les éléments tendus et comprimés sont les éléments clés pour la construction et la modélisation d'une tensegrité. Un soin particulier a été apporté à leur conception afin que ceux-ci, tout en favorisant la création de rotule à l'extrémité de chaque élément, offrent des commodités pour le montage modulaire. Dans la configuration proposée, deux natures d'assemblage ont été fabriquées :

- le nœud central regroupant les extrémités des six barres de chaque module,
- l'assemblage modulaire, divisé en trois éléments regroupant câbles et barres permettant l'imbrication aisée des modules les uns dans les autres.

### 3.2.2.1 Rotule

Un tel système réticulé implique la création d'un type rotule pour les liaisons en compression et en traction. L'idéal réside dans le contact trois points entre une sphère et un tétraèdre. Pour des raisons pratiques d'usinage, nous avons opté pour un cône à la place du tétraèdre. Dans ce

cas, les trois points peuvent se déplacer sur la circonférence du cercle à l'intersection géométrique de la sphère et du cône.

- la rotule en traction consiste en une tige dont l'extrémité en forme hémisphérique vient s'appuyer dans le complémentaire intrudé d'un cône décapité (Figure 3.17);

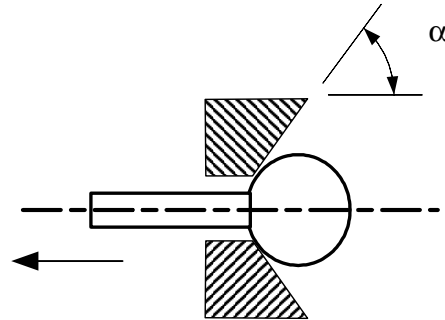
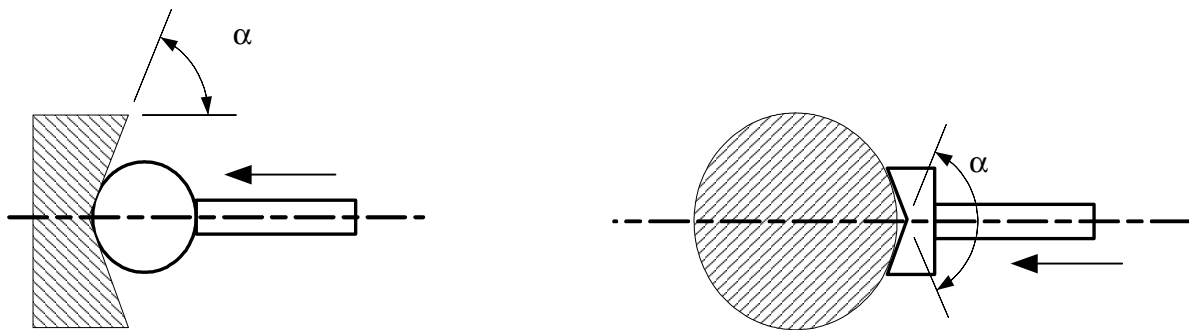


Figure 3.17: Schéma d'une rotule de traction. La partie remplie est la pièce fixe.

- les rotules en compression consistent en une forme hémisphérique venant s'appuyer sur un cône (Type I) ou un dans un cône venant s'appuyer sur une forme hémisphérique (Type II) (Figure 3.18).



a) Type I

b) Type II

Figure 3.18: Schéma de deux rotules de compression. La partie remplie est la pièce fixe

### 3.2.2.2 Nœud central

Le nœud central est le lieu de convergence des 6 barres d'un module. Le nœud central a été conçu dans l'idée de faire converger les barres le plus près possible du point de convergence virtuel de leur axe de révolution, afin de limiter les excentricités induisant des moments parasites. Dans ce cadre trois prototypes, N°1, N°2 et N°3 ont été développés.

N°1 (Figure 3.20) est le premier nœud central installé lors du montage de la structure trois modules, 3M. Il s'agit d'un cylindre en aluminium autorisant la création de 5 rotules locales (Type I) et un encastrement. La bille du manchon conique (Figure 3.19) à l'extrémité de cinq

barres est placée dans un logement, fraisé à 90 degrés. L'encastrement de la barre fixe est réalisé par l'assemblage tige filetée, vissée dans un taraudage du nœud et serrée par un écrou. Notons que seule la barre fixe, permettant de garantir l'angle par rapport à l'horizontale lors du montage, est rigidement liée au nœud central. Les autres sont uniquement au contact avec trois points avec leur cône respectif.

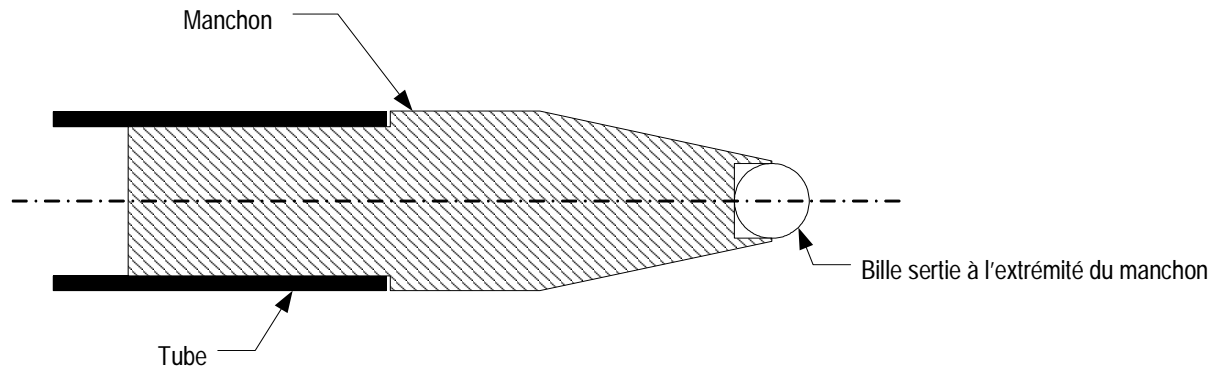


Figure 3.19: Extrémité de la barre s'appuyant sur le nœud N°1

De plus, sur chaque face parallèle du cylindre quatre taraudages ont été réalisés pour la manutention et la mise en charge de la structure. Dans le cadre de la campagne d'essai décrite dans le chapitre 4 illustrant le comportement non-linéaire, N°1 a été monté sur chaque module de 3M.

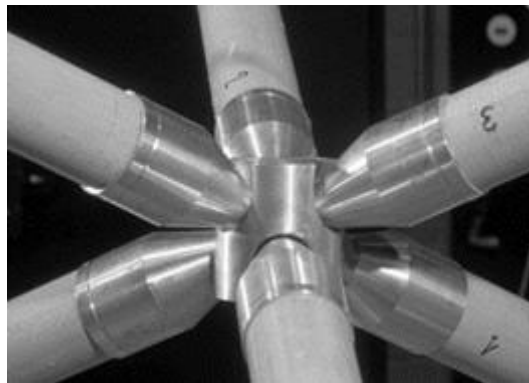


Figure 3.20: Nœud central, N°1, de la structure composée de trois modules

Le nœud N°2 (Figure 3.21) est l'évolution du nœud N°1. Le nœud central originel a été modifié dans l'idée de réduire au minimum l'excentricité issue de l'impossibilité technique de faire converger les barres en un seul point. Le diamètre du cylindre du nœud central a été réduit de 80 à 50 mm, et le diamètre des billes 30 à 24 mm (augmentation du glissement). La barre précédemment fixe a été rendue libre sur le même principe. De plus, N°2 est entouré par un cylindre sécurisant le système et facilitant le montage en évitant la chute de la barre, en cas de perte du contact bille-cône. Cependant, de part leur conception, la création des rotules locales dans ces nœuds ne suffit pas. Ces deux types de nœuds ne sont pas exemptés par la

création d'un moment interne altérant la stabilité du nœud (Figure 3.26). Un nouveau prototype, créant une rotule globale, est la solution qui supprimerait cet inconvénient.



Figure 3.21: Evolution du nœud central N°1 (Figure 3.20), nœud central N°2 (2001)

Le nœud N°3 est simplement une sphère en acier trempé, lubrifiée, sur laquelle viennent s'appuyer six cônes très ouverts à l'extrémité des barres (Figure 3.22 et Figure 3.23a et b). Dans ce cadre, toute translation ou rotation  $\alpha$  (Figure 3.25) de la barre est toujours centrée. De plus, la redondance d'un tel système accentue sa stabilité. En effet, trois barres correctement disposées seraient suffisantes à assurer la stabilité directionnelle du nœud dans l'espace.

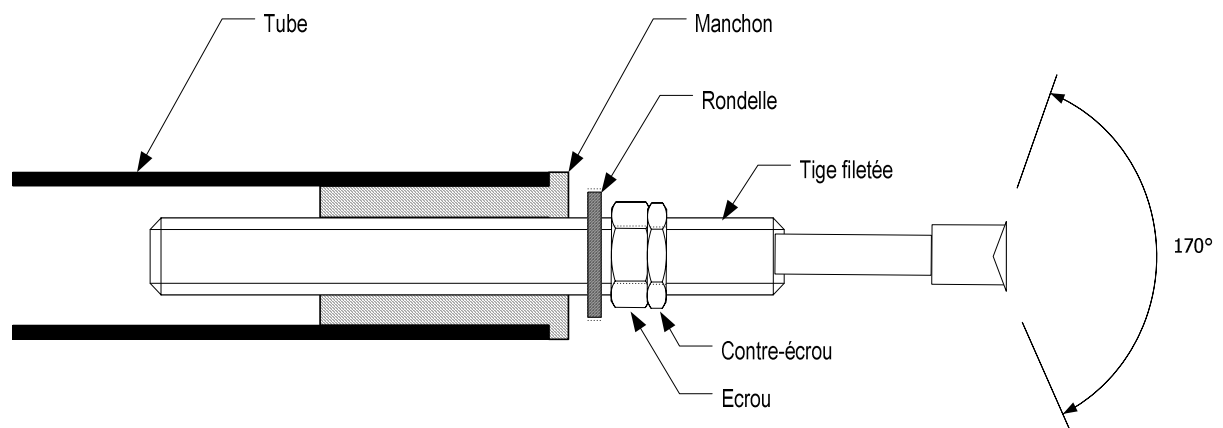
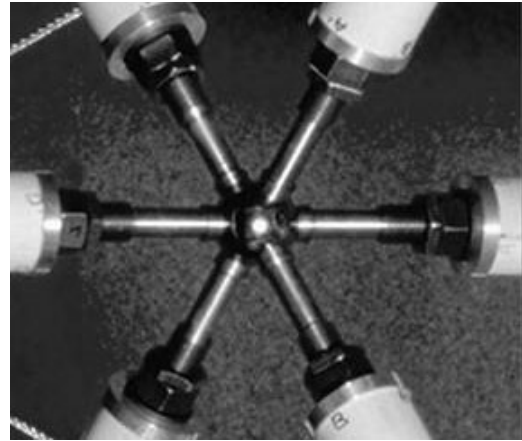


Figure 3.22: Extrémité de la barre s'appuyant sur la sphère pour le nœud N°3

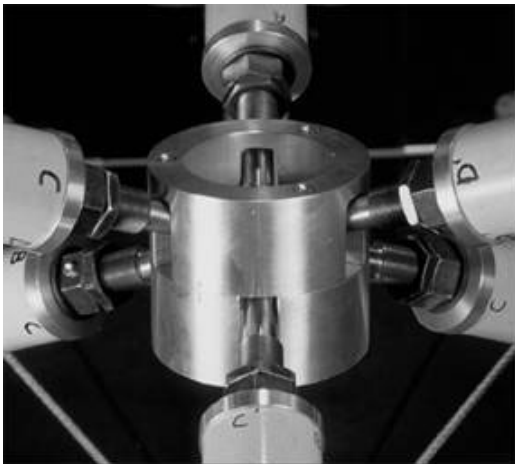


a) Vue en élévation

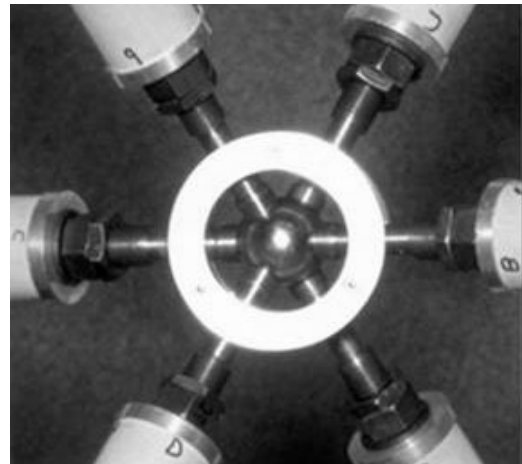


b) Vue en plan

Figure 3.23: Vues d'un noeud central, noeud N°3 (2001), de la structure composée de cinq modules



a) Vue en élévation



b) Vue en plan

Figure 3.24: Vues d'un noeud central, N°3 équipé de son cylindre de sécurité. Remarquons que le cylindre ne fait que reposer sur les barres supérieures

La stabilité du noeud N°3 (aucun déchaussement de la bille) est manifeste. Cette constatation a eu pour conséquence directe le démontage de 3M. La structure 5M et active ont été alors construites avec le noeud N°3. Un cylindre de sécurité où viennent se loger les extrémités des six barres est tout de même placé autour de la sphère.

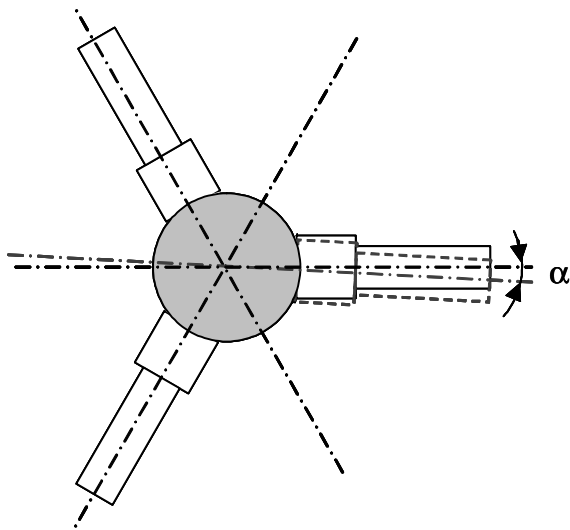


Figure 3.25: Vue en coupe du noeud N°3.  
Remarquez que les barres convergent toujours au centre de la sphère

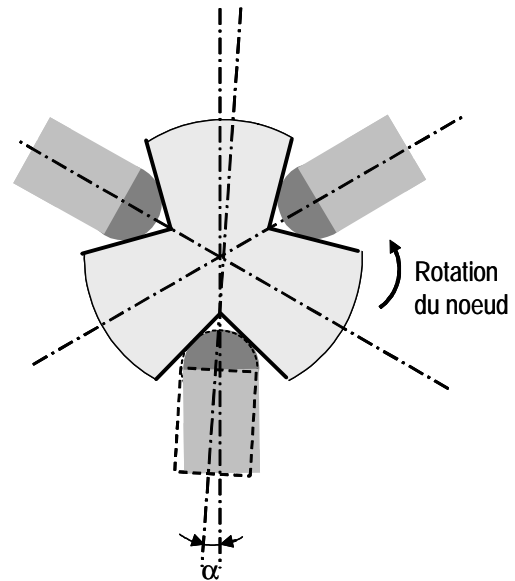


Figure 3.26: Schéma du noeud central N°2.  
Remarquez que les barres ne convergent pas toujours et impliquent la rotation du noeud

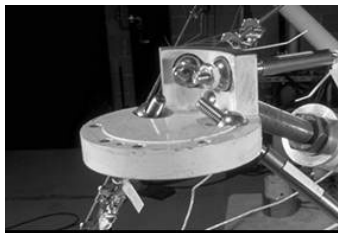
### 3.2.2.3 Assemblage modulaire

L'assemblage modulaire, divisé en deux éléments, permet l'imbrication aisée des modules, les uns dans les autres. Par sa modularité, cet assemblage est essentiel dans la construction de la tensegrité ; car il est en interaction avec tous les types d'éléments de la structure. Ces pièces en acier ont été conçues pour faciliter le montage. En effet, les modules doivent pouvoir être montés indépendamment et reliés les uns aux autres dans une étape ultérieure. C'est par ces pièces modulables que les liaisons sont assurées (Figure 3.27c). Ces pièces ont été conçues en trois morceaux :

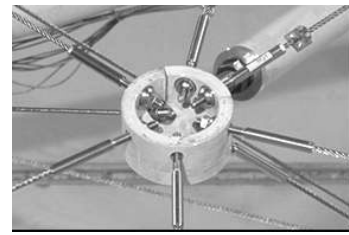
- « l'arc262 » est un arc de cercle d'angle d'ouverture de 262 °. Quatre logements sont fraisés pour accueillir les billes aux extrémités de triangles formant un triangle équilatéral et deux segments de triangles isocèles distincts (Figure 3.27a) ;
- « l'arc94 » est un arc de cercle d'angle d'ouverture de 94°. Deux logements sont fraisés pour accueillir des billes aux extrémités des deux câbles formant un des triangles isocèles (Figure 3.27b) ;
- « le fond » est un disque dans lequel sont fraisés deux logements pouvant accueillir les billes aux extrémités des câbles latéraux (Figure 3.27b et c). Celui-ci est fixé à l'arc94°.



a) Arc 262°



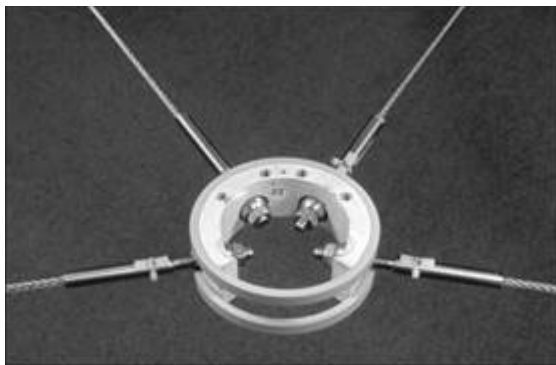
b) Fond + arc 94°



c) Assemblage complet

Figure 3.27: Assemblage modulaire décomposé (1999)

Suite à la campagne d'essais sur 3M, ces assemblages ont été rendus plus rigides afin d'éviter de modéliser les non-linéarités de leur déformation. Dès lors « l'arc262 » est confiné dans deux cerceaux métalliques afin de limiter l'ouverture de l'arc sous l'action des tirants (Figure 3.28a). L'assemblage complet reçoit également un cerceau jouant le même rôle (Figure 3.28b).



a) Anneau renforcé



b) Assemblage complet renforcé

Figure 3.28: Evolution de l'assemblage modulaire (2002)

### 3.2.3 Appuis

Pour éviter le mouvement d'ensemble de la structure, trois types d'appui limitant les translations des noeuds ont été bloqués. L'hypothèse que les rotules locales à l'extrémité de chaque élément convergeant aux assemblages modulaires agissent comme une rotule globale, est faite.

### 3.2.3.1 Appui fixe

L'appui fixe (Figure 3.29) bloque les translations du nœud dans les trois directions de l'espace. Il laisse libre néanmoins les rotations locales à l'extrémité de la barre et des câbles. L'assemblage modulaire complet est posé sur un cylindre en aluminium rigidement lié aux plots en béton. La surface du cylindre le recevant porte un épaulement cylindrique centré afin qu'il n'y ait pas de translation entre les 2 pièces dans le plan. La translation dans la direction verticale, est bloquée par une traverse rigidement liée aux plots et s'appuyant sur le centre du « fond » de l'assemblage.

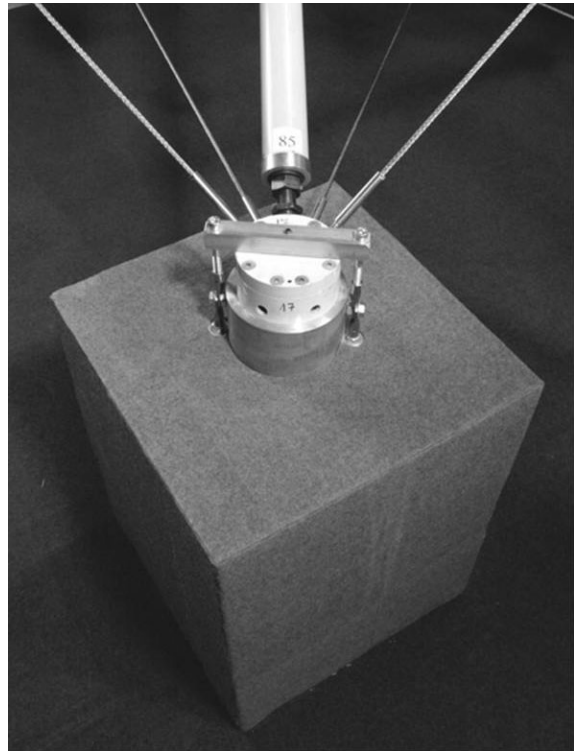


Figure 3.29: Appui fixe

### 3.2.3.2 Appui unidirectionnel

Cet appui (Figure 3.30) limite la translation du nœud à une direction dans le plan horizontal. L'appui est composé de 2 plateaux et de billes. L'assemblage modulaire est solidaire du plateau supérieur. Le plateau inférieur est solidaire des plots en béton. Des billes à l'interface de deux rainures parallèles usinées sur les surfaces des deux plateaux placés en vis à vis, autorisent la translation dans le sens des rainures. La course d'un plateau par rapport à l'autre a été limitée à 12 cm. La translation dans la direction verticale est bloquée par deux équerres, rigidement liées aux plots, recouvertes de téflon en contact avec le plateau supérieur.

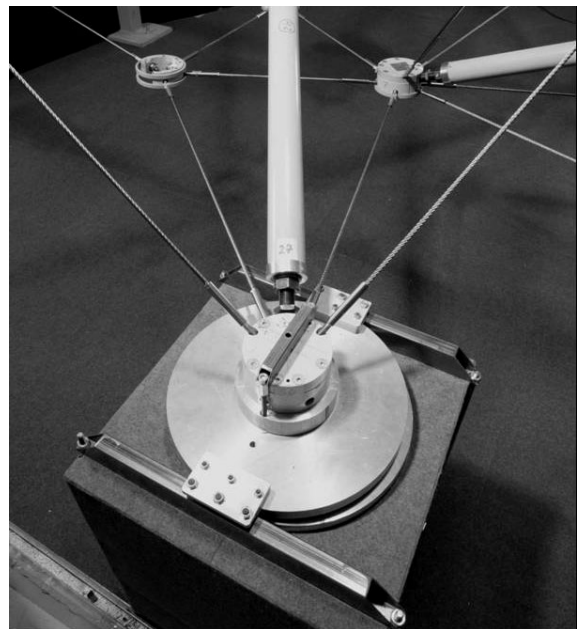


Figure 3.30: Appui unidirectionnel



### 3.2.3.3 Appui bidirectionnel

Cet appui (Figure 3.31) limite la translation du noeud au plan horizontal. L'appui composé de 2 plateaux et de billes. L'assemblage modulaire est solidaire du plateau supérieur. Le plateau inférieur est solidaire des plots en béton. Des billes à l'interface de trois logements usinés sur les surfaces des deux plateaux placés en vis à vis, autorisent les translations dans le plan horizontal. La translation dans la direction verticale est bloquée par deux équerres, rigidement liées aux plots, recouvertes de téflon en contact avec le plateau supérieur.

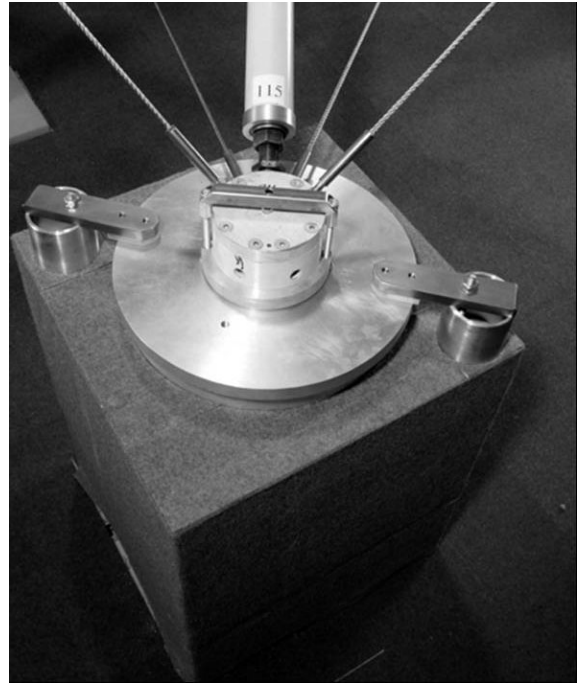


Figure 3.31: Appui bidirectionnel

### 3.2.4 Systèmes de sécurité

Des systèmes de sécurité retenant les barres étaient mis en place pour la structure 3M. Ces systèmes étaient déployés afin de prévoir une éventuelle rotation du noeud central et ainsi d'éviter que les tubes ne s'endommagent en percutant une arrête vive d'un assemblage modulaire. 5M est équipée du cylindre autour de la sphère, utile au montage d'un module.

## 3.3 Protocole de montage des structures

Construire une structure tensegrité avec le module de base décrit précédemment consiste à monter chaque module séparément, et à les connecter entre eux pour obtenir la configuration voulue. Une précontrainte est introduite en modifiant la longueur des barres télescopiques. La géométrie à autocontrainte nulle c'est-à-dire sans précontrainte pour une longueur de barre de 1296 mm, définit la géométrie d'un module. Cette longueur correspond à la distance entre le coeur du noeud central et le centre de l'assemblage modulaire. L'ajustement de la longueur des barres à 1298 mm introduit suffisamment de précontrainte dans un module pour le rendre rigide et transportable. L'allongement 2 mm introduit des efforts uniformes dans les barres d'environ 3000 N.

L'assemblage d'un module peut être périlleux; il importe de suivre un processus rigoureux compte tenu que la stabilité intermédiaire, avant d'avoir introduit de la précontrainte dans le module n'est pas assurée. Lors du montage, deux règles ont été suivies :

- garantir l'horizontalité de la face supérieure du nœud (nécessaire pour la stabilité);
- garantir l'uniformité des longueurs des barres.

### 3.3.1 Systèmes de mesure de la tension des câbles

Le montage d'un module étant basé sur un protocole géométrique, des imperfections sur les dimensions des composants et la tolérance de montage peuvent créer une géométrie non optimale et des conditions de précontrainte non uniformes et inconnues. Une vérification de la tension des câbles s'avère alors inévitable et indispensable. Les systèmes classiques de mesure déployés pour mesurer les déformations, tels que les jauges de contrainte et jauges oméga, ne sont pas adaptés car leur mesure est une donnée relative à un état initial. De plus, ils ne sont pas pratiques car ils nécessitent un temps de déploiement et un câblage électrique conséquent. Trois systèmes de mesure absolue, dont deux vibratoires et un statique ont été testés :

- les deux méthodes vibratoires consistent à mesurer les fréquences de vibration du câble et par la relation tension-fréquence de la corde vibrante, déterminer la tension dans le câble. La technique de mesure de la fréquence la plus courante est d'analyser le signal transmis par un accéléromètre. L'installation et désinstallation de l'accéléromètre et son câblage sont les gros inconvénients de la technique. Une technique laser, déterminant la vitesse d'un point cible grâce à l'effet Doppler, permet de mesurer la fréquence sans avoir à équiper le câble de liaison électrique. Cette technique, dont les résultats de mesure de la tension dans les haubans des ponts haubanés [19, 29], est un succès, a été adaptée aux câbles de la structure. L'appareil utilisé pour faire cette mesure de vitesse est un vibromètre.
- la méthode statique consiste à provoquer une déformation transversale du câble et de mesurer la force nécessaire pour l'appliquer à l'aide d'un ressort. L'appareil, Tension Gauge® [81], est couramment utilisé pour mesurer la tension des haubans sur les bateaux à voile. Le même principe est utilisé pour mesurer la tension des câbles de précontrainte dans certains ponts endommagés [24].



Figure 3.32: Tension Gauge® mis en place sur un câble

La rapidité de la prise de la mesure et de l'exploitation des résultats a été comparée pour les différentes techniques sur 3M. Le Tension Gauge® est ressorti comme le plus pratique et le plus rapide pour mesurer la tension des quatre-vingt dix câbles dans le laboratoire. Dans le contexte d'une structure réelle placée, la technique laser semble la plus adaptée de part sa capacité de mesure à distance.

Les résultats des trois techniques de mesure ont été comparés entre eux et aux mesures de déformation et de force par jauge de contrainte et capteur de force par des essais de traction sur une presse. La plage d'utilisation du Tension Gauge® a été ainsi étalonnée pour les trois longueurs de câble.

### **3.3.2 Structure composée de 3 modules**

Dans l'optique d'une structure modulaire, chaque module est assemblé séparément et lié dans l'étape finale du montage.

#### **3.3.2.1 Mise en place du système**

Le squelette souple de la structure est construit dans la première étape (Figure 3.33a). Il est formé par la couche inférieure et supérieure et les câbles latéraux. La longueur de ces câbles est réglée avec une précision de +/- 0.5 mm en condition de laboratoire. Les barres sont ajustées uniformément à une longueur inférieure à 1296 mm, soit la longueur minimale définissant la forme.

La deuxième étape consiste à construire un tétraèdre ayant, pour sommet le nœud central, pour arêtes latérales les 3 barres inférieures et pour base les câbles de la couche inférieure. Cet assemblage est rigidifié en suspendant un poids au nœud central, tendant ainsi la couche inférieure et comprimant les barres (Figure 3.33b). Puis, les barres du plan supérieur sont placées dans leurs logements respectifs du nœud central et de la couche supérieure de câbles. A ce stade, malgré la forme indéterminée de la structure, le poids propre des éléments et des assemblages ainsi que les frottements dans ces assemblages apportent une pseudo stabilité au système. La rigidité est introduite en allongeant les barres itérativement et symétriquement. L'ordre de la séquence est important compte tenu qu'une asymétrie de longueur déséquilibrerait le nœud central et conduirait à l'effondrement de la structure tel un château de cartes. Les câbles du triangle équilatéral et des triangles isocèles inférieurs sont tendus avant ceux du plan supérieur ; car ceux-ci sont stabilisés par le poids suspendu au nœud central. Après quelques tours de boulon sur la tige filetée (incrément de 1.5 mm), la géométrie d'équilibre à autocontrainte nulle est dépassée (Figure 3.33c). Le poids suspendu au nœud est ensuite retiré. Avant l'introduction d'une précontrainte uniforme de 2 mm rigidifiant la structure (Figure 3.33d), les longueurs des câbles sont vérifiées. Cette étape permet de

faciliter le montage-démontage des câbles lors de la connexion entre modules. Certains câbles du triangle équilatéral peuvent être détendus. Cette imprécision est notamment due aux imperfections dans la détermination des longueurs des câbles ou des barres, se répercutant sur la variation de tension dans des câbles de longueurs différentes. Une variation de 1 mm sur un câble du triangle équilatéral induira une contrainte environ 2.5 fois plus importante que la même variation dans un câble latéral. Tenant compte des imperfections de fabrication des composants, un maximum de précision est crucial, car la mise en tension ne repose que sur des considérations géométriques. Dans l'optique d'un montage aisé des modules, il est impératif d'assurer l'uniformité de la géométrie des modules. Une étude de sensibilité mesurant l'influence de faibles variations de longueurs sur l'état global de la structure pourrait quantifier ce problème. D'autant plus que dans un cas pratique, une variabilité dans les éléments fabriqués, due aux tolérances, est inévitable.

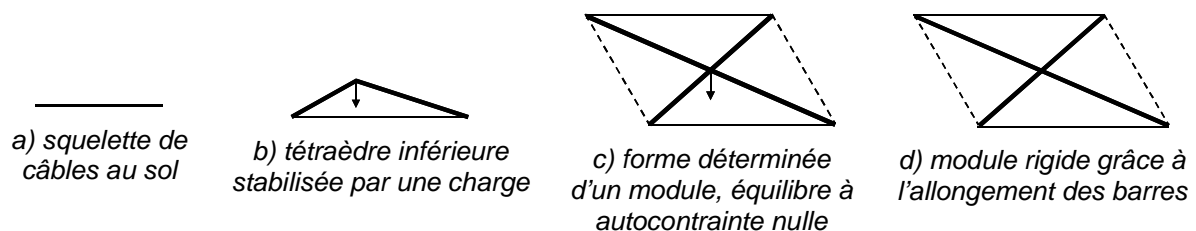


Figure 3.33: Schéma du montage d'un module

Les modules, montés indépendamment et géométriquement uniformes, sont itérativement connectés grâce aux assemblages modulaires pour arriver à la configuration finale désirée. Ils sont positionnés en les soulevant par le nœud central. Les liaisons sont effectuées au niveau de la couche supérieure et inférieure des câbles par la réunion de l'arc $262^\circ$  avec le couple fond-arc $94^\circ$ . Ceci demande le montage-démontage de deux câbles latéraux. Cette intervention n'affecte pas la stabilité du module provisoirement amputé. Les modules étant enfin liés entre eux, la structure est placée sur ses appuis en la soulevant par les nœuds centraux. Il est important de vérifier numériquement la stabilité de la structure avant de procéder à toute manutention.

Il faut attacher une attention particulière à la prétension des câbles et bien vérifier leur variation de longueur avant de les utiliser. Cette prétension permet aux torons d'assurer un comportement linéaire du câble lors de leur mise en place, et de vérifier que le sertissage du câble soit robuste afin d'éviter un allongement intempestif du câble ou même la rupture de ce dernier pendant son utilisation.

### 3.3.2.2 Rectification des tensions du système

Après l'assemblage des modules, les imprécisions des longueurs des câbles et des tolérances dans la fabrication des assemblages peuvent affecter leur tension. De plus, des câbles peuvent

perdre leur tension car le système d'appuis a changé. L'ajustement de la tension des câbles, en intervenant sur leur longueur est effectué en plusieurs étapes afin d'atteindre au minimum une correspondance de 80% avec les prédictions. Ce processus itératif débute par une vérification globale des tensions. La longueur des câbles trop tendus est d'abord ajustée et puis celle des câbles les moins tendus. Les câbles les plus tendus sont ceux formant les triangles isocèles. La tension des câbles latéraux représente environ 80% de celle du triangle isocèle et environ 20% de celle du triangle équilatéral.

### 3.3.3 Structure composée de 5 modules

Dans l'optique d'une structure modulaire, chaque module est assemblé séparément et lié aux autres dans l'étape finale du montage. Dorénavant, le module est monté avec le noeud N°3 (Figure 3.34). La sphère est bloquée dans le cylindre de sécurité par deux vis positionnant et comprimant la bille dans celui. Les extrémités des six barres sont contenues dans le cylindre dont le mouvement est limité par la fente usinée dans le cylindre (3.25).

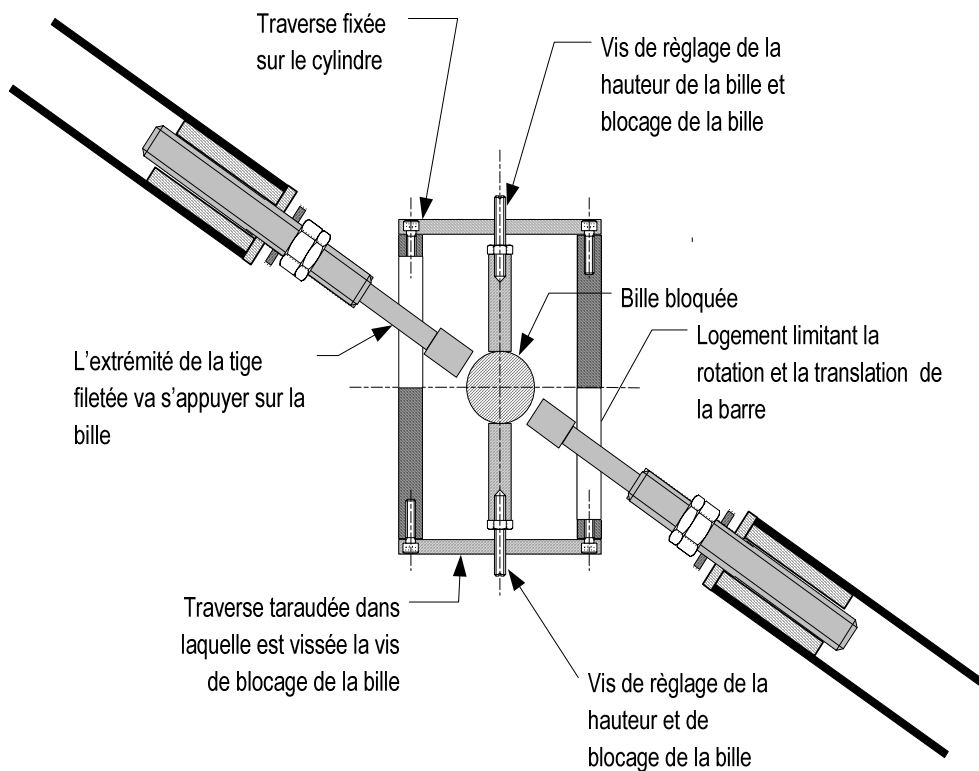


Figure 3.34: Noeud destiné au montage d'un module

#### 3.3.3.1 Mise en place du système

La première étape consistant à construire le squelette de câbles est la même que pour le montage de 3M. (Figure 3.33a). La deuxième étape consiste à construire le noeud central et

ses six barres. Puis le tétraèdre, ayant pour sommet la sphère bloquée dans le cylindre, est monté. Cet assemblage n'a pas besoin d'être rigidifié par une masse. Puis, les barres du plan supérieur sont placées dans leurs logements respectifs des assemblages modulaires et de la couche supérieure de câbles. A ce stade, malgré la forme indéterminée de la structure, le poids propre des éléments et des assemblages ainsi que les frottements dans ces assemblages apportent une réelle stabilité, sans rigidité, au système. La rigidité est introduite en allongeant les barres itérativement. La symétrie n'est plus à respecter. L'ordre de la séquence n'est pas importante car les barres convergent toujours au centre de la sphère (Figure 3.25).

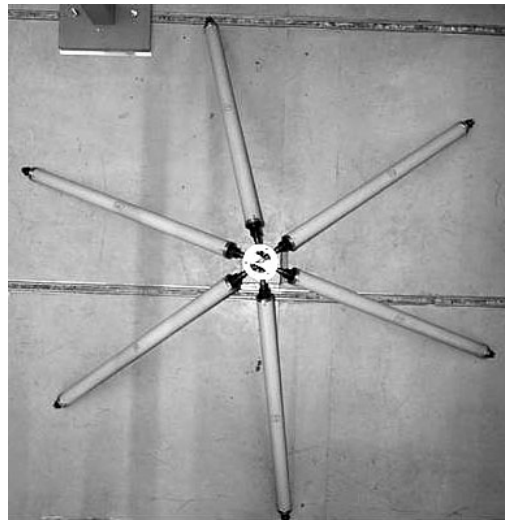


Figure 3.35: Le nœud N°3 et ses six barres

Les câbles du triangle équilatéral et des triangles isocèles inférieurs sont tendus avant ceux du plan supérieur. Après quelques tours de boulon sur la tige filetée (incrément de 1.5 mm), la géométrie d'équilibre à autocontrainte nulle est dépassée (Figure 3.33 d) et la bille est débloquée. Le cylindre de sécurité peut être retiré (Figure 3.23). La liaison entre modules est effectuée de la même façon que pour 3M.

Le montage avec le nœud N°3 est simplifié et beaucoup plus rapide, compte tenu qu'il n'y a à aucun moment d'instabilité. Le montage pourrait être encore plus rapide, car seules deux barres télescopiques sont nécessaires pour monter un module. Ce qui permettrait de faire des économies dans une construction à plus grande échelle.

### 3.3.3.2 Rectification des tensions du système

Après l'assemblage des modules, les imprécisions des longueurs des câbles et les tolérances de construction des nœuds, peuvent affecter leur tension. De plus, des câbles peuvent perdre leur tension car le système d'appuis a changé. L'ajustement de la tension des câbles, en intervenant sur leur longueur, est effectuée en plusieurs étapes afin atteindre au minimum une

correspondance de 80% avec le modèle analytique. L'intervention s'effectue sur une extrémité du câble (Figure 3.16), l'autre n'étant pas télescopique.

La disposition asymétrique des appuis implique une non uniformité des efforts dans les éléments de même nature (câbles de même longueur et barres) dans la structure et ceci contrairement celles de 3M.

### **3.4 Système de contrôle actif**

Le but du système de contrôle actif (Figure 3.37) est de compenser les déformations de la structure soumise à une perturbation en modifiant la longueur des barres en mode quasi-statique. Les éléments principaux sont les actionneurs et capteurs. Ils sont intégrés dans un système composé de nombreux éléments périphériques communiquant entre eux dans la hiérarchie descendante illustrée dans la figure 3.36.

Dès que le dispositif est alimenté en courant, le signal des capteurs de déplacement (senseurs) est analysé par des amplificateurs, appelé PME. Les moteurs électriques reçoivent une tension et fréquence des variateurs de fréquence, ces signaux permettent au moteur de tourner. La rotation du moteur est transformée en mouvement linéaire du piston du vérin par un réducteur. L'activation du moteur est signalée par une lampe témoin. Les éléments de contrôle des actionneurs et des senseurs sont placés dans le panneau de commande. Ils délivrent régulièrement leur information sur le bus série de terrain CAN permettant le multiplexage entre ces appareils. Le maître sur le bus est le PC, via sa carte d'interface CAN. Le PC est l'organe qui s'occupe de l'acquisition des données et qui distribue les commandes de contrôle ou consignes sur le bus. La commande peut être désactivée par des interrupteurs, dont l'état est signalé par des diodes lumineuses placées sur le panneau de commande (Figure 3.37) à la portée de main de l'utilisateur. Des dispositifs externes de sécurité, qui agissent comme des interrupteurs sur la commande, sont dispersés sur la structure.

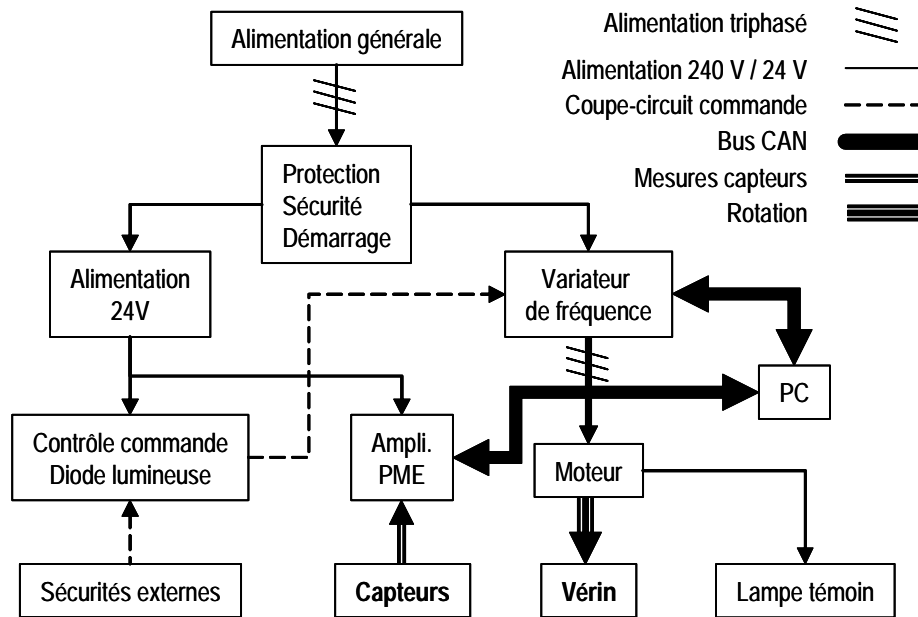


Figure 3.36: Schéma du dispositif de la structure active



Figure 3.37: Vue globale de la structure et de son système de contrôle actif et de son créateur

### 3.4.1 Position des éléments constitutifs

Dix vérins électriques sont partagés équitablement entre les cinq modules (Figure 3.38). Deux barres sur six par modules sont actives. Les vérins sont placés symétriquement sur chaque



module. La disposition des vérins est en ligne. Cette disposition a été choisie à l'issue d'une étude effectuée sur 3M [125 et Chapitre 4]. Chaque vérin est équipé d'un capteur de déplacement (Tableau 3.3). Trois capteurs de déplacement sont disposés sur la structure pour évaluer la pente (Figure 3.38).

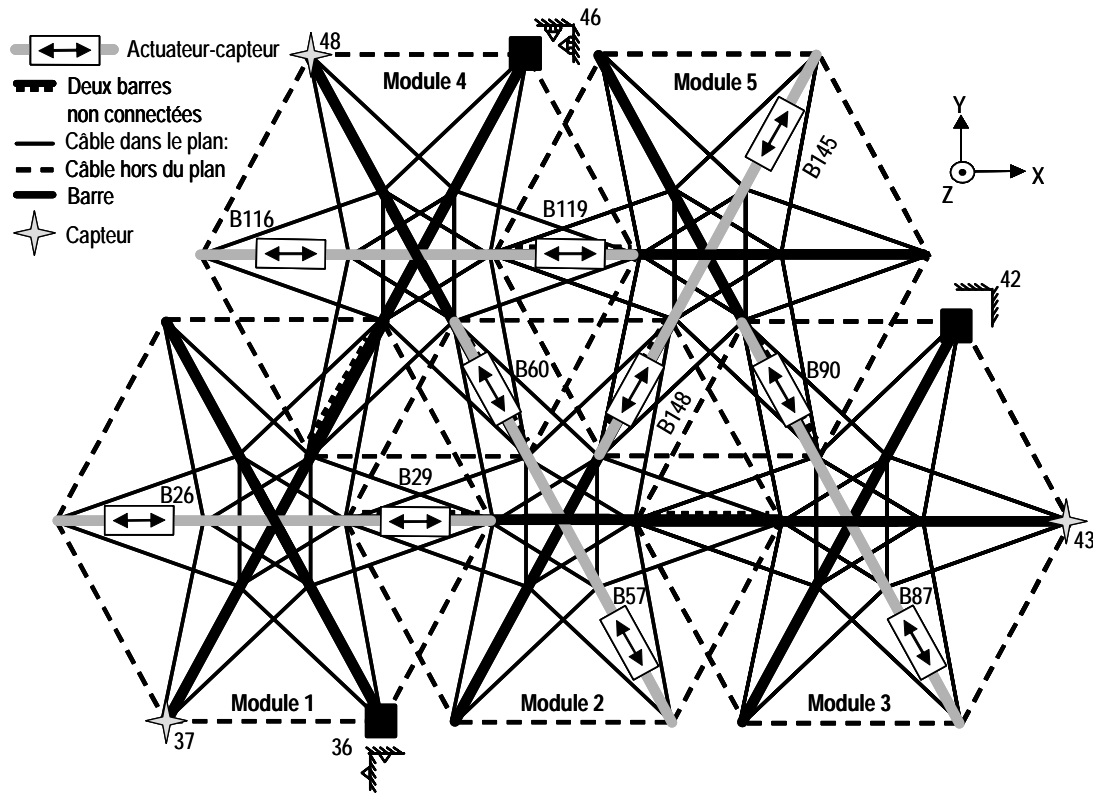


Figure 3.38: Vue en plan mettant en évidence la position des vérins

	Module 1		Module 2		Module 3		Module 4		Module 5	
	supérieur	inférieur	supérieur	inférieur	supérieur	inférieur	supérieur	inférieur	supérieur	inférieur
<b>Actuateur</b>	B26	B29	B57	B60	B87	B90	B116	B119	B145	B148
<b>Capteur</b>	B26	B29	B57	B60	B87	B90	B116	B119	B145	B148
	37				43		48			

Tableau 3.3: Position des actuateurs et des capteurs sur la structure 5M

### 3.4.1.1 Actuateur

Différents types d'actuateur et de fournisseurs sont présents sur le marché. Ils devaient répondre au cahier des charges suivant :

- force de poussée de 20 kN à la vitesse de 1 mm/s ;
- course minimale de +/- 25 mm ;
- précision de la position à 0.1 mm ;

- possibilité de déplacer le piston à la main ;
- position fixe à l'arrêt avec ou sans alimentation ;
- poids minimal ;
- encombrement longitudinal minimal ;
- possibilité de venir greffer aux extrémités une tige de diamètre 24 mm;
- possibilité de pilotage par un système informatique ;
- délai de livraison.

### 3.4.1.1.1 Choix de l'actuateur

Quatre technologies de vérins ont été analysées pour le choix du vérin. Les avantages et inconvénients pour chacune d'entre elles sont énoncés ci-dessous. Il ressort que la solution la plus adaptée à l'installation et au mode de fonctionnement est le vérin électromécanique. Son coût est faible par rapport aux autres technologies et sa maintenance limitée. Par contre, son principal désavantage est qu'il est constitué d'éléments provenant de fournisseurs différents.

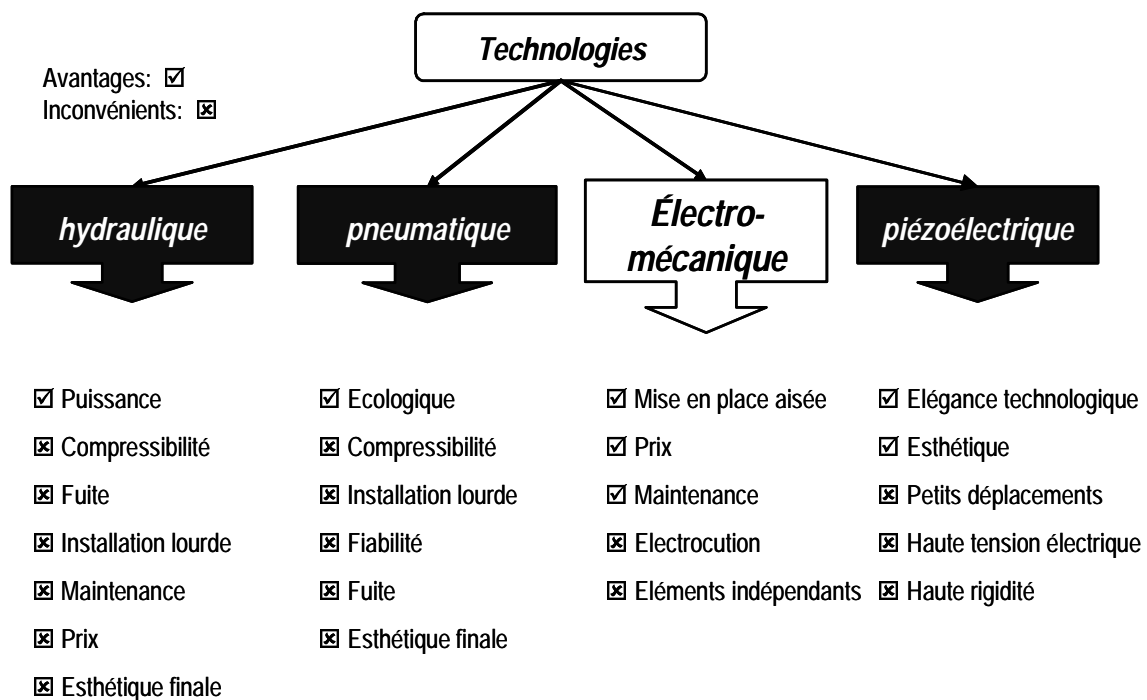


Figure 3.39: Avantages et inconvénients des technologies pour l'application

Il faut noter que le prix, le délai de livraison et la motivation du fournisseur ont joué un rôle déterminant dans le choix du fournisseur des vérins électromécanique.

L'actuateur est décomposé en trois parties :

- vérin ;
- moteur ;
- variateur de fréquence.

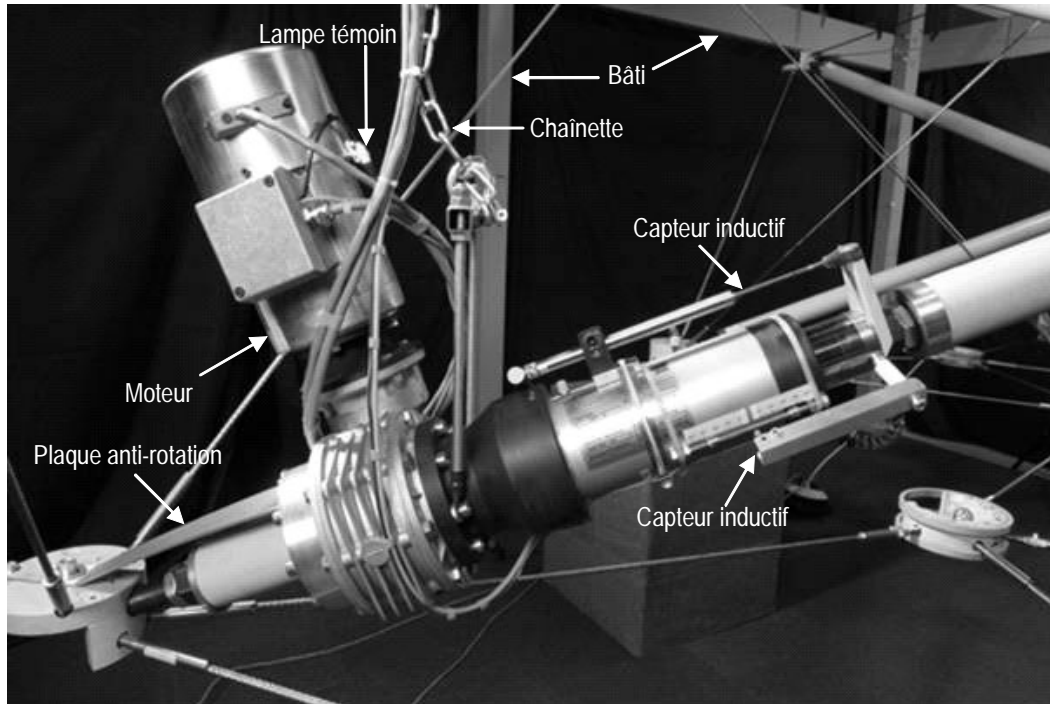


Figure 3.40: Vue en élévation d'un actuateur implanté dans une barre. Notez le capteur inductif, le microrupteur de sécurité, la lampe témoin et la fixation de sécurité

Le variateur de fréquence (Figure 3.41) alimente le moteur électrique monté sur le vérin. Le moteur électrique entraîne par l'intermédiaire d'un réducteur à renvoi d'angle situé dans le carter une vis trapézoïdale de manœuvre. Celle-ci par son mouvement rotatif déplace un écrou de manœuvre solidaire de la tige de piston, elle-même reliée à la charge par l'attelage avant (bout du piston). La démultiplication du réducteur joue le rôle de frein quand le moteur ne fonctionne pas. Le moteur est placé perpendiculairement au vérin (Figure 3.40). L'avantage d'une telle disposition est un gain d'encombrement longitudinal sur la barre à équiper. Les variateurs de fréquence sont logés dans un tableau qui regroupe les différents appareils de communication et de contrôle (Figure 3.46). Un module de communication CANopen est connecté sur le flanc du variateur. Il permet de transférer et recevoir les informations du bus de communication. Les caractéristiques techniques de chaque élément sont répertoriées dans le tableau 3.4.



Figure 3.41: Variateur de fréquence et module de communication pour le bus, CDA 32.008

Variateur de fréquence				
Désignation	Puissance (W)	Courant nominal (A)	Fréquence (Hz)	Alimentation (V)
Lust-tec CDA 32.008C	1500	7.1	50	240 Alternatif

Moteur asynchrone							
Désignation	Puissance (W)	Courant nominal (A)	Fréquence (Hz)	Alimentation (V)	Cos(phi) nominal	Vitesse nominale (t/min)	Masse (kg)
Zürer VF H65/4	330	1.9/1.1	50	400 triphasé	0.74	1400	8

Vérin à transmission perpendiculaire à vis trapézoïdale						
Désignation	Course (mm)	Course utile (mm)	Poussée à 4mm/s (kN)	Charge statique (kN)	Démultiplication :1 tour correspond à (mm)	Masse (kg)
ADE MST 30	80	50	20	40	0.1	30

Tableau 3.4: Caractéristiques principales des éléments constituant l'actuateur

### 3.4.1.2 Contrôle en mode quasi-statique

Le choix du contrôle en quasi-statique évite la considération de la dynamique de la structure et du moteur. Chaque vérin est actionné de façon séquentielle, c'est-à-dire que dès qu'un vérin a atteint sa consigne, un autre est actionné et ainsi de suite pour atteindre l'état final ou consigne globale. Pour l'application, un moteur asynchrone offrant un couple important même pour une vitesse de rotation faible est bien adapté. Le contrôle du moteur est effectué en mode VFC (Voltage Frequency Control). Dans ce cas, la tension du moteur varie proportionnellement à la fréquence imposée par le variateur de fréquence. Le temps nécessaire pour atteindre la consigne n'était pas un paramètre considéré. Néanmoins, une vitesse minimale est imposée, compte tenu que le moteur chauffe moins quand il tourne vite.

Les paramètres de contrôle et démarrage du moteur sont configurés dans le variateur de fréquence à l'aide d'un logiciel fourni par le fabricant (Tableau 3.5).

Variateur de fréquence - Moteur asynchrone						
Tension de démarrage (V)	Courant de démarrage (A)	Courant de fonctionnement (A)	Tension à l'arrêt	Accélération Décélération (m/s <sup>2</sup> )	Vitesse de rotation (Hz)	Mode de régulation
40	4.5	3.5	0	500	+/- 8	VFC

Tableau 3.5: Paramètres principaux de fonctionnement du moteur

### 3.4.1.3 Capteur de déplacement et de rotation



Figure 3.42: Face avant de l'amplificateur de mesure d'un capteur inductif, MPE-MP55

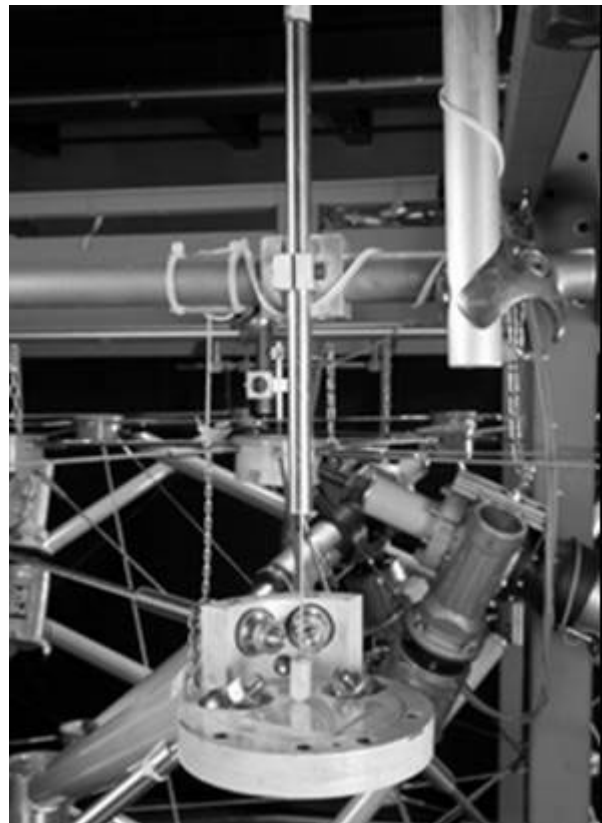


Figure 3.43: Capteur LVDT, mesurant le déplacement d'un nœud

Les capteurs de déplacement (Figure 3.43) sont des capteurs de type inductif. Leur signal est analysé par un amplificateur de mesure à fréquence porteuse, MP55. Cet appareil est aussi l'interface permettant de communiquer le déplacement du capteur sur le bus. Chaque capteur est associé à un module PME-MP55. Ces derniers sont logés dans le panneau de commande avec les autres appareils de contrôle et de communication (Figure 3.46). La configuration des appareils est réalisée en adaptant les switches dans le boîtier du module par la manipulation

du clavier sur la face avant de l'appareil (Figure 3.42) et par un logiciel de configuration (PME Set –up 32 bit). Les caractéristiques du capteur et de l'amplificateur sont répertoriées au tableau 3.6.

Amplificateur à fréquence porteuse		
Désignation	Fréquence porteuse (kHz)	Alimentation
HBM PME-MP55	4.8 +/- 1%	24 V courant continu
Capteur		
Désignation	Type	Précision (mm)
HBM	inductif	0.01

Tableau 3.6: Caractéristiques des capteurs inductif et de l'amplificateur à fréquence porteuse

Chaque actuateur est équipé d'un capteur inductif pour contrôler que le déplacement du piston corresponde à la consigne (Figure 3.44) La partie fixe du capteur est fixée parallèlement au corps du vérin. L'extrémité conique de la partie mobile du capteur, vient s'appuyer sur une bille collée à une plaquette de tôle solidaire de l'extrémité du piston. La bille et la tige sont tenues en contact et en compression grâce à un élastique (Figure 3.44). La rotule de Type II permet de compenser un léger défaut du parallélisme entre le piston et la partie mobile du capteur, qui pourrait être augmenté lors de l'allongement du vérin.

Les capteurs mesurant les déplacements verticaux sont fixés au bâti métallique. Ils mesurent les déplacements par le dessus du noeud (plus prudent en cas de ruine de la structure) (Figure 3.43). L'extrémité de la partie mobile de chaque capteur est équipée d'un cône en téflon et repose sur une plaquette en aluminium collée sur le noeud. Tandis que la structure se déforme aussi dans le plan horizontal, ce système permet de mesurer l'unique composante verticale des déplacements.

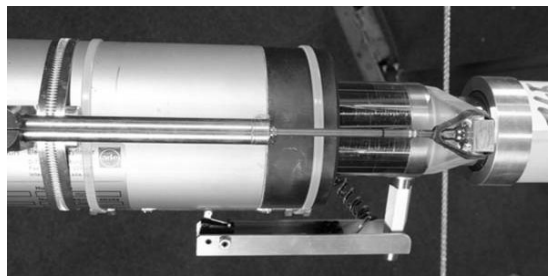
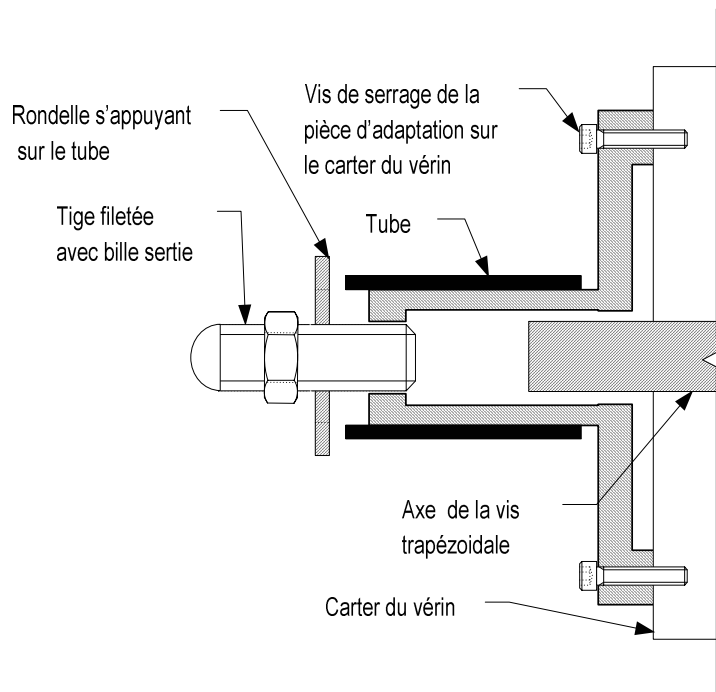


Figure 3.44: Détails de la fixation de la tige du capteur au piston du vérin

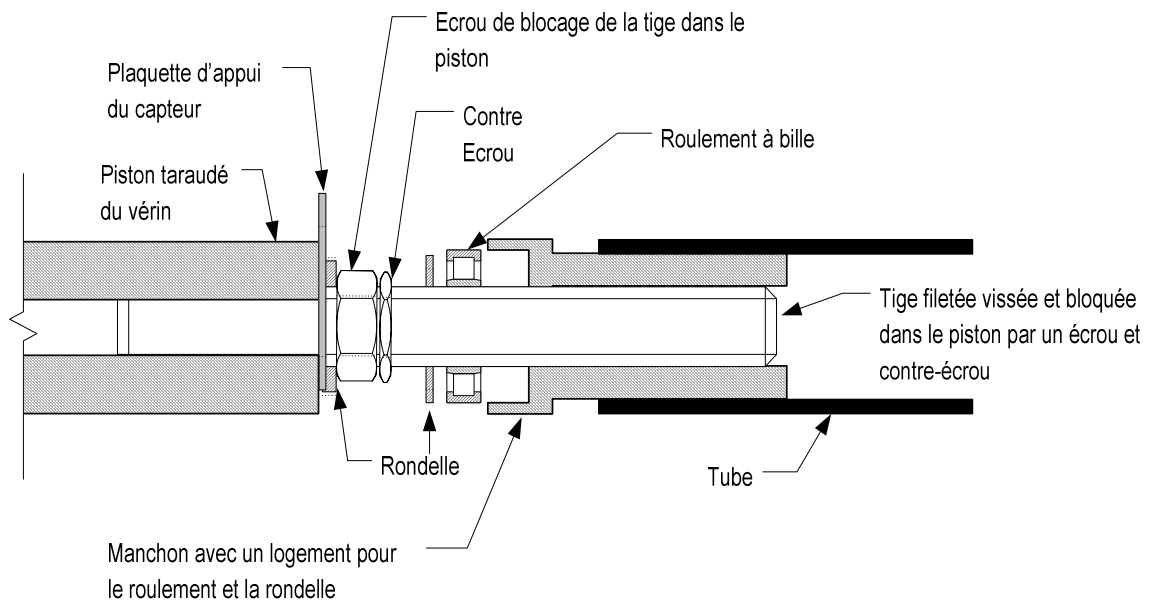
#### 3.4.1.4 Montage des éléments actifs

Les vérins électriques ont été montés sur la structure en substituant des barres (Figure 3.37). Le vérin n'occupe pas toute la longueur de la barre, il est intégré dans celle-ci (Figure 3.45). En effet, chaque extrémité du vérin est enfilée par l'intermédiaire d'un manchon dans un tube

en Fiberline. De cette façon, le vérin en action n'implique aucun effet parasite de torsion sur la barre.



a) extrémité du vérin du côté de l'assemblage modulaire



b) extrémité du vérin du côté de la barre joignant le noeud central

Figure 3.45: Vue en coupe longitudinale des extrémités du vérin permettant l'intégration dans la barre. Notons qu'à ces deux extrémités le vérin est simplement enfilé dans le tube en Fiberline

Une pièce d'adaptation du vérin, côté assemblage modulaire, sur le tube a du être fabriquée indépendamment compte tenu de la non-conformité de la marchandise livrée et le délai de remplacement.

Remarquons que l'excroissance de l'axe de la vis trapézoïdale du vérin a du être compensée (Figure 3.45). Notons que l'extrémité de la barre s'appuyant sur le noeud central n'a pas été modifiée. La technique de remplacement d'une barre passive par une barre active consiste à poser autour de la barre cible un gabarit, composé de deux tubes, s'appuyant sur la pièce modulaire et le noeud central. Puis la barre est raccourcie, les efforts de compression sont alors repris par le gabarit ; la barre qui n'est plus sollicitée peut alors être retirée. La barre active composée, du vérin et des deux parties de tube prend place dans le gabarit et est allongée par l'extraction du piston. Au fur et à mesure de son allongement, la barre active reprend les efforts de compression et soulage le gabarit. La longueur cible étant atteinte, le gabarit est retiré. Notons que la longueur du vérin a été réglée de sorte que le piston soit à la mi-distance de sa course.

Une fine plaque d'aluminium lie le vérin et l'assemblage modulaire pour les vérins des barres de la couche inférieure (Figure 3.40). Ces plaques ont été implantées pour éviter la rotation du vérin autour de son axe longitudinal lorsque la compression de la barre est faible. Compte tenu de l'implantation d'un roulement à bille (Figure 3.45b), la partie de la barre du coté du noeud central n'est pas soumise à la torsion. La charge excentrée du moteur a tendance à faire tourner la barre autour de son axe longitudinal à l'enclenchement du moteur et à venir alors s'appuyer contre un câble latéral. Au vu de son élancement, cette plaque introduit une rigidité négligeable en compression.

### **3.4.1.5 Tableau regroupant les appareils**

Les systèmes de démarrage et de sécurité, les alimentations 24 V, les variateurs de fréquence et l'amplificateur sont logés dans un panneau. Sur la face avant de celui-ci viennent sur se brancher les moteurs, les capteurs inductifs, les capteurs de température des moteurs et le PC.

Des interrupteurs sont disposés pour l'activation de la commande, dont l'état est signalé par une diode lumineuse. Un sélecteur est disposé pour choisir quel variateur de fréquence est actif sur le port parallèle du PC pour sa configuration par l'intermédiaire du logiciel fourni par le fabricant.



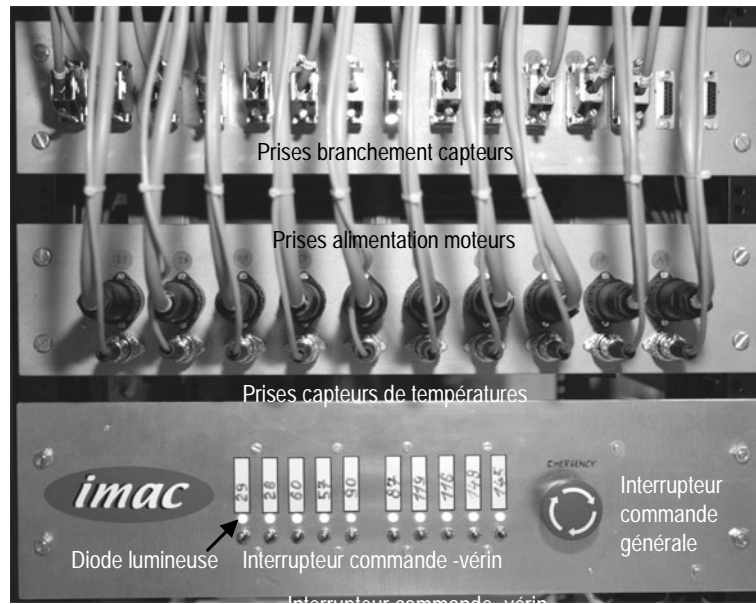


Figure 3.46: Face avant du panneau regroupant des appareils

## 3.4.2 Bus de communication

Le multiplexage entre les différents appareils électriques est réalisé par l'intermédiaire du bus de terrain CAN sous le protocole CANopen.

### 3.4.2.1 Le bus de terrain

Les bus de terrain permettent l'interconnexion entre plusieurs entités d'un même système. Cette communication se déroule sur une zone limitée et sur laquelle une réduction maximale de la longueur des liaisons entre les différents éléments grâce à un support commun de transmission est désirée. Cette réduction est liée à une volonté de sécurité -sur des automates d'usine par exemple-, ainsi qu'un gain de place sur un terrain comme une automobile pour les systèmes dit d'électronique embarquée. Dans les industries lourdes comme dans les moyens de transport ces réseaux sont à l'origine de l'amélioration constante de tous les systèmes.

De nos jours, les bus de terrain sont implantés dans tous les domaines de l'industrie : grâce à leur flexibilité d'extension et de raccordement de modules sur la même ligne tout d'abord, mais aussi en raison de l'assurance d'un transport fiable de données de n'importe quel élément informatisé vers un autre. L'utilisateur ne se soucie pas du chemin suivi par les informations, de la conversion des formats, du type de l'interlocuteur ou bien du type du constructeur d'un élément, les techniques de réseaux facilitent grandement l'insertion ou la suppression d'éléments au sein d'un même système. Le bus de terrain permet de transférer dans la plupart des cas les informations de manière séquentielle (c'est à dire bit par bit) ou

bien par paquet de bits. Il faut savoir que le bus de terrain permet un échange de données qui serait difficile voire impossible par un autre moyen.

### 3.4.2.2 Fonctionnement du bus CAN

A l'origine le CAN (Control Area Network) fut développé pour l'usage automobile par Bosch et Intel en 1993 [14]. Aujourd'hui, la plupart des constructeurs mettent au point des systèmes entièrement multiplexés utilisant la technologie CAN. La technologie CAN trouve sa place dans de nombreuses industries notamment grâce à ses qualités de fiabilité et d'architecture temps réel. Toute transmission des données à travers le bus est bornée grâce à un temps maximal normalisé. De plus, l'architecture CAN possède un système d'erreur simple et efficace qui permet de l'utiliser aussi bien à des fins médicales que dans le cadre de toute application mettant en jeu la sécurité des personnes. Les contrôleurs CAN sont physiquement petits, peu coûteux et entièrement intégrés. Ils sont utilisables à des débits importants, en temps réel et dans des environnements difficiles. Enfin, les transmissions ont un haut niveau de fiabilité. C'est pourquoi ils ont été utilisés dans d'autres industries que l'automobile et des applications utilisant le CAN sont aujourd'hui disponibles dans l'agriculture, la marine, le matériel médical, les machines textiles, etc....

Le concept de communication du bus série CAN est celui de la diffusion d'information : chaque station connectée au réseau écoute les trames (messages) transmises par les stations émettrices. Ensuite chaque appareil décide quoi faire du message, s'il doit y répondre ou non, s'il doit agir ou non. Ce concept peut être schématisé par celui de la radio diffusion d'informations routières : une fois l'état du trafic connu, un conducteur peut décider de changer son trajet, d'arrêter son véhicule, d'alerter un autre conducteur, ou de ne rien faire... Le protocole CAN autorise différents appareils à accéder simultanément au bus. C'est un procédé rapide et fiable d'arbitrage qui détermine l'appareil émettant en premier. L'accès au bus est donc aléatoire car un appareil peut émettre à n'importe quel moment. Mais cet accès se fait par priorité.

Des concepts de communication très divers ont été conçus et implémentés sur la base de la plateforme CAN. Ces concepts sont généralement classés d'après le modèle ISO-OSI [63]. D'après ce modèle, CAN définit sept différentes couches. La couche d'application est le support de nombreux concepts tels que CAL, CANopen, DeviceNet, SDS et CAN Kingdom. La normalisation est gérée par une organisation d'utilisateurs « Can in Automation » (CIA) [23].

CANopen est un protocole de communication imposant des mécanismes de communication standardisés [23]. A sa création, il était destiné à des systèmes industriels de contrôle de mouvement ou de manipulation, tandis qu'aujourd'hui il est utilisé dans de nombreuses

applications comme les véhicules, les transports publics, les équipements médicaux ou d'électronique maritime.

Les deux avantages du protocole sont :

- temps réel praticable, car un temps maximal entre l'émission et la réception des trames pour un processus quelconque peut être défini ;
- programmation orienté objet.

### 3.4.2.3 Paramètres du bus dans l'application

Vingt quatre appareils sont placés en série sur le bus. De fait, les paramètres de transmission des messages et vitesse de transfert doivent être réglés de telle sorte qu'il n'y ait pas une saturation ou un bouchon sur le bus. Considérant qu'un message transmis par un appareil compte 10 bytes et que la vitesse de transfert est de 500 kbit/s, le bus supporte un peu plus de 50 messages en 10 ms. Dès lors, imposant un facteur de sécurité de 2, chaque appareil transmet un message tous les 10 ms. Pour l'application, la longueur du bus n'est pas un paramètre limitant la vitesse de transfert.

Longueur du bus [m]	Vitesse de transfert [kbit/s]	Fréquence d'émission de message [Hz]	
		PME	Variateur
2	500	100	100

Tableau 3.7: Les paramètres de communication sur le bus

### 3.4.3 Programme LabVIEW®

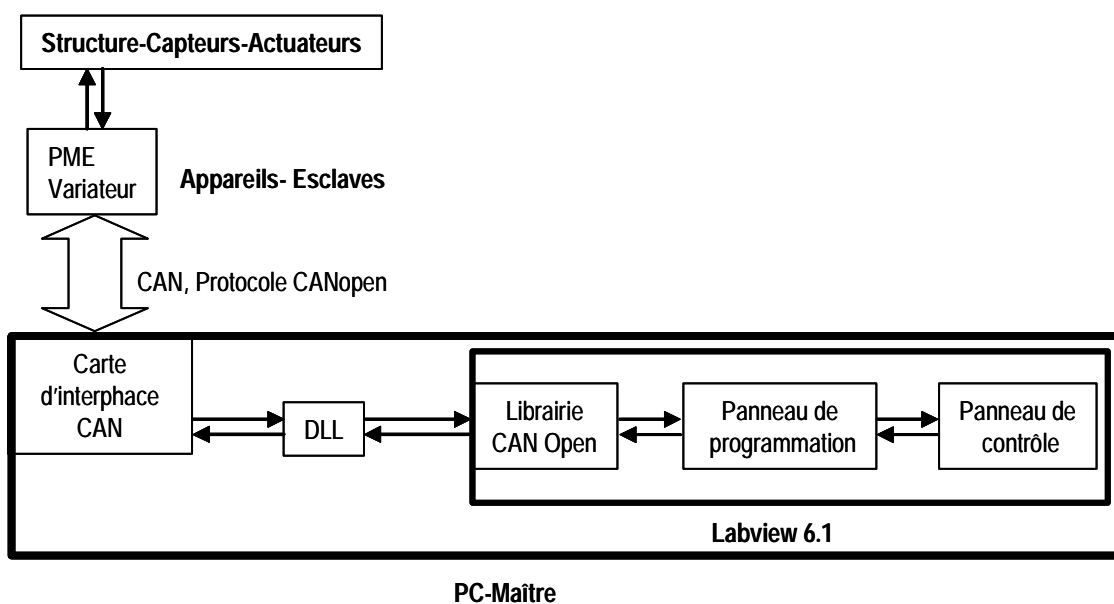


Figure 3.47: Schéma du transfert des informations

Le programme LabVIEW est constitué de deux parties :

- un panneau de programmation (Block Diagram), servant à la définition du programme (Figure 3.47);
- un panneau de contrôle (Front Panel) où l'utilisateur affiche les données qu'il veut suivre, contrôler ou enregistrer (Figure 3.48 et Figure 3.47).

Le contrôle ou l'observation d'un système est même possible, via Internet, à distance.

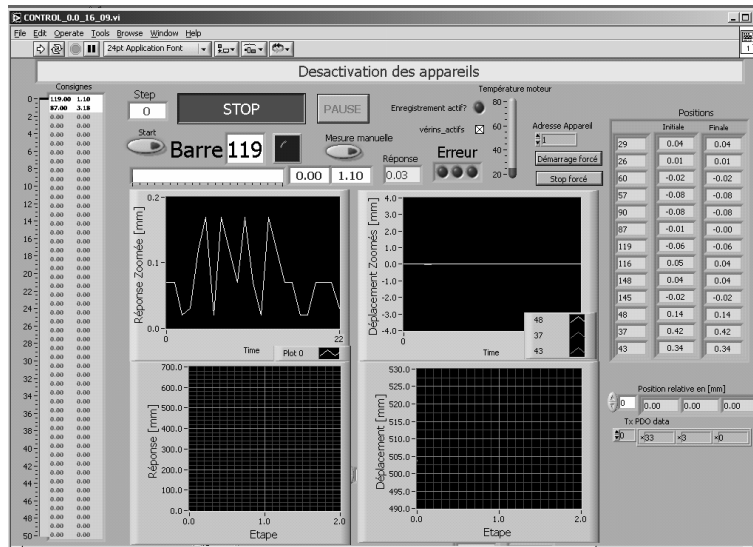


Figure 3.48: Panneau de contrôle développé sur LabVIEW

### 3.4.3.1 Structure et paramètres du programme

Le programme développé sur LabVIEW contrôle le système utilisant une DLL [20] pour communiquer sous le protocole CANopen avec tous les appareils esclaves sur le bus, via sa carte d'interface CAN, maître du bus (Figure 3.47). Les commandes de contrôle sont calculées par le logiciel TSACS (Tensegrity Structure Analysis and Optimisation Software) qui crée des fichiers de type texte. Ces fichiers textes sont analysés afin de déterminer la séquence compatible avec les caractéristiques des éléments constitutifs. Puis, la séquence est stockée dans un fichier texte lu par LabVIEW.

Désignation	Type	Précision [mm]	Microcontrôleur type
ESD CAN interface [38]	PCI-331	0.01	68331

Tableau 3.8: Caractéristiques de la carte d'interface CAN

Le PC est le maître sur le bus. La vitesse d'acquisition et d'interrogation du bus par le programme via sa carte d'interface est de 100 ms. Les caractéristiques de la carte sur illustrées

dans le tableau 3.8. Les données enregistrées sont les déplacements de la structure, la position des vérins, la température du moteur et la date.

### 3.4.4 Systèmes de sécurité et d'avertissement

Un système de contrôle peut être soumis à des perturbations modifiant les données sur le bus de communication. De plus, l'utilisateur peut par inadvertance faire une erreur dans les paramètres qu'il définit ou le programme de contrôle peut être « buggé ». La phase du développement du logiciel de contrôle est une période critique durant laquelle tous les paramètres ne sont pas maîtrisés. Dans ces cas, un moteur ou plusieurs pourraient aller au-delà de leur position de consigne et sursolliciter certains éléments. Des éléments extérieurs imprévus peuvent survenir et modifier le système physique (la structure) et le système de contrôle. De fait, l'implantation de sécurités et d'avertissements sur les deux systèmes est indispensable pour éviter la ruine du système physique et des appareils qui y sont rattachés.

Ces systèmes sont placés à trois niveaux :

*Niveau logiciel* : des bornes sur les allongements des vérins et les déplacements des points mesurés sont fixées. Dès que celles-ci sont atteintes, un message de mise à l'arrêt est envoyé aux appareils. Une limite supérieure de la température du moteur est aussi fixée. Dès que cette limite est atteinte, l'élément est mis au repos et le système est en attente jusqu'à ce qu'il soit refroidit pour qu'il puisse atteindre son objectif.

*Niveau de la commande* : la commande sur chaque variateur de fréquence est dépendante d'un contact entre deux bornes. Ce contact est contrôlé sur le tableau de commande par l'intermédiaire d'un interrupteur dont l'état est donné par une diode lumineuse. Ces interrupteurs sont placés en parallèles entre eux et en série avec un interrupteur d'urgence les commandant tous (bouton rouge « Emergency ») (Figure 3.46). Un microrupteur est placé sur le piston du vérin. Le piston peut ainsi se déplacer entre deux bornes dont les positions sont réglables (Figure 3.49). Dès que le microrupteur atteint la borne, il coupe le contact placé en série avec l'interrupteur d'urgence sur le circuit de commande. Le circuit est à nouveau fermé dès lors que le microrupteur se sépare de la borne. La position des bornes est réglée en fonction de l'allongement maximal autorisé pendant la recherche stochastique de la commande, cette valeur est rehaussée de 2 mm.

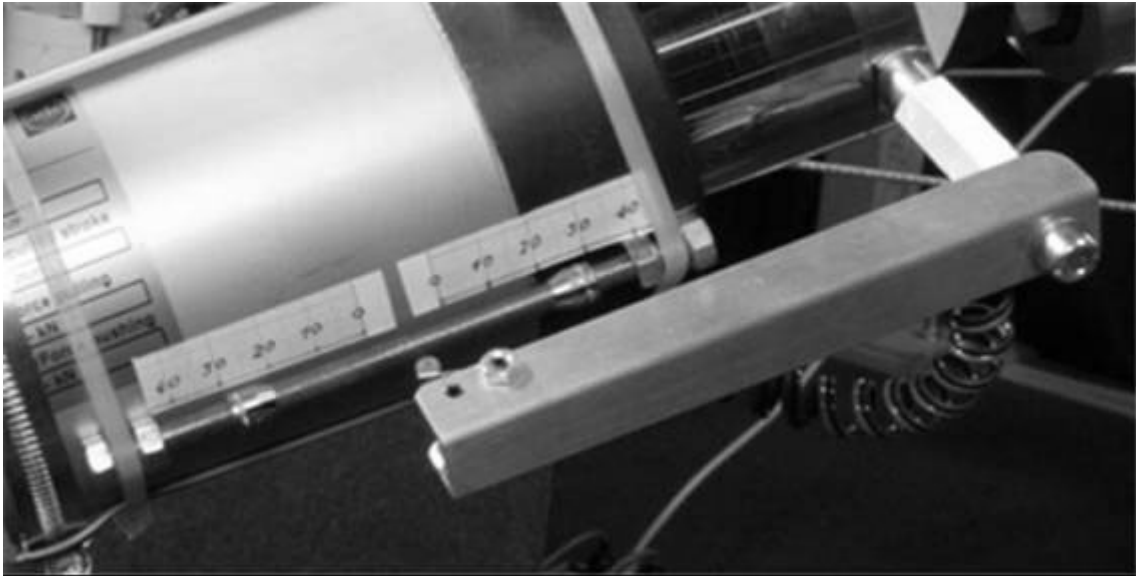


Figure 3.49: Microrupteur de commande de fin de course. Remarquons que la course avant et arrière peut être réglée. La course maximale du piston entre borne est de +/- 30 mm

Des rupteurs sont aussi placés au niveau des différentes couches de la structure afin de limiter des déplacements trop élevés pendant l'application d'une commande ou d'une charge. Dès que le déplacement maximal fixé est atteint, il coupe le contact placé en série avec l'interrupteur d'urgence sur le circuit de commande (Figure 3.36). Ce rupteur fonctionne comme la tirette d'une lampe, qui à partir d'une certaine force de traction déclenche. Dans ce cas, pour refermer le circuit principal, il ne suffit pas de décharger la structure, mais il faut réenclencher le rupteur.

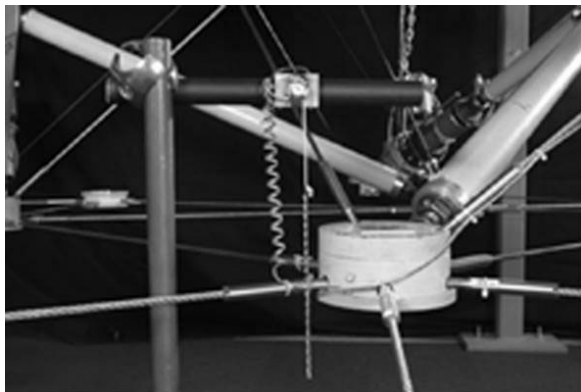


Figure 3.50: Rupteur de commande pour le déplacement vertical descendant d'un nœud

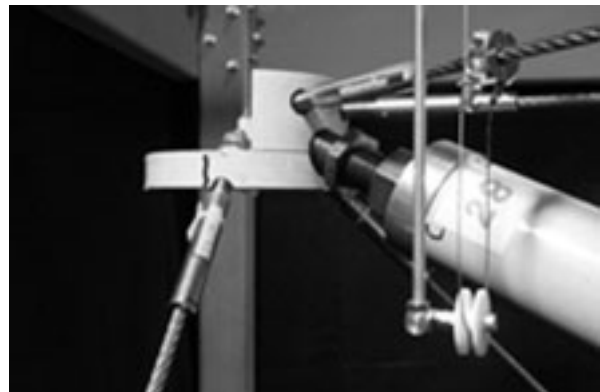


Figure 3.51: Rupteur de commande pour le déplacement vertical ascendant et descendant d'un nœud

Cinq déclencheurs de mouvement descendant (Figure 3.50) et un déclencheur mouvement ascendant-descendant (Figure 3.51.) sont mis en place pour limiter les déplacements verticaux de la structure :

*Niveau mécanique* : le vérin est lié au bâti par une chaîne fixée à une traverse. La position de la fixation de la chaîne sur le vérin définit la limite maximale du déplacement. Cette sécurité est destinée à ne pas endommager le vérin et ses systèmes de mesure lors d'une ruine locale (Figure 3.40) ;

*Niveau visuel* : l'état d'un vérin électrique est signalée par une lampe témoin (Figure 3.40) branchée entre une phase et le neutre de l'alimentation du moteur asynchrone considéré. Si la lampe est allumée le moteur est sous tension (Figure 3.40).

Les valeurs maximales des déplacements fixées sont illustrées dans le tableau 3.9.

Logiciel			Commande	
Vérins [mm]	Pente [mm]	Température [°C]	Microrupteur [mm]	Rupteur ascendant descendant [mm]
+/- 26	+/- 40	80	+/- 27	+/- 40

Tableau 3.9: Valeurs des bornes des systèmes de sécurité

### 3.5 Conclusions partielles

Trois structures modulaires à vocation réutilisable de type tensegrité composées d'abord de trois modules, puis de cinq modules et finalement, une structure active jouant sur la longueur des barres, unique et inédite composée de cinq modules, ont été construites avec succès. Un module est composé de six éléments comprimés et de vingt quatre éléments tendus partagés entre trois longueurs distinctes. Les structures sont appuyées en trois points avec six degrés de liberté bloqués. Dans ce cadre, deux modules de la structure cinq modules ne sont pas appuyés, ce qui la rapproche d'une configuration pratique.

La construction d'une structure active de tensegrité nécessite la maîtrise de techniques de mécanique des structures, d'électronique, de génie mécanique, et d'informatique afin d'y parvenir.

Ces trois structures ont permis de souligner au niveau de la construction et de la conception que :

- la construction d'une structure ou structure active de type tensegrité en grandeur nature nécessite une réflexion approfondie sur la conception des assemblages, composants d'une importance primordiale pour une structure modulaire et réutilisable. Une conception judicieuse des connections des éléments aux nœuds permet d'assurer que la structure ne travaille qu'en éléments barres et qu'aucun moment parasite n'apparaisse dans les barres et les nœuds. Ceci est d'autant plus important que pour une structure active les éléments actifs impliquent des charges asymétriques ;

- la conception d'une tensegrité impose une procédure rigoureuse de montage modulaire car les imperfections sur les composants peuvent créer une géométrie non optimale et des conditions de précontrainte non uniformes et inconnues. Le temps au montage et son corollaire, l'économie d'argent, sont aussi conditionnés par la conception judicieuse des assemblages ;
- les deux types d'assemblage conçus dans le cadre de cette construction ont montré leur potentiel à remplir ce cahier des charges ;
- le nœud central N°3 autorisant la convergence des éléments comprimés à tous moment en un point uniquement par contact, est une solution technique inédite qui n'est pas limitée à la structure construite dans la halle de l'IMAC, mais pourrait s'appliquer à d'autres structures composées de barres et câbles comme celles proposée par Saitoh [119, 120] et Wang [151]. De plus, pour la construction en générale, c'est une solution peu coûteuse, car aucune soudure, perçage ou pliage n'est à réaliser. Les structures déployables, les manèges ou encore les prothèses sont d'autres domaines qui pourraient tirer profit du concept de cet assemblage ;
- la tensegrité peut être le lieu d'application d'un autre matériau que l'acier tel que le Fiberline, polyester renforcé de fibres de verre, pour les barres rendant la structure plus légère. Le bois, le bambou, d'autres matériaux composites, le béton à poudre réactive et le verre pourraient être utilisés d'autant plus que de part la bonne conception des assemblages les barres ne travailleraient qu'en compression. De fait, certaines structures seraient peu coûteuses et d'autres seraient l'objet de réalisations architecturales inédites ;
- la structure dite « active », compte pour chacun de ses modules un nombre restreint de deux actionneurs électriques installés symétriquement. Le nombre d'appareils majeurs à gérer s'élève à vingt quatre : vingt pour la gestion des actionneurs, trois pour la gestion des déformations de la structure et un PC, maître du système. Même fonctionnant dans un régime quasi-statique, cela implique le multiplexage de ces appareils. La communication entre ces derniers est gérée par un programme développé sur LabVIEW dispensant et recevant les données sur le bus de terrain CAN sous le protocole CanOpen aux vingt trois appareils. L'utilisation de ce bus de communication, qui ne cesse de convaincre de nouveaux constructeurs automobiles pour gérer en temps réel aussi bien la gestion du moteur que celle de l'essuie-glace, est une application rare dans le domaine du génie civil. La puissance de ce support de communication n'exclue pas pour autant une certaine complexité. Dans la période de développement du prototype, un système actif nécessite des sécurités au niveau logiciel mais aussi indépendantes de la boucle de contrôle afin d'éviter la ruine de la structure causée par une défaillance ou mauvaise manipulation du système.



---

## 4 Essais statiques

Ce chapitre souligne le comportement complexe de ce type de structure par des essais statiques numériques illustrés expérimentalement sur deux structures de taille différente. Il propose une méthode simple et rapide pour analyser les non-linéarités géométriques d'une structure de tensegrité. Il met en évidence la concordance rare entre mesures et simulations pour de tels systèmes non linéaires. De plus, il souligne que des simplifications de l'analyse ne sont pas valables même pour des petites déformations, ce qui complique considérablement la tâche du contrôle.

Ce chapitre montre la nécessité d'aborder le contrôle d'une nouvelle façon pour des systèmes ne pouvant être commandés par des techniques classiques d'automatique. Il propose ainsi une nouvelle façon d'aborder le contrôle pour des systèmes au comportement complexe dont l'aptitude au service est une priorité. Il souligne la manière d'aborder la commande dans les cas de non existence de relation directe entre sortie et entrée et de la non unicité de la commande satisfaisant un objectif.

Des essais sur la structure composée de trois modules, 3M, illustrent la faisabilité du contrôle de la forme de celle-ci dans l'objectif de respecter un critère d'aptitude au service et ainsi d'envisager l'amélioration du comportement par l'intégration d'un système de contrôle pour de telles structures souples. Dans ce cadre, les commandes ont été appliquées manuellement.

Les résultats de ce chapitre ont fait l'objet de plusieurs publications [41, 42, 45, 125].

### 4.1 Techniques numériques

Les simulations du comportement de la structure sont guidées par deux objectifs :

- comparer notre modèle structural et le comportement réel de la structure ;
- déterminer un moyen pour évaluer l'effet de la modification des longueurs des éléments télescopiques sur le comportement de la structure.

## **4.1.1 Analyse statique**

### **4.1.1.1 Méthode des éléments finis**

L'analyse structurale d'une structure de tensegrité a été menée sur le logiciel de calcul par éléments finis ANSYS version 6.5. L'élément qui a perturbé cette analyse est l'inversion de la matrice de rigidité. La configuration de la structure fait que la matrice peut être remplie de nombreux zéro, rendant cette manipulation ardue pour les cas où le déterminant s'annule. De plus, les grands déplacements et la non-linéarité géométrique ont impliqué des problèmes de convergence de la méthode de Newton-Raphson. Le temps de calcul pour un cas de charge est conséquent. Ces multiples faiblesses ont suscité des interrogations sur la qualité du modèle introduit en entrée du calcul numérique. Un contrôle du modèle par une méthode plus adaptée s'est avéré inéluctable avant de tester la maquette du laboratoire.

### **4.1.1.2 Analyse structurale par la Relaxation Dynamique**

Il s'agit d'une méthode vectorielle d'analyse non linéaire [8, 146] antérieure à celle des éléments finis, consistant à suivre les déplacements de la structure depuis le moment de la mise en charge jusqu'à l'amortissement complet des oscillations. L'appellation pseudo dynamique vient du fait que, comme seule la position finale d'équilibre nous intéresse, ni les caractéristiques de l'amortissement ni les masses utilisées n'ont besoin de représenter la structure réelle. Elles peuvent donc être choisies de façon à assurer une convergence rapide du calcul, sans se soucier des mouvements de la structure, la relaxation dynamique étant uniquement destinée à une analyse structurale statique.

La formulation utilisée étant explicite, aucune matrice de rigidité assemblée n'est nécessaire. Une formulation explicite consiste en une résolution du système d'équations ne requérant pas d'inversion de matrice compte tenu que les équations sont découplées. Cela permet une implémentation aisée et un calcul rapide de problèmes hautement non linéaires (non-linéarité matérielle). Seuls différents vecteurs (forces nodales, vitesses, coordonnées nodales, masses nodales) doivent être stockés, ce qui en fait une méthode particulièrement adaptée au calcul sur ordinateur ; les résultats des calculs sont en effet quasi-instantanés. Comme toute la méthode est exprimée en coordonnées globales, elle autorise automatiquement une analyse des grands déplacements (non-linéarité géométrique).

Les réglages des paramètres définissant la convergence, tels que les masses fictives et l'incrément de temps, ont été réalisés par Rossier, s'inspirant du travail de Papadrakakis [100]. L'amortissement cinétique proposé par Barnes [8] est implémenté. Les résultats issus de cette méthode d'analyse structurale, implémentée par Rossier [118], ont été comparés à ceux obtenus par la méthode des éléments finis (logiciel ANSYS 6.5). Ces analyses ont été basées

sur la géométrie du modèle construit, en appliquant des cas de charges semblables. Les déplacements des nœuds et les contraintes dans les câbles en traction et les barres en compression ont été les critères de comparaison des deux méthodes. Il s'avère que le comportement de la structure décrit par les deux méthodes, pour les cas de charge pour lesquels l'analyse numérique dynamique convergeait, est identique (différence des rapports  $<1/1000$ ). Outre les problèmes de convergence, les éléments finis sont bien plus lents que la relaxation dynamique ; le rapport des temps de calcul est de l'ordre de 1000 ( $1/10^e$  de seconde pour la relaxation dynamique et 100 secondes pour les éléments finis sur un ordinateur 200 MHz /128 MB). Bien que la vitesse des ordinateurs croît rapidement (la puissance des microprocesseurs suit la loi empirique de Moore, énoncée en 1965 : la puissance double tous les 18 mois environ, décuple tous les 6 ans...), la complexité cubique de l'algorithme de la méthode des éléments finis le pénalise fortement pour l'analyse de structures de tensegrité à plus grande échelle et pour des cas où elle serait employée comme simple outil pour des calculs itératifs.

#### **4.1.1.3 Choix de la méthode d'analyse structurale**

La relaxation dynamique a été choisie pour simuler le comportement non linéaire de la structure de tensegrité d'une part pour sa rapidité de calcul, et d'autre part pour le faible poids de l'exécutable qui permettrait d'être intégré facilement dans un algorithme de contrôle. Cette méthode est bien adaptée à ce type de structure car elle cumule les avantages de la recherche de forme et l'analyse structurale contrairement aux éléments finis. Ici, la connaissance d'un état proche de la configuration d'équilibre est suffisante pour simuler le comportement. Elle contribue à analyser le comportement complexe de la structure et ainsi permet de prédire les déplacements grâce à un modèle structural. Cette méthode est d'ailleurs largement reconnue pour des applications dans l'analyse de structures câblées et membranaires [150].

#### **4.1.2 Contrôle de la forme**

Dans l'optique d'adapter la forme de la structure avec des éléments télescopiques, lorsqu'elle est soumise à des environnements changeants, des combinaisons de modification de longueur des barres sont à déterminer. La structure de tensegrité, 3M, est équipée de capteurs et de barres télescopiques de telle sorte que sa forme puisse être modifiée et mesurée.

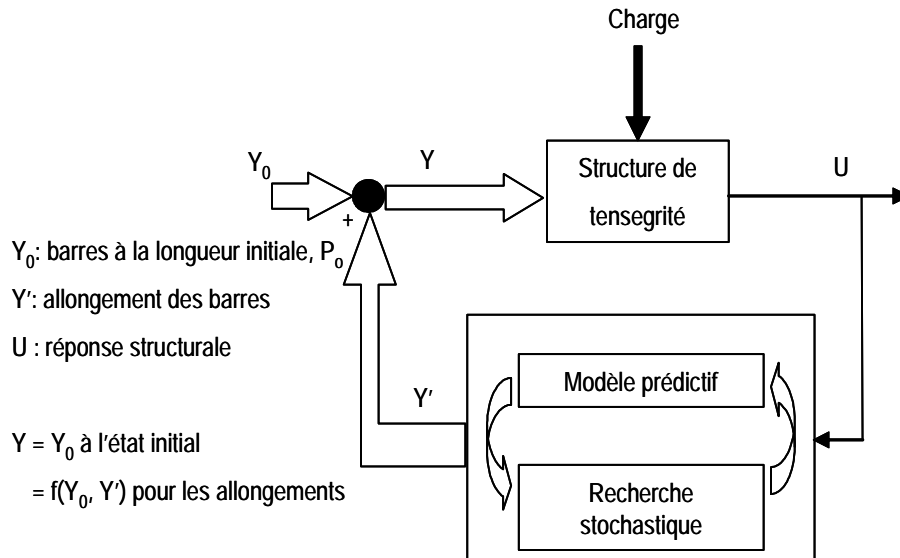
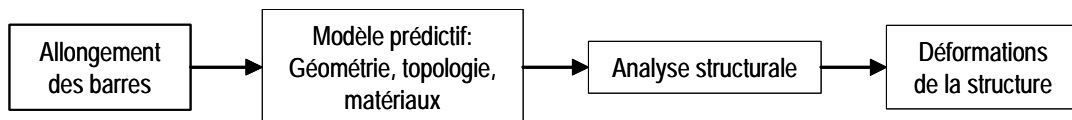
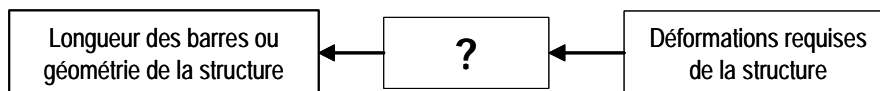


Figure 4.1: Boucle de contrôle pour le contrôle de la forme

Le schéma de la Figure 4.1 explique le cheminement du contrôle. Dès que la structure est chargée, sa réponse est introduite dans un outil de recherche qui combine un modèle de prédiction et un algorithme de recherche. La recherche d'une solution est guidée par des objectifs et bornée par des contraintes. La simulation du modèle de prédiction est réalisée par la relaxation dynamique. Le but de la recherche est de déterminer une combinaison d'allongement de barres, qui est appliquée à la structure chargée, afin d'adapter sa forme. Finalement, la nouvelle réponse de la structure est mesurée afin d'évaluer l'efficacité de la solution appliquée.



a) relation entre la forme de la structure et ses déformations



b) relation entre les déformations voulues de la structure et la forme de la structure

Figure 4.2: Relations entre longueurs des éléments télescopiques et géométrie de la structure

La recherche d'une solution pour un tel système non linéaire et complexe n'est pas triviale. Elle est difficilement réalisable en utilisant les techniques traditionnelles d'automatique. La difficulté de la détermination d'une commande de contrôle est située à deux niveaux :

- plusieurs commandes peuvent satisfaire le même objectif et les coordonnées finales de la structure sont inconnues avant d'avoir déterminé une commande ;
- il n'existe pas de formulation analytique directe entre les déformations de la structure et les allongements des barres (Figure 4.2).

Elle nécessite la recherche et la génération d'une multitude de commandes, suivi d'une analyse structurale afin de vérifier que la commande satisfait l'objectif (Figure 4.1). La taille de l'espace exhaustif des solutions varie exponentiellement avec le nombre de barres télescopiques (Figure 4.3). L'outil de recherche doit définir la barre à modifier et l'amplitude de la modification. L'allongement est distribué en incréments de 0.25 mm pour des raisons expérimentales. Dans le cas de la structure étudiée, l'espace des solutions est discret. Il est défini par le nombre de barres télescopiques et le nombre de longueurs que peut prendre chaque barre télescopique pour un incrément et une course prédéfinis. Soit  $N$ , le nombre exhaustif de combinaisons, est donné par l'Equation 4.1 :

$$N = P^n \quad (4.1)$$

$P$  est le nombre de longueurs différentes que peut adopter une barre et  $n$  est le nombre de barres télescopiques. Pour 3M, si les dix huit barres sont télescopiques et l'incrément de longueur est de 0.25 mm, le nombre de solutions s'élève à  $18^{24}$ . La taille de l'espace des solutions est réduite par l'adjonction de contraintes dans la recherche.

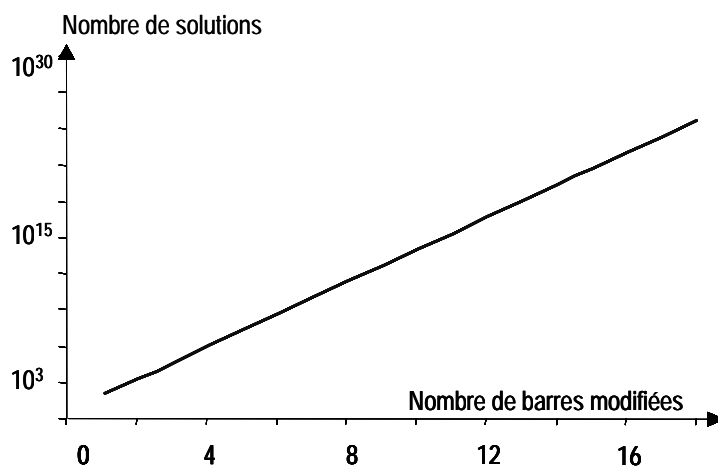


Figure 4.3: Espace des solutions. L'utilisation de l'axe vertical logarithmique montre la relation exponentielle entre le nombre de solutions et le nombre de barres télescopiques

Une méthode de recherche stochastique permet de naviguer dans un tel espace de solutions et de définir des solutions selon des objectifs et des contraintes [125]. Pour 3M, la technique du « recuit simulé » [71, 35] est utilisée.

Le principe de base du recuit simulé est emprunté à la métallurgie : un morceau de métal est chauffé, puis laissé refroidir lentement. Le refroidissement lent et régulier du métal permet

aux atomes de se stabiliser peu à peu dans une position d'énergie minimale. Ici, ce n'est pas l'énergie d'un cristal qui est minimisée, mais une fonction de coût caractéristique du problème, où une solution est d'autant meilleure que son coût est faible. Il s'agit d'une méthode d'optimisation itérative qui en considérant non seulement les bonnes solutions, mais aussi les mauvaises, permet d'éviter de rester bloquée dans un minimum local, et d'être ainsi très proche du minimum global. La procédure de recherche est gouvernée par la fonction décrite dans l'Equation 4.2 :

$$P_{\text{accepté}} = \exp\left(-\frac{\Delta C}{T}\right) \quad (4.2)$$

$\Delta C$  est la variation de la fonction objective, ou coût, entre deux mouvements de barre.  $P_{\text{accepté}}$  est comparé à une valeur aléatoire entre 0 et 1. La solution moins bonne est acceptée quand la valeur aléatoire est inférieure à  $P_{\text{accepté}}$ . En général, la température,  $T$ , suit une trajectoire, de taux de variation négatif, afin de converger vers zéro. Au voisinage de  $T=0$ , dernier intervalle sur la trajectoire, l'algorithme se transforme en un algorithme de descente. Tout au long de la trajectoire,  $T$  va devoir décroître ni trop vite (minimum local) ni trop lentement, pour obtenir un résultat en temps raisonnable. Les algorithmes de recuit simulé sont suffisamment robustes si les paramètres de la planification de trajectoire de refroidissement sont adaptés à la taille et la complexité de l'espace des solutions. L'implémentation considère la planification du refroidissement modifiée de Lam-Delosme [140] et le concept dynamique de Hustin [59]. Dans notre application, la recherche débute en favorisant des grandes amplitudes de mouvements des barres et finit par des plus petites au voisinage de la convergence. L'implémentation du recuit simulé pour le contrôle de la structure a été réalisée par Shea et al. [125].

## 4.2 Description et paramètres des essais

### 4.2.1 Essais statiques

Deux types d'essais ont été réalisés sur 3M :

- charges statiques verticales ;
- modification des longueurs des éléments télescopiques.

Dans les deux cas, des charges verticales sont appliquées uniquement aux nœuds sur lesquels converge au moins une barre. Compte tenu qu'aucune charge ne serait appliquée à un nœud ne pouvant reprendre des efforts de compression dans un cas réel, les positions des charges sont cohérentes avec celles appliquées à une structure en service. Les quatre cas de charges sont illustrés dans le Tableau 4.1.

Type	Numéro du noeud chargé	Charge maximale appliquée [N]	Etape de chargement [N]	Noeuds mesurés [mm]
1-Symétrique	6, 52, 62 5,48, 61	860	152 et 236	7, 54, 63, 6, 52, 62, 3, 50, 59
2-Asymétrique	6, 52, 62, 5,48, 61	1923	152 et 236	7, 54, 63, 6, 52, 62, 3, 50, 59
3-Noeud central Module 1 Module 2 Module 3	7 54 63	860	152 et 236	7, 54, 63, 6, 52, 62, 3, 50, 59
4-Modification des longueurs des barres	-	-	-	7, 54, 63, 6, 52, 62, 5, 48,61

Tableau 4.1: Description du type, de la position et de l'amplitude des charges verticales et la position des noeuds mesurés

Les cas de charge symétrique, composés de trois noeuds, simulent le chargement uniforme d'une sollicitation appliquée sur une toiture (Figure 4.4). De fait, les noeuds 6, 52 et 62, formant le plus grand triangle équilatéral de la couche supérieure de la structure sont chargés. Un triangle plus petit de la couche supérieure, dont les sommets sont les noeuds 5, 48 et 61, est aussi sollicité. La charge maximale appliquée est une force verticale descendante pour chaque noeud d'une valeur de 860 N. La charge est appliquée incrémentalement par pas de 152 N et 236 N.

Des charges simples, charges ponctuelles à un noeud, permettent d'évaluer l'influence d'une charge asymétrique sur le comportement de la structure. La charge maximale appliquée est une force verticale descendante d'une valeur de 1923 N. Le chargement est appliqué incrémentalement par pas de 152 N et 236 N. Pour ces cas, seuls les noeuds pour lesquels une barre converge sont considérés.

Les cas de charge des noeuds centraux sont les seuls pour lesquels une charge est appliquée à un noeud qui est le lieu de convergence d'éléments uniquement comprimés. La charge maximale appliquée est une force verticale descendante d'une valeur de 860 N. Elle est appliquée incrémentalement par pas de 152 N et 236 N.

Le dernier cas de charge consiste à solliciter la structure en modifiant les longueurs des barres. Compte tenu que les noeuds mesurés ne doivent pas être l'objet d'une telle sollicitation, le nombre de barres allongées est réduit de dix huit à quinze. La course maximale des allongements est de +/- 3 mm, pour un incrément de 0.25 mm.

A l'exception du dernier cas de charge mentionné, les charges verticales descendantes sont des poids appliqués au noeud sollicité grâce à un câble vissé au centre celui-ci. L'accumulation de plombs en plomb sur une plaque en acier liée au câble permet de varier la force dans la fourchette choisie de valeurs. Chaque charge est appliquée trois fois afin de vérifier la reproductibilité du comportement.





supports en béton de la couche inférieure : les trois translations du Nœud 1, les translations du Nœud 51 dans la direction Y et Z, et la translation du Nœud 60 dans la direction Z sont ainsi bloquées. La direction Z correspond à l'axe vertical et les directions X et Y correspondent au plan horizontal (Figure 4.4). Les six degrés de liberté fixés empêchent ainsi les mouvements d'ensemble de la structure.

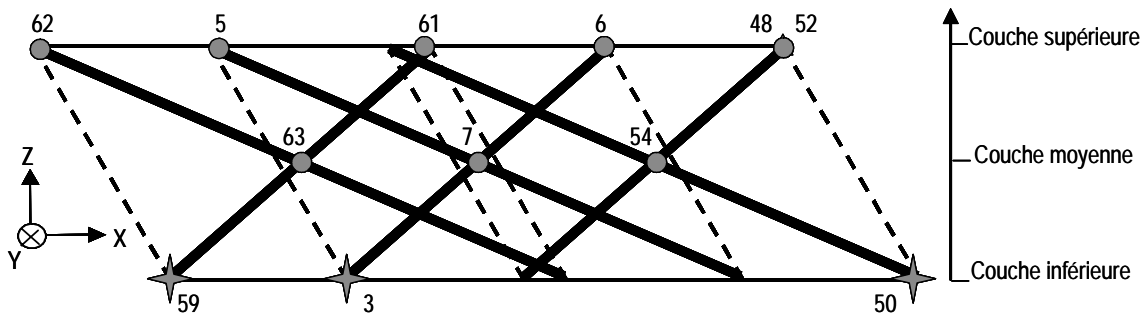


Figure 4.5: Vue en élévation de 3M : Position des capteurs de déplacement et des charges

Le niveau d'autocontrainte de la structure est introduit en allongeant les barres uniformément de 2 mm par rapport à la configuration des barres à autocontrainte nulle (1296 mm). La longueur des barres s'élève alors à 1298 mm et implique des efforts uniformes dans les barres de l'ordre de 7500 N. Pour leur part les tensions avoisinent les 2700 N pour les câbles du triangle isocèle, 2200 N pour les câbles latéraux et 650 N pour les câbles du triangle équilatéral.

## 4.2.2 Contrôle de la forme de la structure

L'objectif du contrôle de la forme de 3M est de maintenir la pente initiale de la couche supérieure de la structure sur laquelle pourrait être fixée un toit d'une halle d'exposition. Il s'agit d'un critère d'aptitude au service qui est comparable à garantir l'écoulement de l'eau de pluie vers l'extérieur de la structure. Le comportement de la couche supérieure représentative est suivi par les déplacements de trois nœuds, 5, 48 et 61. Ils forment un triangle équilatéral (Figure 4.6) aux sommets duquel serait fixée la toiture. Un capteur inductif, équipant chacun des trois nœuds, mesure chaque déplacement vertical,  $\delta_i$ .

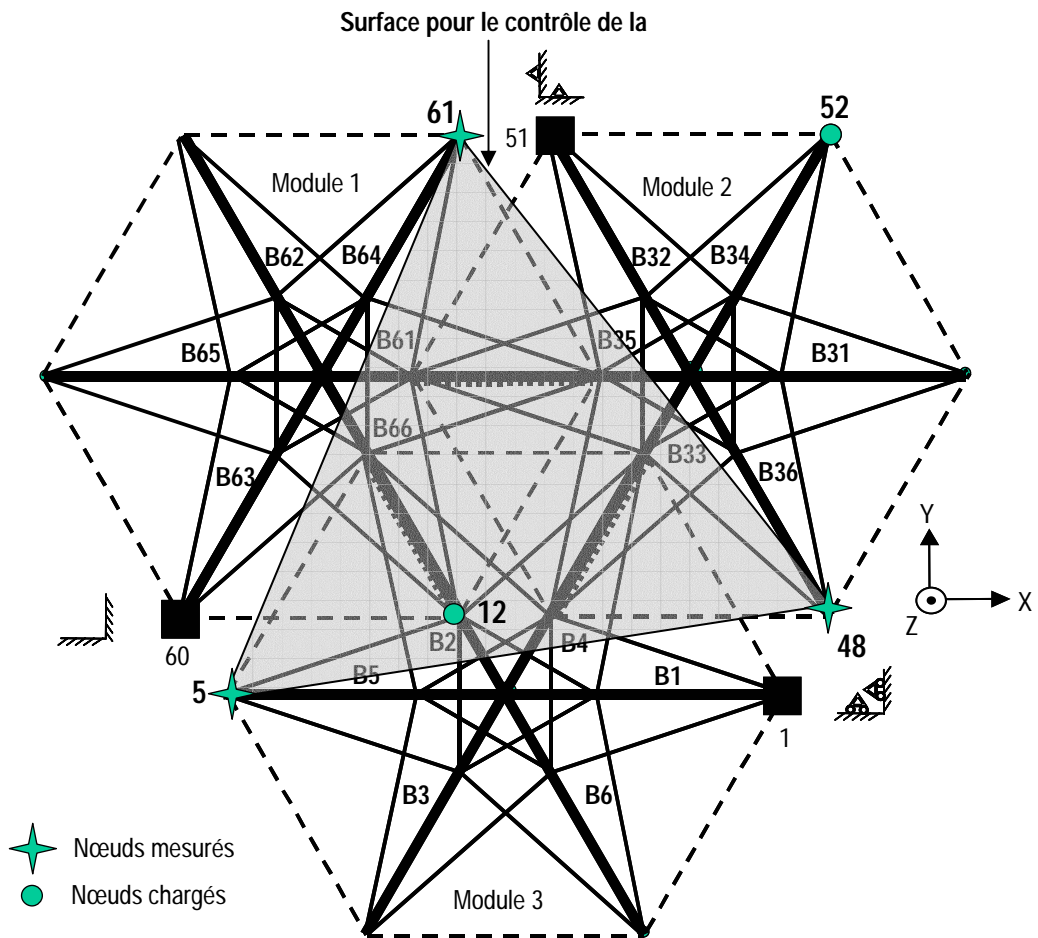
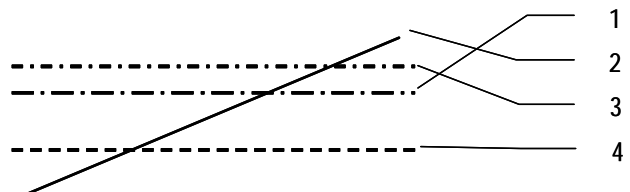


Figure 4.6: Vue en plan de 3M : Position de la surface de contrôle et des charges

La tâche du contrôle de la forme consiste à déterminer des modifications des longueurs des barres télescopiques pour maintenir la pente initiale de la structure dès que celle-ci est altérée par une sollicitation extérieure (Figure 4.7). L'écart par rapport à la pente initiale, soit la réponse structurale, est évaluée par l'écart type entre les déplacements relatifs des trois nœuds (Equation 4.3).

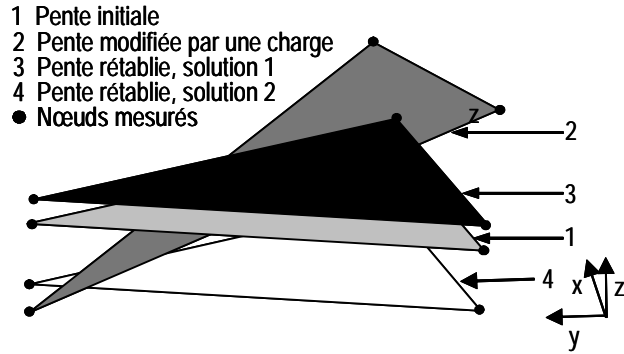
$$\text{réponse structurale} = \sqrt{\frac{(\delta_5 - \delta_{48})^2 + (\delta_5 - \delta_{61})^2 + (\delta_{48} - \delta_{61})^2}{3}} \quad (4.3)$$

Bien que 3M compte un potentiel de 18 barres télescopiques, le nombre d'éléments utilisés pour le contrôle est réduit à quinze. En effet, seules celles, non connectées à un des trois nœuds mesurés, sont retenues (Figure 4.4). Le niveau d'autocontrainte de la structure est introduit en allongeant les barres uniformément de 4 mm par rapport à la



a) vue en élévation des différentes pentes possibles

configuration des barres à autocontrainte nulle (1296 mm). Leur longueur uniforme s'élève alors à 1300 mm ; elle est considérée comme la position initiale des barres télescopiques,  $P_0$  (Figure 4.8). Le raccourcissement ou l'allongement de celles-ci autour de cette position modifie l'état d'autocontrainte du système.



b) Vue de perspective des différentes pentes possibles

Figure 4.7: Schéma du contrôle de la pente

Pour les essais menés sur 3M, les modifications des longueurs des barres ont été effectuées manuellement. L'incrément minimal de longueur est déterminé par le pas de vis de la tige filetée et le niveau de précision atteignable en allongeant ou raccourcissant manuellement les barres. Compte tenu que le pas de vis de la tige filetée est de 1.5 mm et que l'écrou compte six faces, la précision sur la modification de longueur de la barre par rapport à son longueur initiale est d'au moins 0.25 mm. Compte tenu de la charge critique de flambage et de la contrainte maximale des barres, le changement de la longueur des barres est limité à +/- 3mm. La contrainte maximale autorisée dans les câbles intègre un facteur de sécurité deux par rapport à la contrainte de rupture (Chapitre 3 et [43]), soit  $\sigma_{\text{max-câble-autorisé}} = 613 \text{ N/mm}^2$ . Considérant les essais de flambage effectués sur des barres (Chapitre 3 et [86, 107]), la force maximale,  $f_{\text{max-barre-autorisée}}$ , autorisée dans les barres s'élève à 20 000 N.

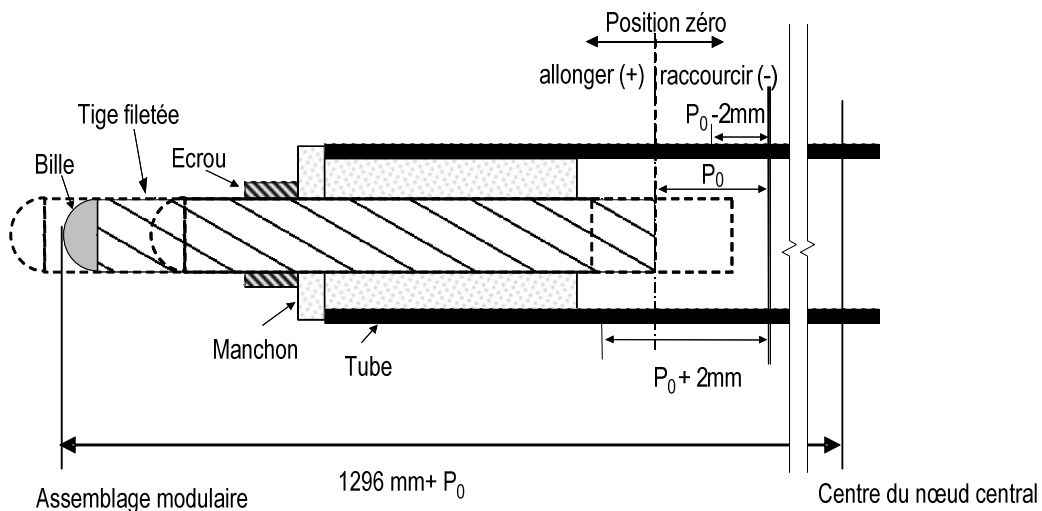


Figure 4.8: Description des mouvements d'une barre télescopique

La recherche de solutions, effectuée par le recuit simulé, s'appuie sur deux modèles pour analyser le comportement de la structure soumise à des changements de longueur de ces éléments comprimés. Les déplacements  $\delta_i$  sont simulés aussi bien par une analyse numérique

structurale que par des mesures effectuées sur la structure soumise à un chargement. Le premier modèle, *modèle structural*, construit sur la base de la géométrie, topologie, conditions aux limites et propriétés des matériaux est analysé par la relaxation dynamique. Le deuxième modèle, *modèle étalonné*, est un modèle structural qui est étalonné par des mesures effectuées sur la structure. Pour un nœud  $r$ , son déplacement vertical  $\delta_r$  est donné par le :

$$\text{Modèle structural :} \quad \delta_r = \delta_r^{1n} \quad (4.4)$$

$$\text{Modèle étalonné :} \quad \delta_r = \delta_r^{1n} + (\delta_r^{0m} - \delta_r^{0n}) \quad (4.5)$$

$\delta_r^{1n}$  est le déplacement simulé du nœud  $r$  issu d'un chargement,  $\delta_r^{0m}$  est le déplacement simulé du nœud  $r$  issu d'un chargement dans sa configuration initiale (les longueurs des barres sont les longueurs initiales) et  $\delta_r^{0n}$  est le déplacement du nœud  $r$  mesuré sur la structure dans sa configuration initiale. La technique de recherche stochastique utilise ces deux modèles pour déterminer les allongements des éléments télescopiques afin de retrouver la pente initiale. De fait, l'objectif de la recherche est de minimiser la réponse structurale définie par l'Equation 4.3.

Dès le moment où une solution a été trouvée, celle-ci est appliquée à la structure suivant la procédure décrite dans la Figure 4.9. Un essai, durant lequel l'effet des allongements des barres A à Z sur la pente modifiée est mesuré, est divisé en trois étapes :

- **Etape 1 :** l'état initial de la structure est mesuré. Les hauteurs des nœuds 5, 48 et 61 sont mesurées par les capteurs inductifs ;
- **Etape 2 :** la structure est chargée et mesurée. La structure est chargée et déchargée trois fois afin de vérifier la reproductibilité de son comportement ;
- **Etape 3 :** les trois déplacements sont mesurés et la recherche d'une solution est lancée. La solution est une commande composée d'élongations et de raccourcissements à appliquer sur les barres télescopiques. Compte tenu que les allongements sont réalisés manuellement, ils ne peuvent pas être simultanés. De fait, une séquence arbitraire de modification est choisie. L'application de la commande débute par la modification de la longueur de la barre A et continue dans l'ordre alphabétique jusqu'à la dernière barre. Pour chaque nouvel allongement d'une barre, une simulation est lancée afin de vérifier qu'aucune itération ne ruine un ou plusieurs éléments la structure. Si la simulation souligne que la force dans un élément approche la limite fixée, une nouvelle séquence est adoptée. La vérification numérique de la séquence étant faite, la commande est appliquée à la structure. Après chaque itération, les déplacements des trois nœuds sont mesurés. Là encore, si une observation visuelle soupçonne un comportement anormal de la structure, la séquence est modifiée. La consigne étant atteinte, les déplacements finaux sont comparés aux simulations. Le

retour à la configuration initiale est atteint en appliquant la séquence aller dans le sens opposé. L'état final déchargé est comparé avec l'état initial.

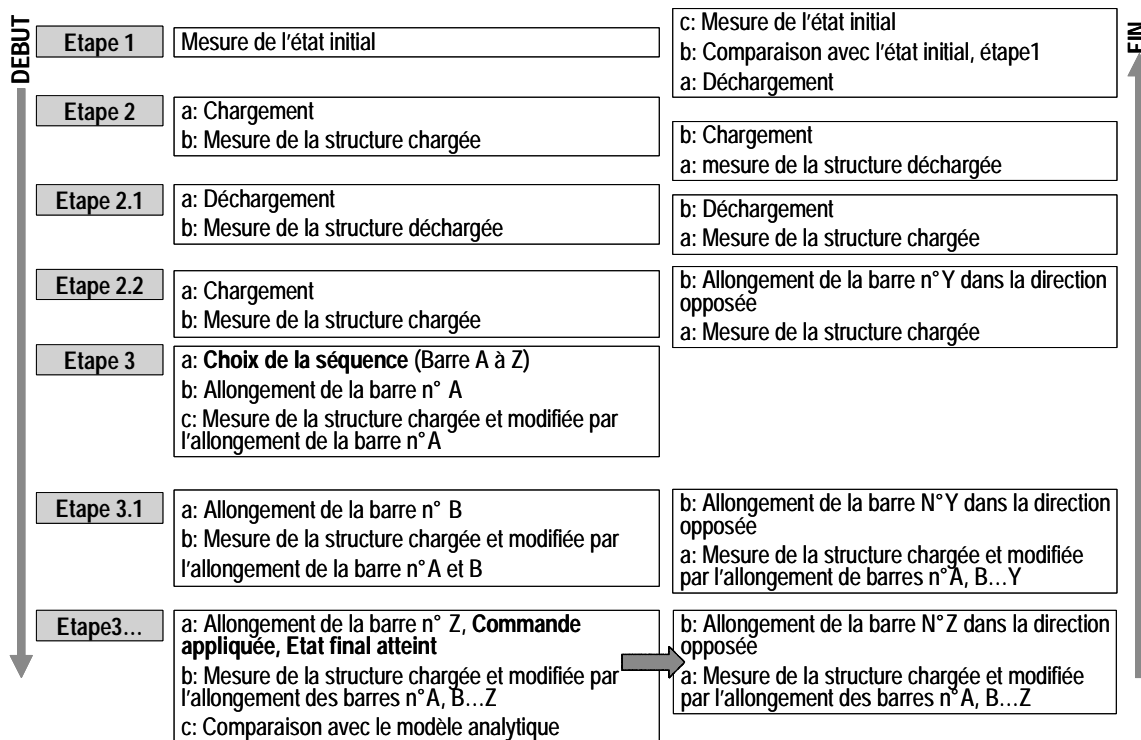


Figure 4.9: Procédure de chargement pour le contrôle de la pente

Le contrôle de la pente est étudié pour quatre cas de charge impliquant des chargements simples asymétriques et centraux à la connexion de deux modules (Tableau 4.2). Deux scénarios de contrôle sont examinés : le premier autorise la modification de quinze barres sur les dix huit et le second limite le nombre à deux barres actives disposées symétriquement entre chaque module. Ce dernier est un guide pour le choix de la position des actuateurs (motorisés) dans 5M. Compte tenu que l'arrangement des éléments actifs d'une structure plus grande serait similaire à celle de 3M, la disposition ce ceux-ci doit être symétrique.

Cas de charge	Noeud	Charge [N]
1 - asymétrique	52	860
2 - asymétrique	52	623
3 - central	12	860
4 - central	12	623

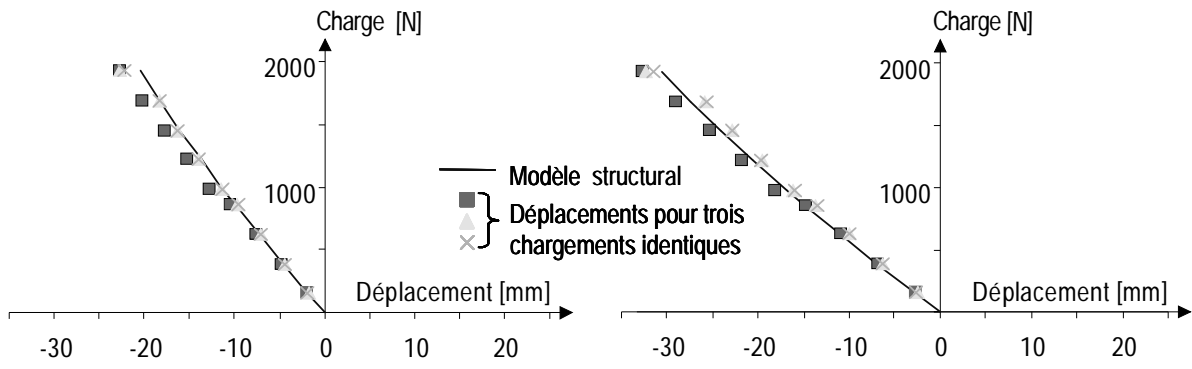
Tableau 4.2: Cas de charge pour le contrôle de la pente

## 4.3 Résultats des essais statiques

Le comportement de la structure de tensegrité construite est en général non linéaire et complexe. Cette section met en évidence le comportement de 3M en comparant une analyse numérique à des essais expérimentaux. Les résultats sont présentés de telle sorte que la complexité des cas de charges est accentuée. Le premier et le second chargement sont des forces verticales ponctuelles appliquées à un nœud unique. Des charges simultanées sont appliquées à différents nœuds pour le troisième cas de charge. La modification des longueurs de barres, comparable à des charges appliquées simultanément à plusieurs nœuds, est réalisée pour le dernier cas de charge. Chaque essai expérimental a été répété trois fois. Dans les graphiques, la ligne continue illustre les déplacements simulés par le modèle structural et les différents points représentent les déplacements mesurés sur la structure.

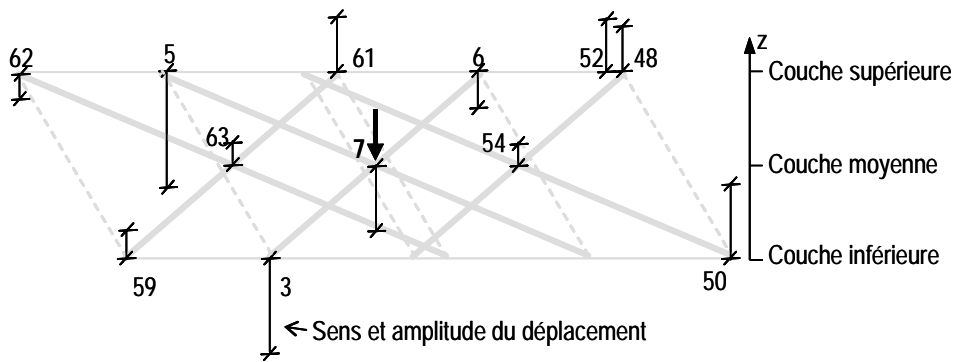
### 4.3.1 Corrélation entre le modèle structural et expérimental

Le premier cas de charge est une force verticale descendante appliquée au nœud central du module 2, Nœud 7. Les déformations de la structure sont illustrées dans la Figure 4.10. La Figure 4.10a montre le comportement des trois couches de la structure. Le déplacement du nœud sollicité (Nœud 7) est illustré dans la Figure 4.10b. Le Nœud 3, appartenant à un autre module, Module 3, que le nœud chargé, est le point de mouvement maximal. La position sur la couche inférieure de ce nœud est la plus éloignée aussi bien de la charge que des appuis. De plus, le nœud de déplacement maximal et la charge se déplacent dans le même sens. La Figure 4.10d illustre le déplacement d'un autre nœud de la couche supérieure (Nœud 52) : bien que le nœud appartienne au même module, son déplacement est dans le sens opposé à la charge. La Figure 4.10e souligne le déplacement du nœud central d'un autre module (Nœud 63). Le déplacement de ce nœud est plus faible que celui du nœud chargé et est dans le sens opposé. Ces résultats montrent une évolution continue des déplacements en fonction de la charge. La non-linéarité faible, observable et significative au dessus de 1000 N, n'est pas marquée par un point de bifurcation. Bien que le comportement soit non linéaire, la corrélation entre les simulations et les essais expérimentaux reste bonne : elle baisse au dessus de 1000 N mais ne passe pas sous les 90 %. Compte tenu que sur tous les graphiques de la Figure 4.10, les trois séries indépendantes de mesure sont proches ; les techniques de mesure et de chargement sont fiables. La Figure 4.10c montre un écart de 15% entre les séries de mesure pour les forces de 1802 N et de 1681 N : la reproductibilité des mesures est en général meilleure sous la charge de 981 N. La relaxation dans les câbles et le frottement dans les assemblages peuvent influencer la reproductibilité du comportement de la structure.

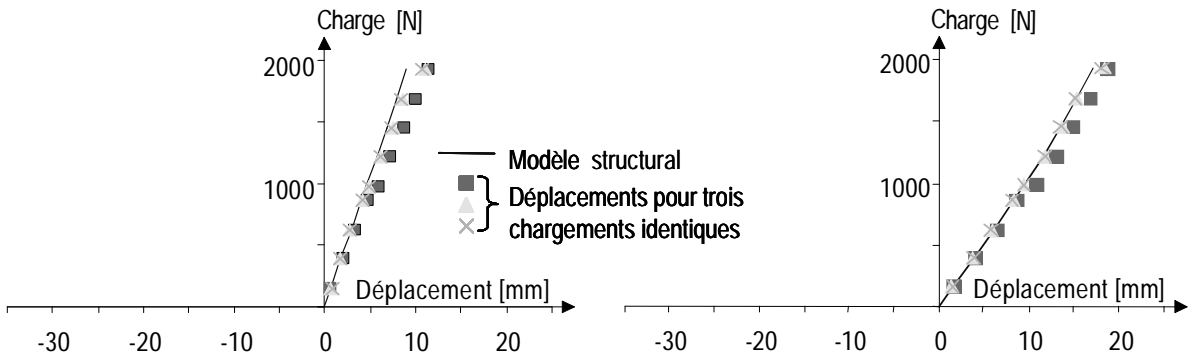


b) Déplacement du nœud chargé (Nœud 7)

c) Déplacement maximal du nœud non chargé (Nœud 3)



a) Déplacements des nœuds choisis pour une charge de 981 N appliquée au Nœud 7



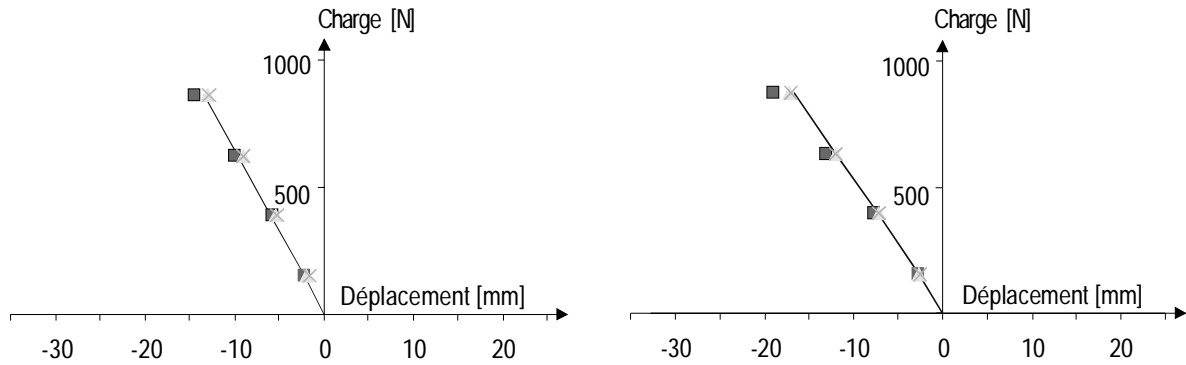
d) Déplacement d'un autre nœud du module 2 (Nœud 52)

e) Déplacement du nœud central d'un autre module (Nœud 63)

Figure 4.10: Corrélation entre le modèle structural et les mesures expérimentales

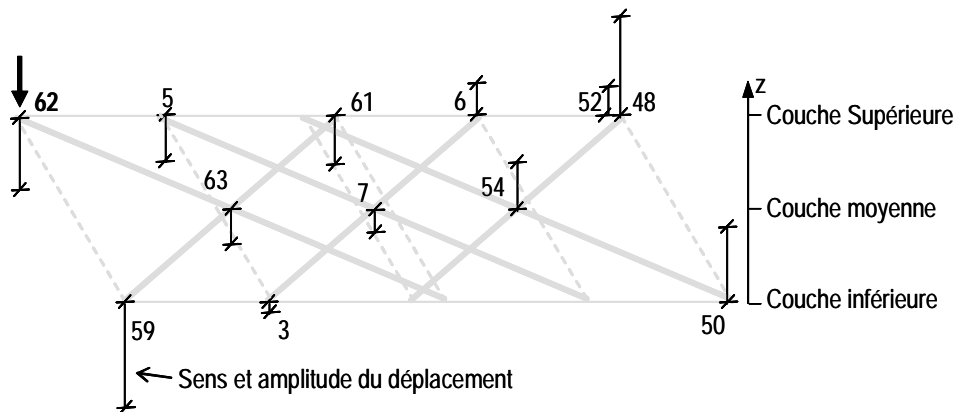
### 4.3.2 Linéarité locale

Le deuxième cas de charge est une force verticale descendante asymétrique appliquée à un nœud du contour extérieur de la couche supérieure de la structure (Nœud 62). La Figure 4.11 illustre le comportement linéaire localement observé sur les trois couches de la structure.

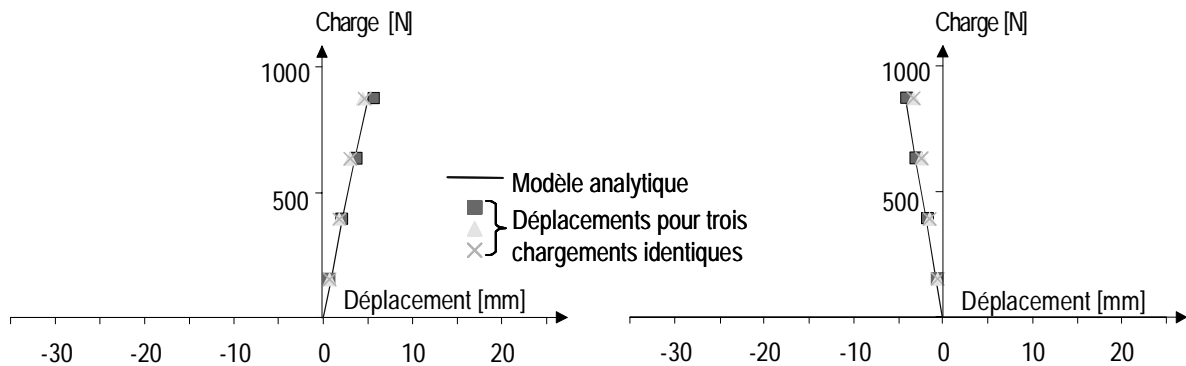


b) Déplacement du nœud chargé (Nœud 62),  
Module 1

c) Déplacement maximal du nœud non chargé  
(Nœud 59), Module 1



a) Déplacements des nœuds choisis pour une charge de 860 N appliquée au Nœud 62



d) Déplacement d'un nœud symétrique  
(Nœud 52), Module 2

e) Déplacement du nœud central d'un autre  
module (Nœud 7), Module 3

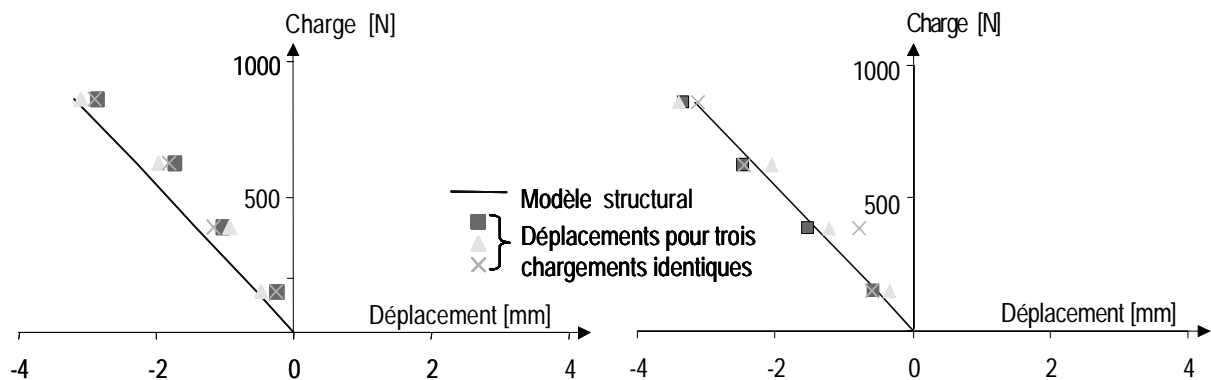
Figure 4.11: Comportement de la structure soumise à une sollicitation asymétrique



Le déplacement du nœud sollicité (Nœud 62) est illustré dans la Figure 4.11b. Le déplacement du Nœud 59, appartenant à la couche inférieure du module chargé, est le plus grand des nœuds mesurés (Figure 4.11c). Le mouvement de ce dernier et la charge est dans le même sens. La position de la charge au Nœud 62 crée des déplacements maxima supérieurs au cas de charge précédent (Figure 4.10c et Figure 4.11c). Le Nœud 52, nœud asymétrique du contour de la couche supérieure du Module 2, se déplace moins et dans la direction opposée au nœud chargé (Figure 4.11d). Le Nœud 7, nœud de la couche moyenne du module 2, se déplace dans le même sens que le nœud chargé (Figure 4.11e). Au vu des sens des déplacements des nœuds mesurés sur la structure (Figure 4.11a), cette charge asymétrique sollicite la structure en cisaillement.

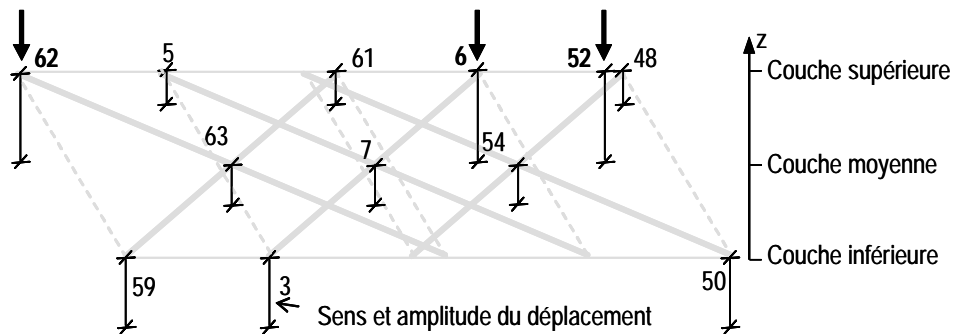
Comme pour le cas de charge précédent, la reproductibilité des trois séries de mesure est bonne, puisque l'écart entre elles ne dépasse pas les 5%. De plus, la corrélation entre le modèle structural et les résultats des essais expérimentaux reste supérieure à 95 % dans la fourchette de valeurs de charges appliquées (0-860 N). Les déplacements des nœuds de la structure évoluent linéairement avec l'augmentation de la valeur de la charge jusqu'à 860 N. Bien que les nœuds mesurés n'appartiennent pas au même module, la linéarité ne semble pas être affectée par un tel système couplé. La comparaison du comportement de la structure soumise à ces deux cas de charge montre une même linéarité pour les valeurs des charges considérées. De plus, elle souligne qu'une charge asymétrique appliquée sur le contour de la structure crée des déplacements maximaux supérieurs à une charge appliquée à un nœud central.

Le troisième cas de charge correspond à une même charge appliquée simultanément à trois nœuds de la couche supérieure de la structure. Ils appartiennent au contour de la structure et forment le triangle équilatéral de surface maximale. Ce cas de charge est ainsi symétrique. Chaque nœud appartient à un module différent : le Nœud 62 appartient au Module 1, le Nœud 52 appartient au Module 2 et le Nœud 6 appartient au Module 3. Le comportement des trois couches de la structure et des trois modules est illustré dans la Figure 4.12. La Figure 4.12a et 4.12b montrent les déplacements de deux des trois nœuds chargés (Nœud 6 et 62). Le comportement de ces nœuds est similaire pour un cas de charge symétrique. Compte tenu que le triangle, sollicité par des charges de même valeur, se translate perpendiculairement à l'axe vertical, le comportement du Nœud 52 est similaire aux deux autres (Figure 4.12a).

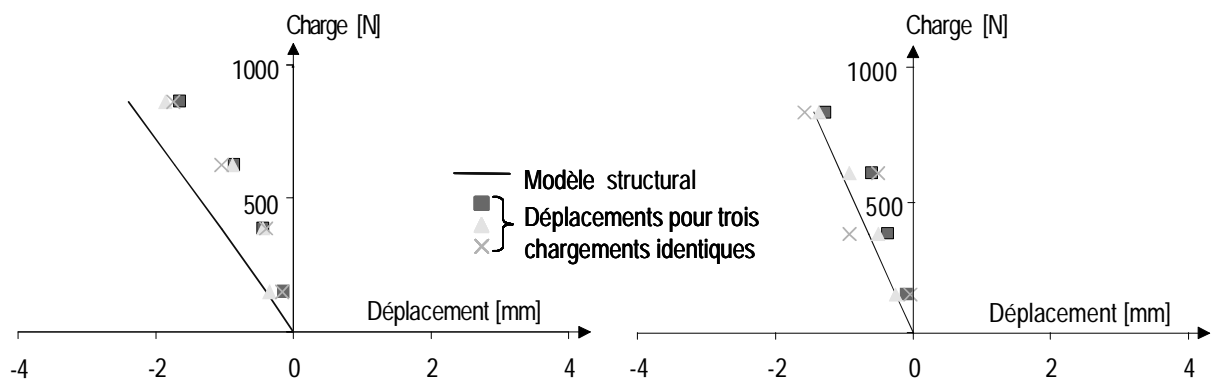


b) Déplacement du nœud chargé (Nœud 6),  
Module 3

c) Déplacement maximal du nœud chargé  
(Nœud 62), Module 1



a) Déplacements des nœuds choisis pour une charge de 860 N appliquée aux Nœud 62, Nœud 52 et Nœud 6



d) Déplacement du nœud central (Nœud 52) du  
Module 3

e) Déplacement D'un nœud de la couche  
inférieure (Nœud 3), Module 3

Figure 4.12: Comportement de 3M soumise à une charge symétrique

La sollicitation de nœuds placés symétriquement sur 3M équilibre la structure et implique des déplacements plus faibles que pour une charge ponctuelle. En effet, le déplacement d'un nœud sollicité, pour un cas de charge symétrique (Figure 4.12b), est cinq fois plus petit que pour un cas asymétrique (Figure 4.11b). La Figure 4.12d illustre le déplacement d'un nœud

(Nœud 54) de la couche moyenne de la structure qui est plus faible que les déplacements de la couche supérieure. La couche inférieure de la structure est celle se déformant le moins (Figure 4.12e et Figure 4.12a). Tous les graphiques soulignent que la corrélation des déplacements du modèle structural et des mesures, et la reproductibilité des séries de mesures sont moins bonnes que pour les cas de charge précédents. La Figure 4.12 révèle des différences pouvant atteindre les 25 %. Ceci s'explique principalement par les faibles déplacements pour ce cas de charge. De plus, la sollicitation de plusieurs nœuds accentue l'influence du frottement dans les assemblages et la relaxation dans les câbles en comparaison d'une charge unique.

Pour la fourchette de valeurs de forces appliquées (0-860 N), les déplacements varient linéairement avec l'augmentation de l'amplitude de la sollicitation. De plus, la linéarité observée est indépendante de la couche de la structure et du module mesuré.

En résumé, le comportement semble localement linéaire pour des sollicitations simples ou symétriques dans une fourchette limitée de valeurs de forces (0-860 N). De plus, le modèle structural, analysé par la relaxation dynamique, simule correctement le comportement de 3M. La reproductibilité des séries de mesure peut être influencée par le frottement dans les assemblages et la relaxation dans les câbles. Quand 3M est soumise à une sollicitation asymétrique sur son contour, la structure est plus souple.

### 4.3.3 Non-linéarité

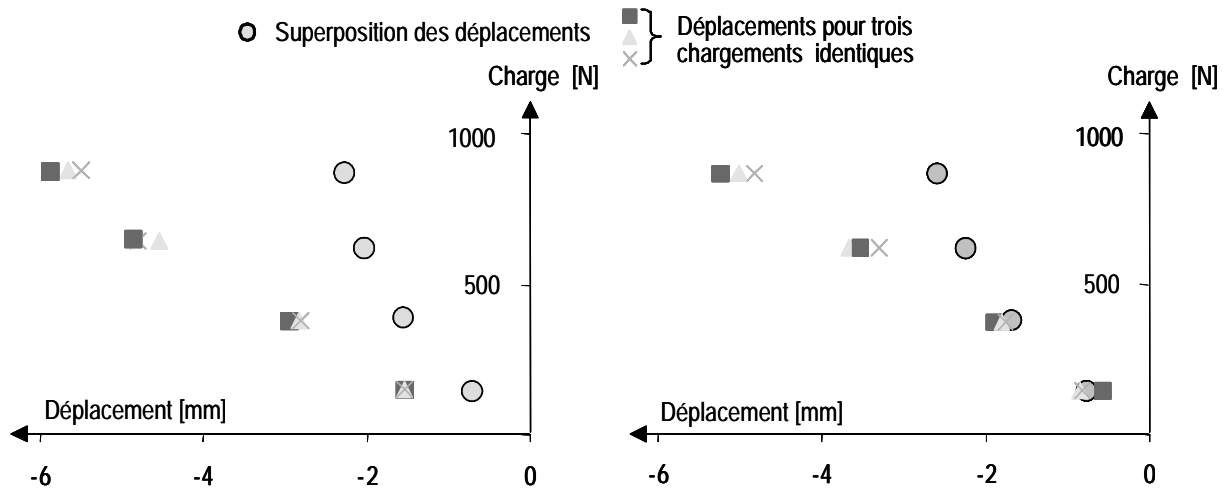
L'application du principe de superposition dans l'analyse structurale requiert un comportement linéaire de la structure. Bien que la linéarité du comportement ait été observée pour certains cas de charge, la généralisation de ce comportement, évitant des simulations numériques pour des nouvelles sollicitations, nécessite des investigations approfondies. De fait, la validité de ce principe, en ajoutant les déplacements de charges ponctuelles ou d'allongements de barres, est évaluée dans ce paragraphe.

#### 4.3.3.1 Superposition élastique des charges ponctuelles

Le comportement linéaire pour une fourchette de valeurs de charges ponctuelles est utilisé ici, pour vérifier l'hypothèse de superposition. Celle-ci contribuerait à simplifier et accélérer l'analyse de la structure. La superposition consiste à ajouter les déplacements issus des charges verticales ou des allongements des barres.

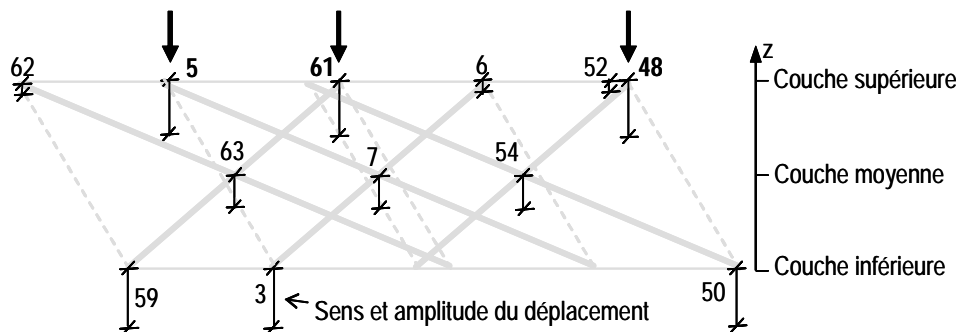
La Figure 9 montre les déplacements du Nœud 59 et du Nœud 3 lorsque la structure est sollicitée par un chargement symétrique. Le triangle équilatéral, de sommets les nœuds 5, 48 et 61, appartient à la couche supérieure de 3M. La surface de ce triangle est inférieure à celle

du triangle du cas de charge symétrique du paragraphe précédent et ses sommets sont plus éloignés des appuis. La déformation de la structure est aussi importante que précédemment (Figure 4.12a).



b) Déplacements au Nœud 59, superposition des charges au nœuds 5, 48 et 61

c) Déplacements au Nœud 3, superposition des charges au nœuds 5, 48 et 61



a) Déplacements des nœuds choisis pour une charge de 860 N appliquée aux Nœud 5, Nœud 48 et Nœud 61

Figure 4.13: Superposition élastique de déplacement pour prédire le comportement

Les disques pleins représentent la superposition élastique des déplacements à ce même nœud, ceci en considérant chaque cas de charge ponctuelle indépendamment (Figure 4.13b et 4.13c). Ayant mesuré les déplacements pour chaque cas de charge simple et indépendant aux nœuds 5, 48 et 61, les trois déplacements sont simplement ajoutés afin de simuler un cas de charge symétrique.

La Figure 4.13b et la Figure 4.13c mettent en évidence que la superposition élastique n'est pas adéquate pour prédire le comportement réel de la structure. Cette hypothèse sous-estime les déplacements réels. Alors que les déplacements pour des charges ponctuelles sont

supérieurs à ceux des symétriques (Chap.4.3.2), l'addition de déplacements, qui peuvent être en sens opposé, conduit à des déplacements plus faibles.

Ces résultats confirment la caractéristique connue du comportement géométriquement non linéaire de la tensegrité. Par conséquent, bien que le comportement pour une charge ponctuelle soit linéaire, une analyse numérique du comportement devra être entreprise pour chaque nouveau cas de charge vertical.

#### 4.3.3.2 Changement de longueur des barres

Un autre type de chargement consiste à observer le comportement de la structure soumise à des changements de la longueur des éléments comprimés. Ceci revient à appliquer une commande de contrôle. Considérant la linéarité pour des cas de charge ponctuelle dans une fourchette restreinte de valeur de charges, et dans l'hypothèse de petits changements de longueur des barres, la superposition linéaire des déplacements associés peut simuler la combinaison de changement de longueurs des barres. De fait, les déplacements de la structure sont calculés par le modèle structural pour un allongement de 1 mm de chaque barre ; ils sont divisés par la valeur de l'allongement et rangés dans un tableau. La matrice d'influence construite résume l'action d'un changement de chaque barre sur les déplacements de la structure. Chaque ligne exprime l'influence de l'allongement d'une barre sur le déplacement de tous les nœuds. Cette matrice est formée de 18 lignes qui correspondent à l'allongement des 18 barres et 99 colonnes correspondant aux déplacements dans les 3 directions des 33 nœuds. Les coefficients de cette matrice sont adimensionnels (rapport entre les déplacements des nœuds et l'allongement de la barre). Cette matrice permet ainsi de déterminer les déplacements issus de plusieurs changements de longueur de barres, en effectuant une combinaison linéaire des lignes. L'analyse de la structure s'en trouve alors simplifiée. L'utilisation de cette matrice est attractive, notamment dans le cadre du contrôle de la forme, car elle réduit le temps de calcul tout en évitant de répéter un nouveau calcul pour chaque cas proposé.

La Figure 4.14 illustre un exemple du comportement de la structure évalué par la réponse structurale de l'Equation 4.3. Dans la Figure 4.14, les pointillés correspondent à la réponse de la structure calculée en utilisant la matrice d'influence. La ligne pleine représente la réponse de la structure en effectuant une nouvelle analyse numérique du modèle structural par la relaxation dynamique, après chaque nouvelle modification d'une barre. La figure met en évidence une évolution non linéaire du comportement de la structure. L'amplitude de l'allongement de chaque barre est dans l'intervalle de +/- 3mm. L'allongement de quinze barres conduit à des déplacements suffisamment importants pour améliorer la réponse structurale de 10 mm. La corrélation entre le modèle structural et les mesures est bonne tout au long des modifications. En effet, une différence résiduelle de 10 % seulement apparaît

après modification des 15 barres. De plus, elle ne se cumule pas pour chaque nouvelle barre modifiée.

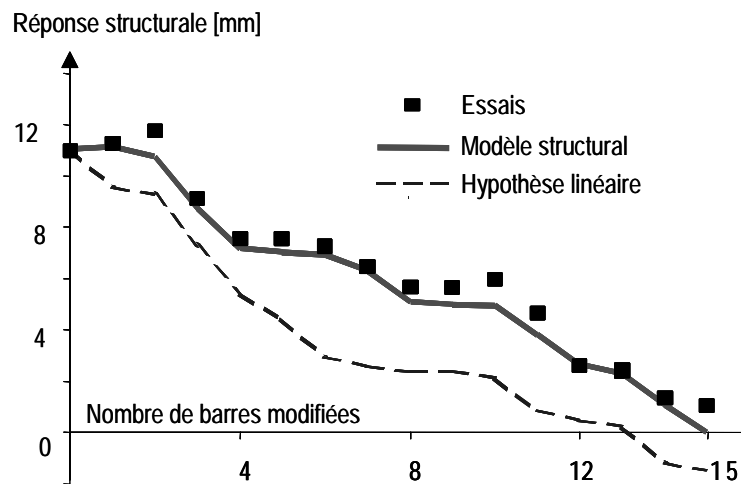


Figure 4.14: Réponse de la structure en fonction du nombre de barres modifiées. Comparaison des 2 méthodes prédictives

Evaluer le comportement en employant la matrice d'influence surestime la déformation. L'écart avec les valeurs mesurées est trop important pour pouvoir simuler efficacement le comportement de la tensegrité. Par conséquent, même pour des petits changements de longueur dans les barres, l'hypothèse de linéarité ne s'applique pas et le principe de superposition n'est pas valable.

#### 4.4 Essais vérificatifs sur la structure composée de cinq modules

Avant d'installer le système actif, intégrant une boucle de contrôle et des actionneurs, (Figure 4.15) ; 5M est soumise au même type d'essais statiques que la structure initiale, afin d'identifier son comportement. Ceci est d'autant plus important que le poids des actionneurs introduira des charges asymétriques.

Deux natures de chargement ont été donc appliquées à la structure durant la campagne d'essais :

- des poids appliqués aux nœuds connectés aux barres ;
- des allongements des barres télescopiques.

La technique de chargement et de mesure est presque identique à celle déployée pour l'évaluation du comportement de 3M. Un incrément de charge plus faible, 117 N, a été choisi pour les cas de charges verticaux. Le niveau d'autocontrainte de la structure est introduit en

allongeant les barres uniformément de 2.5 mm par rapport à la configuration des barres à autocontrainte nulle (1296 mm).

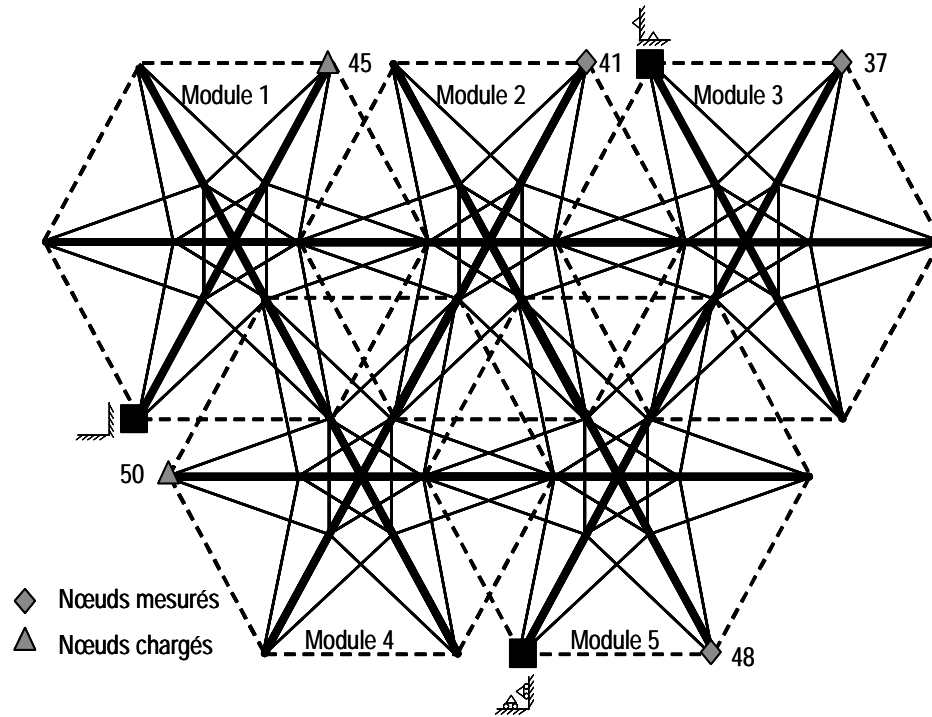


Figure 4.15: Vue en plan de 5M, position des capteurs et des charges

### 4.4.1 Linéarité

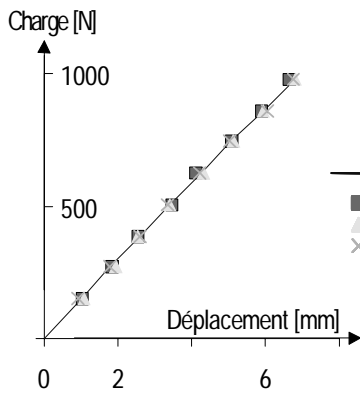


Figure 4.16: Chargement asymétrique : Déplacement du Nœud 50 du module 5

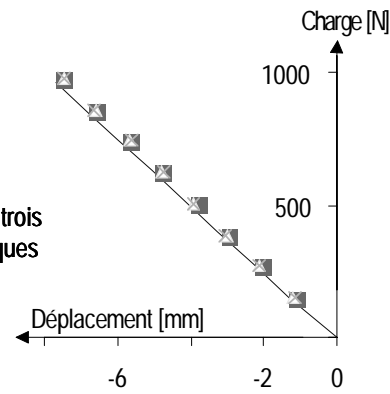


Figure 4.17: Chargement asymétrique : Déplacement du Nœud 45 du module 3

La Figure 4.16 illustre le comportement du Nœud 50 soumis à une charge ponctuelle et asymétrique, appliquée à un nœud de la couche supérieure (Nœud 37). Les deux modules ne sont pas connectés. Dans ce cas, le nœud observé se déplace dans la direction opposée à la

charge. Pour les deux cas, les déplacements sont de la même grandeur. Cette observation n'est pas limitée à ce cas unique, un comportement semblable a été observé pour d'autres chargements asymétriques. De fait, le couplage entre modules est important et non-intuitif. De plus, bien que les modules ne soient pas connectés, la linéarité reste observable pour la fourchette de valeurs de charges appliquées. La corrélation entre prédiction et mesure reste bonne. Une linéarité locale identique du comportement d'autres nœuds a pu être constatée au niveau des trois couches de la structure pour des charges équivalentes.

La Figure 4.17 illustre le comportement du Nœud 45 soumis à une charge ponctuelle et asymétrique, appliquée à un nœud de la couche supérieure (Nœud 41). Remarquons que le nœud chargé appartient à un module non appuyé. Le déplacement du nœud mesuré évolue linéairement avec la charge dans la fourchette de valeurs appliquées (0-981N) et dans le même sens que la charge. La corrélation entre les déplacements prédits et mesurés est supérieure à 90 %. De plus, la structure présente un comportement élastique. Bien que le nœud mesuré et le nœud chargé n'appartiennent pas au même module et que ce dernier n'est pas appuyé, la linéarité n'en est pas affectée.

#### 4.4.2 Non-linéarité

Le comportement linéaire pour une fourchette de valeurs de charges ponctuelles, semblable à la première structure 3M, est utilisé ici, pour vérifier l'hypothèse de superposition. Dans ce cas, nous nous sommes limités à ajouter uniquement les déplacements issus des charges verticales.

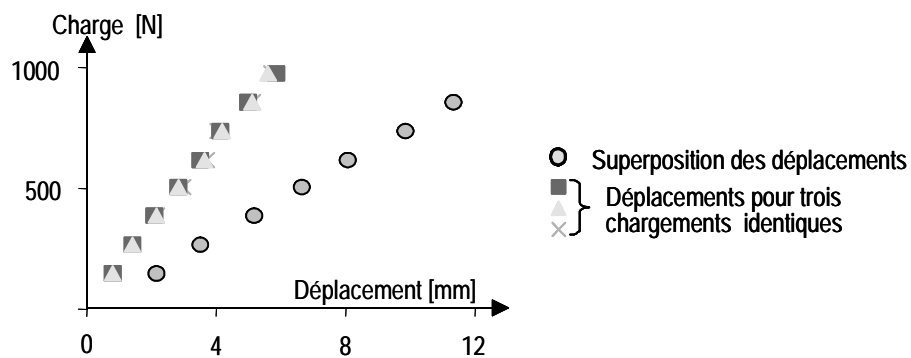


Figure 4.18: Superposition élastique pour prédire le comportement : Déplacements au Nœud 50, superposition des charges aux nœuds 48 et 37

La Figure 4.18 montre le déplacement du Nœud 50 lorsque la structure est sollicitée par un chargement asymétrique, composé de deux charges appliquées simultanément au Nœud 37 et au Nœud 48. Les disques pleins représentent la superposition élastique des déplacements de ce même nœud, ceci en considérant chaque cas de charge ponctuelle indépendamment. Les deux déplacements sont simplement ajoutés. Cette figure met en évidence que la



superposition élastique n'est également pas adéquate pour prédire le comportement de la structure 5 modules. Cette hypothèse, cette fois-ci, surestime les déplacements réels alors qu'elle les sous-estimait pour la structure 3 modules. Ces résultats confirment la caractéristique connue du comportement géométriquement non linéaire et difficilement prévisible de la tensegrité. Par conséquent, bien que, pour une charge ponctuelle, le comportement soit linéaire, une analyse numérique du comportement devra être entreprise pour chaque nouveau cas de charge verticale.

L'objectif de l'autre type de chargement est d'observer le comportement de la structure soumise à des changements de la longueur des éléments comprimés. Ceci correspond à appliquer une commande de contrôle. Compte tenu des observations issues de la Figure 4.18, la superposition linéaire des déplacements pour simplifier la recherche d'une commande n'a pas été considérée.

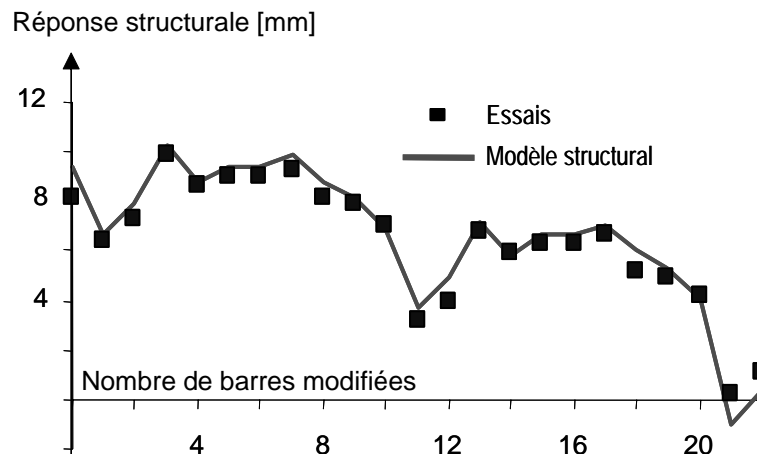


Figure 4.19: Réponse de la structure en fonction du nombre de barres modifiées

La Figure 4.19 met en évidence le comportement de la structure soumise à des allongements de barres. La ligne pleine représente la réponse de la structure simulée, après chaque nouvelle modification de barres. La figure souligne une évolution non linéaire du comportement de la structure. Compte tenu de la trajectoire saccadée, certaines barres semblent avoir plus d'influence que d'autres sur le comportement de la structure. Malgré ces changements soudains de pente, la corrélation entre le modèle structural et les mesures reste bonne tout au long des modifications. En effet, l'erreur initiale d'environ 10 % varie peu durant la modification des 22 barres. De plus, l'erreur ne se cumule pas pour chaque nouvelle barre modifiée. La variation de la corrélation peut s'expliquer par le frottement dans les assemblages.

## 4.5 Contrôle de la forme de la structure trois modules

L'objectif du contrôle de la forme de 3M est de maintenir la pente initiale de la couche supérieure de la structure en modifiant la longueur des éléments comprimés. Deux scénarios de contrôle sont examinés : le premier autorise la modification de quinze barres sur les dix huit (Figure 4.21) et le second limite le nombre à deux barres actives disposées symétriquement entre chaque module (Figure 4.22). L'efficacité des allongements des barres sur le contrôle de la pente est évaluée par l'équation 4.6 :

$$\text{Amélioration de la réponse [\%]} = \left[ 1 - \frac{|\Delta\text{réponse structurale}_{\text{mesurée}} - \Delta\text{réponse structurale}_{\text{simulée}}|}{\Delta\text{réponse structurale}_{\text{simulée}}} \right] \times 100 \quad (4.6)$$

où  $\Delta\text{réponse structurale} = |\text{réponse structurale}_{\text{initiale}} - \text{réponse structurale}_{\text{finale}}|$  [mm]

La réponse structurale (Equation 4.3) mesurée est comparée aux simulations des deux modèles prédictifs. La comparaison repose sur un rapport en pourcentage (Equation 4.6), appelé Amélioration de la réponse. Une bonne prédiction du comportement de la couche supérieure de la structure est indiquée par une valeur du rapport proche de 100 %. Dans la Figure 4.21 et la Figure 4.22, les rectangles de fond noir correspondent au modèle structural et les rectangles au fond blanc au modèle étalonné. Le contrôle de la pente est testé pour quatre cas de charge. Compte tenu de la taille identique de l'espace des solutions à explorer pour les deux scénarios, les temps de calcul nécessaires (temps d'exécution du recuit simulé), pour déterminer une combinaison de changement de longueur de barres pour les deux scénarios, sont équivalents.

Pour tous les cas de charge, les commandes (combinaisons d'allongement des barres) créent des changements efficaces dans la couche supérieure dépendant de l'objectif de rétablissement de la pente initiale. Bien que le comportement de la structure est non linéaire et que l'espace des solutions est exponentiel, cela montre que la combinaison du recuit simulé et de la relaxation dynamique a le potentiel d'identifier des bonnes commandes (Figure 4.20). Par exemple, une solution calculée pour le cas de charge n°2 est répertoriée dans le Tableau 4.3 et le comportement pour cette solution dans le Tableau 4.4. Une illustration graphique d'une de la solution est donnée par la Figure 4.20.

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Numéro de barre Figure 4.6	B1	B2	B3	B4	B6	B31	B32	B33	B34	B35	B61	B62	B63	B65	B66
Modèle structural [mm]	-3	-2.5	2.75	2.25	-2.75	-1.75	2	-2.75	-0.25	-0.75	2.25	-2.75	2	2.5	-2.25

Tableau 4.3: Exemple de deux commandes avec quinze barres actives pour le cas de charge n°2

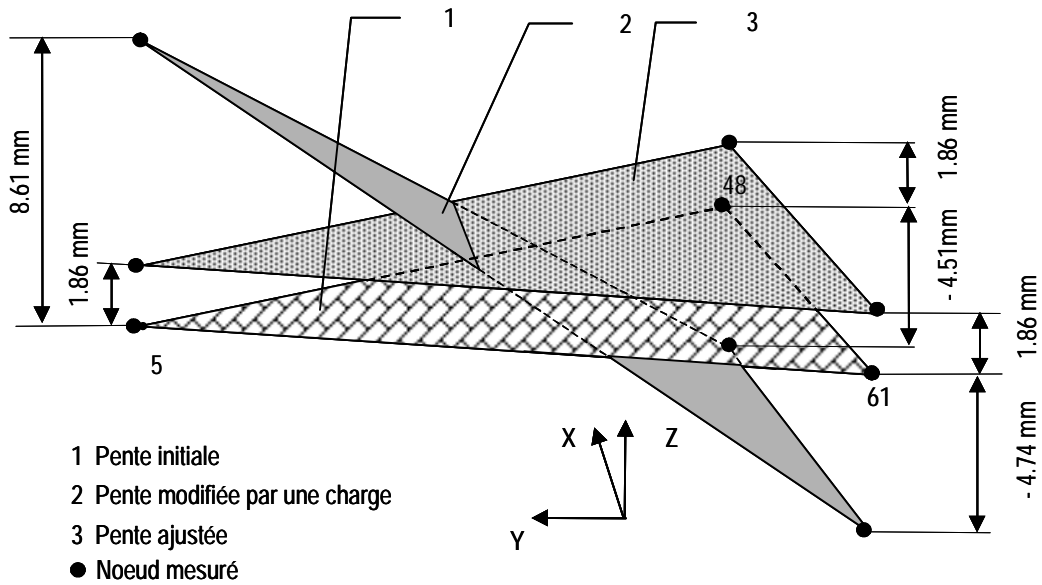


Figure 4.20: Schéma des déplacements simulés pour une solution générée par le recuit simulé avec le modèle structural implémenté dans la relaxation dynamique, cas de charge n°2

Modèle Equations 4.4 et 4.5	Pente modifiée [mm]				Pente ajustée [mm]			Amélioration de la réponse (%) Equation 4.6	
	Noeuds			Réponse structurale [mm] Equation 4.3	Noeuds				Réponse structurale [mm] Equation 4.3
	5	48	61		5	48	61		
Structural - simulé	8.61	-4.74	-4.51	10.81	1.86	1.86	1.86	0.00	100%
Structural - mesuré	8.97	-5.10	-3.89	11.03	-0.47	-0.34	-1.88	2.2	80%

Tableau 4.4: Comparaison des déplacements mesurés et simulés de la solution du Tableau 4.3 pour le cas de charge n°2. Les trois nœuds sont initialement à la même hauteur

Les paramètres influençant l’efficacité de l’amélioration de la réponse, mis en évidence ci-dessous, sont :

- l’amplitude initiale de la réponse structurale qui doit être compensée ;
- la position de la charge(s) ;
- la corrélation entre les modèles et les mesures pour les cas de charges considérés.

Pour le premier scénario, la Figure 4.21 montre que la commande est plus efficace pour le cas de charge n°1 (95 %) que pour le cas de charge n°2 (80 %), le cas de charge n°3 (58 %) et le cas de charge n°4 (46 %). De fait, le contrôle de la pente, utilisant cinq barres actives par module, est le plus approprié pour des charges asymétriques placées sur le contour de 3M. En corollaire, le contrôle de la forme est plus efficace quand les déplacements sont grands.

Pour le cas de charge n°1, les deux modèles permettent de compenser presque intégralement les déformations mesurées sur la structure (95% et 96%). Pour les cas de charge n°3 et n°4, les mesures montre que les commandes issues du modèle structural n’impliquent que 16 % et

35 % d'amélioration de la réponse, alors que le modèle étalonné conduit à 58 % et 46 % d'amélioration de la réponse. Tandis que l'utilisation du modèle étalonné autorise des prédictions correctes, celle du modèle structural n'est pas très précis pour les cas de charge centraux (Cas de charge n°3 et 4). Dans les cas où l'application d'une seule commande ne suffit pas pour atteindre l'objectif de contrôle, il est possible de continuer le contrôle, les modifications des longueurs des barres, en démarrant de la nouvelle configuration déformée. Ce processus itératif est semblable à celui d'une structure dont la boucle de contrôle fermée conduit à convergence très probable.

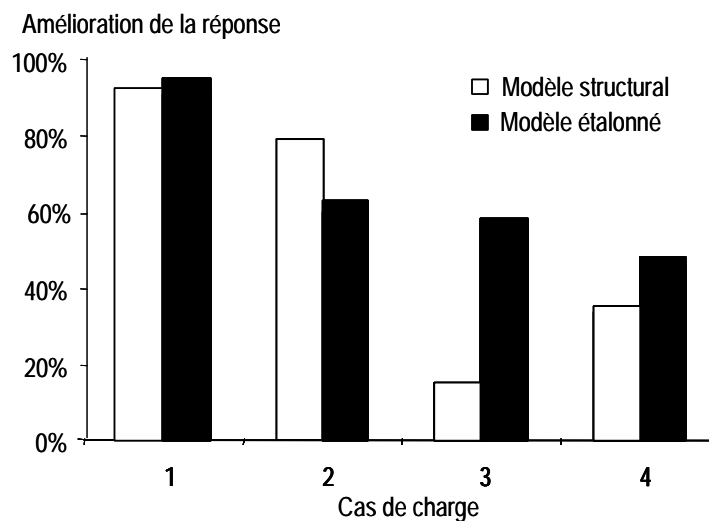


Figure 4.21: Contrôle de la pente avec cinq barres actives par module

Pour le scénario limitant le nombre de barres actives (Figure 4.22), la commande est plus efficace pour le cas de charge n°4 (100 %) que pour le cas de charge n°1 (99 %), le cas de charge n°2 (97 %) et le cas de charge n°3 (81 %). Cette constatation souligne que le contrôle de la forme, limité à deux barres actives par module, est efficace pour les sollicitations asymétriques et centrales.

Ce classement de l'efficacité des commandes repose sur des prédictions utilisant le modèle étalonné. Bien que utilisation du modèle structural conduise à des bons résultats pour les cas de charge asymétriques (78 % et 81 %), elle n'est pas assez précise pour les cas de charge centrale (Cas de charge n°3 et 4), (54 % et 30 %). Considérant le contrôle de la forme, limité à deux barres par module, l'utilisation d'un modèle étalonné avec des mesures conduit à une plus grande précision. A nouveau, la continuation du contrôle en démarrant avec une nouvelle configuration déformée permettrait de converger itérativement vers l'objectif. Compte tenu que l'utilisation des mesures pour corriger le modèle conduit à de meilleurs résultats, l'amélioration de la réponse pourrait progresser en greffant une technique de correction plus sophistiquée telle qu'un réseau artificiel de neurones.

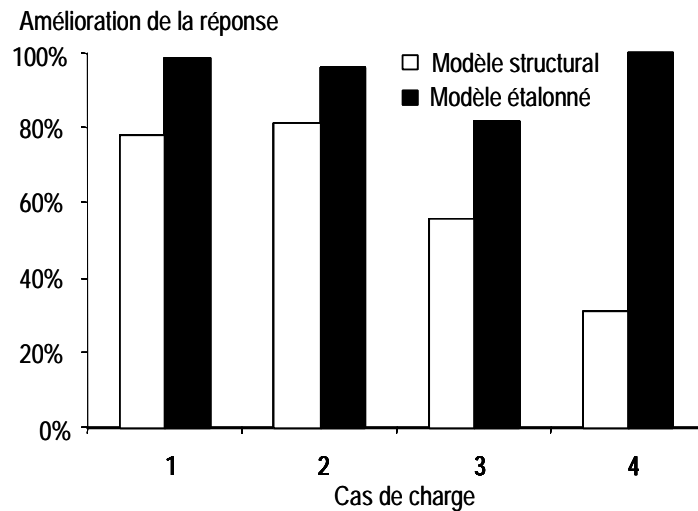


Figure 4.22: Contrôle de la pente avec deux barres actives par module

L'observation de la Figure 4.21 et de la Figure 4.22 met en évidence que les deux scénarios consentent une amélioration de la réponse significative pour le cas de charge n°1. Par contre, la restriction du nombre de barres actives de cinq à deux permet un contrôle de la forme plus précis, et cela plus particulièrement avec le modèle étalonné. Cette constatation non intuitive peut s'expliquer par une observation courante dans la modélisation appliquée : l'utilisation d'un modèle surparamétré, cumulant pour chacun de ces paramètres une erreur supplémentaire, conduit à une erreur globale importante. Elle confirme la tendance proposée par Smith [131].

Le deuxième scénario, limitant le nombre d'éléments actifs à deux par module, était motivé par le choix de la position des actuators dans la structure active 5M. Cette disposition devait être symétrique pour répartir le poids de ceux-ci. Pour les résultats de la Figure 4.22, les dispositions des barres actives dans les cas de charge n°1 à n°3 sont semblables : le couple des barres B3 et B6 du Module 3 et leur complémentaire pour le Module 1 (B31 et B35) et Module 2 (B62 et B66) (Figure 4.6). Dans ce cas, les barres sont placées en ligne, une barre est connectée à la couche inférieure et une autre à la couche supérieure. Les couples des barres B3 et B5 du Module 3, B31 et B36 du Module 2, et, B62 et B64 du Module 1 ont été choisis pour le cas de charge n°4. Bien que pour le cas de charge n°4, une autre disposition a été adoptée, une commande équivalente a été trouvée pour la disposition précédente. Pour les cas de charge étudiés, il ressort qu'une disposition de barres placées en ligne est efficace.

## 4.6 Conclusions partielles

L'analyse structurale d'un système non linéaire géométrique dont la rigidité des éléments est unilatérale est complexe : les essais numériques et expérimentaux du comportement statique de la structure ont montré que la relaxation dynamique associée à un modèle est robuste et rapide pour simuler le comportement aussi bien des charges verticales ponctuelles et multiples que l'allongement des barres télescopiques. Les essais effectués sont une des premières réalisations dans laquelle le comportement non linéaire identifié numériquement est confirmé et concorde avec des données expérimentales.

Les essais de charge sur 3M ont souligné que :

- la technique expérimentale est robuste et reproductible ;
- le comportement est localement linéaire pour des charges ponctuelles verticales (0-860N);
- cette caractéristique n'autorise néanmoins pas la simplification de l'analyse du comportement en appliquant l'hypothèse de superposition même pour des petits déplacements. De fait, chaque cas de charge nécessite une nouvelle simulation numérique compte tenu de la non-linéarité géométrique;
- quand 3M est soumise à une sollicitation asymétrique (sur son contour), la structure est plus souple ;
- des perturbations telles que les frottements et la relaxation dans les câbles peuvent perturber le comportement de la structure.

Nous avons pu comparer le comportement statique de la structure 3 modules, à celui de la structure 5 modules. Il ressort de cette comparaison des similitudes de comportement pour les deux configurations :

- la technique expérimentale est robuste et reproductible, le comportement est localement linéaire pour des charges ponctuelles verticales ;
- cette caractéristique n'autorise néanmoins pas la simplification de l'analyse du comportement en appliquant l'hypothèse de superposition même pour des petits déplacements. De fait, chaque cas de charge nécessite une nouvelle simulation ;
- des perturbations telles que les frottements et la relaxation dans les câbles peuvent altérer le comportement de la structure.

Les essais montrent la complexité du comportement des structures de tensegrité et la nécessité d'aborder la détermination de la commande d'une autre façon car la linéarisation n'est pas

valable. De plus, le contrôle de la forme ne peut pas être abordé par les techniques classiques d'automatique dans les cas de non existence de relation directe entre les sollicitations et la géométrie de la structure. Ce critère, ne limitant pas la recherche d'une commande à une solution unique ou vers un état connu, aucune technique classique n'a pu être identifiée.

Les essais du contrôle de la forme de 3M, en appliquant la nouvelle approche de la détermination de la commande, ont mis en évidence que :

- bien que la structure soit plus sensible aux charges asymétriques et son comportement soit non linéaire, la structure a le potentiel de remplir un critère d'aptitude au service en étant équipée d'un système de contrôle agissant sur les longueurs des éléments comprimés ;
- bien que la taille de l'espace des solutions soit exponentielle, la combinaison du recuit simulé et de la relaxation dynamique permet de naviguer dans cet espace et de déterminer une commande ;
- un nombre maximal d'éléments actifs ne conduit pas obligatoirement à une amélioration de la performance du contrôle de la pente de la structure ;
- la limitation à deux éléments actifs à disposition symétrique dans le module souligne qu'un bon compromis consiste à placer les barres en ligne.
- l'utilisation d'un modèle étalonné par des mesures améliore la précision des commandes appliquées pour les cas de charges considérés.

Par ailleurs, le comportement de la structure asymétrique, composée de cinq modules, se rapprochant d'une configuration réelle, est plus complexe et de fait difficilement prévisible. Cette structure sera motorisée au niveau des barres et équipée de capteurs. Leur implantation dans une boucle de contrôle permettra ainsi d'évaluer le potentiel de contrôler avec un nombre restreint d'actuateurs une structure de tensegrité au comportement non linéaire et couplé afin d'améliorer son comportement pour assurer un critère d'aptitude au service.





## 5 Contrôle actif en mode quasi-statique

Ce chapitre illustre les premiers essais, jamais réalisés sur une structure active de type tensegrité proche d'une configuration réelle. Les études sur la structure composée de trois modules (section 4) ont montré la faisabilité du contrôle de la forme (commande appliquée manuellement) d'un système sous-actionné et non linéaire. Ce chapitre illustre le contrôle actif en mode quasi-statique d'une structure plus complexe, et plus proche d'une configuration réelle, pour remplir un critère semblable d'aptitude au service. Un nombre limité de barres est motorisé pour contrôler la pente de la couche supérieure de la structure, sur laquelle serait fixée une toiture, composée de cinq modules.

Ce chapitre illustre l'application d'une nouvelle façon d'aborder le contrôle de systèmes qui ne peuvent pas être commandés par des techniques classiques d'automatique et l'intérêt de l'intégration d'un système actif pour ces structures. Les essais investissent la nouvelle façon d'aborder le contrôle pour des systèmes au comportement complexe dont l'aptitude au service est une priorité. Il propose une méthode sûre d'application de la commande dans un cadre réel.

Finalement, les résultats de ce chapitre apportent une réponse à la question scientifique de ce travail de doctorat : « Est-ce possible de créer une structure active de type tensegrité pour assurer un critère d'aptitude au service ? ».

### 5.1 Position des actionneurs

Compte tenu des résultats du chapitre précédent, soulignant l'efficacité et la précision d'un nombre limité d'actionneurs et la que surabondance d'actionneurs conduisant à une augmentation de l'incertitude globale sur la précision du contrôle de la forme de 3M, le nombre d'actionneurs de la structure active est limité à deux par module.

Chaque module est équipé de deux éléments actifs, vérins électriques; la structure globale compte alors dix actionneurs. De nombreux travaux ont été réalisés sur l'optimisation de l'emplacement des actionneurs pour satisfaire un ou plusieurs objectifs [1, 2, 15]. Cependant, ces techniques sont souvent fondées sur des hypothèses linéaires et donc non applicables à la structure. De plus, compte tenu qu'elles considèrent l'unicité de la solution (multiples

solutions pour le contrôle de la pente), celles-ci n'ont pas été investiguées pour la disposition des actuateurs pour contrôler la pente. La démarche suivie pour disposer les vérins sur la structure est déductive. Elle repose sur les contraintes placées au niveau global de la structure et sur le module, et sur les résultats de l'étude menée sur la structure composée de trois modules.

Le choix de la position des actuateurs sur la structure globale a été guidé par les critères suivants :

- vérin non connecté à un nœud mesuré ;
- vérin non connecté à un appui ;
- symétrie maximale, les vérins de chaque module sont disposés de la même façon ;
- nombre maximal de directions de mouvement sur la structure ;
- couplage maximal des actuateurs.

Le choix de la position des actuateurs sur le module a été guidé par les critères suivants ajoutés à ceux considérés pour la structure globale :

- la couche supérieure et la couche inférieure connectées à un vérin ;
- la répartition optimale des directions et des valeurs des forces sur le nœud central.

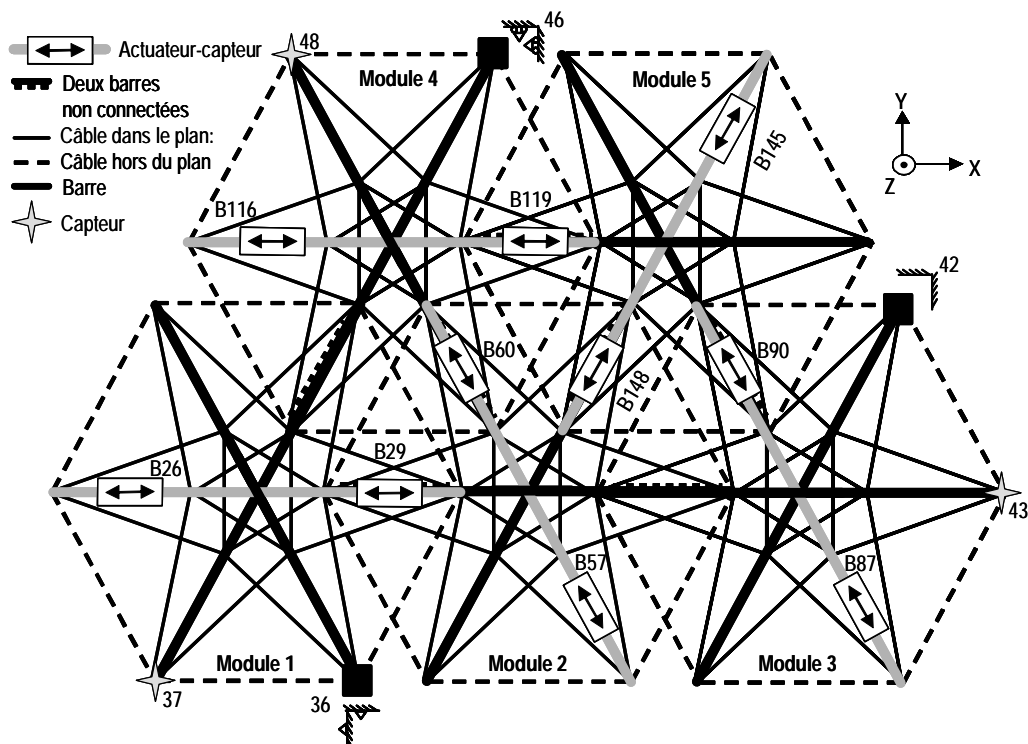


Figure 5.1: Position des actuateurs et capteurs de déplacement verticale

Compte tenu que les résultats du chapitre précédent ont mis en évidence qu'une disposition en ligne des vérins sur le module était efficace et plus précise pour contrôler la pente, cette même disposition a été adoptée. Finalement, la position déduite du compromis issu de toutes les contraintes imposées, est illustrée dans la Figure 5.1 et Tableau 5.1.

	Module 1		Module 2		Module 3		Module 4		Module 5	
Couche	supérieure	inférieure	supérieure	inférieure	supérieure	inférieure	supérieure	inférieure	supérieure	inférieure
Actuateur	B26	B29	B57	B60	B87	B90	B116	B119	B145	B148
Nœud mesuré	37				43		48			

Tableau 5.1: Position des actuateurs et des capteurs sur la structure 5M

## 5.2 Techniques numériques

### 5.2.1 Analyse statique et modèle structural

Les résultats du chapitre précédent ayant montré que la relaxation dynamique était adaptée pour la simulation du comportement de la structure de tensegrité composée de trois modules, celle-ci est utilisée pour simuler le comportement de la structure composée de cinq modules, 5M.

### 5.2.2 Contrôle de la forme

Dans l'optique de l'adaptation la forme de la structure avec des éléments télescopiques (barres actives), lorsqu'elle est soumise à des environnements changeants, des combinaisons de modification de longueur des barres sont à déterminer.

La structure de tensegrité, 5M, est équipée de capteurs et d'actuateurs de telle sorte que sa forme puisse être modifiée et mesurée. Le schéma de la Figure 5.2, explique le cheminement du contrôle. Dès que la structure est chargée, sa réponse est introduite dans un outil de recherche combinant un modèle de prédiction et un algorithme de recherche. La recherche d'une solution est guidée par des objectifs et bornée par des contraintes. La simulation du modèle de prédiction est réalisée par la relaxation dynamique. Le but de la recherche est de déterminer une combinaison d'allongement des dix barres motorisées, appliquée à la structure chargée, afin d'adapter sa forme. La nouvelle réponse de la structure est mesurée en continu afin d'évaluer l'efficacité de la solution appliquée et les étapes intermédiaires.

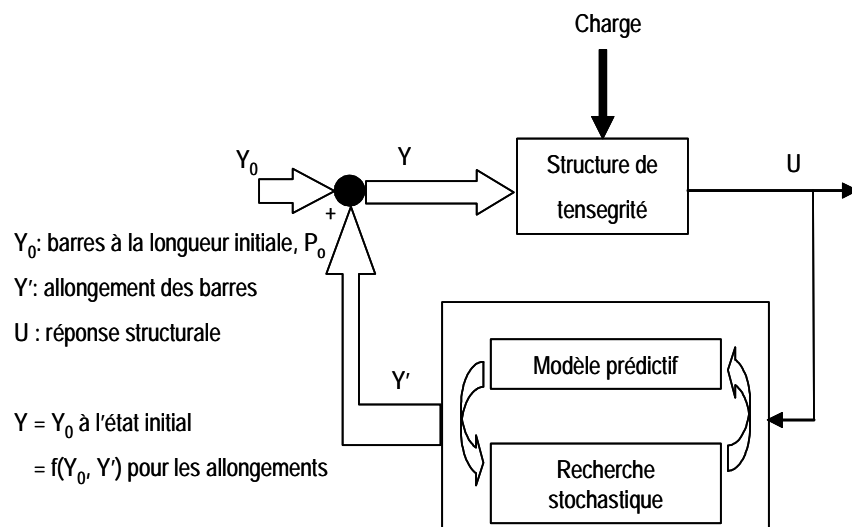
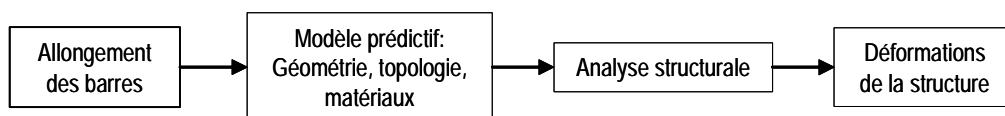


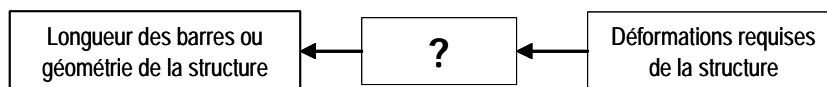
Figure 5.2: Boucle de contrôle pour le contrôle de la forme

La recherche d'une solution pour un tel système non-linéaire et complexe n'est pas triviale. Elle est difficilement réalisable en utilisant les techniques traditionnelles d'automatique. La difficulté de la détermination d'une commande de contrôle est située à deux niveaux :

- plusieurs commandes peuvent satisfaire le même objectif et les coordonnées finales de la structure sont inconnues avant d'avoir déterminé une commande ;
- il n'existe pas de formulation analytique directe entre les déformations de la structure et les allongements des barres (Figure 5.3).



a) relation entre la forme de la structure et ses déformations



b) relation entre les déformations voulues de la structure et la forme de la structure

Figure 5.3: Relations entre longueurs des éléments télescopiques et la géométrie de la structure

La détermination d'une solution nécessite la recherche et la génération d'une multitude de commandes, suivi d'une analyse structurale afin de vérifier que la commande satisfait l'objectif (Figure 5.2). La taille de l'espace exhaustif des solutions varie exponentiellement avec le nombre d'actuateurs. L'outil de recherche doit définir la barre à modifier et l'amplitude de la modification. Compte tenu de la précision des capteurs inductifs au

centième de millimètre mesurant le déplacement du piston du vérin, l'allongement des barres motorisées est distribué en incréments de 0.1 mm (10 fois la précision du capteur). Dans le cas de la structure étudiée, l'espace des solutions est discret. Il est défini par le nombre d'actuateurs et le nombre de longueurs différentes de chaque barre motorisée pour un incrément et une course prédéfinis. Soit  $N$ , le nombre exhaustif de combinaisons, est donné par l'Equation 5.1:

$$N = P^n \quad (5.1)$$

$P$  est le nombre de longueurs différentes que peut adopter une barre et  $n$  est le nombre de barres télescopiques. Pour 5M, dix barres sont actives, l'incrément de longueur est de 0.1 mm et la course est de 50 mm, le nombre de solutions s'élève à  $500^{10}$ . La taille de l'espace des solutions est réduite par l'adjonction de contraintes dans la recherche.

Une méthode de recherche stochastique permet de naviguer dans un tel espace de solutions et de définir des solutions selon des objectifs et des contraintes. Pour 3M, la technique du « recuit simulé » était utilisée. Pour 5M, Probabilistic Global Search Lausanne (PGSL), un nouvel algorithme de recherche développé à l'IMAC par Raphael et Smith [113, 112], est employé pour déterminer les commandes de contrôle.

PGSL est un algorithme de recherche stochastique reposant sur les probabilités. Il admet l'hypothèse que les meilleures solutions sont situées au voisinage de bonnes solutions. Pour chaque paramètre indépendant, il y a une fonction de densité de probabilité sur laquelle se fait une recherche (tirage au sort). Cette fonction est mise à jour automatiquement par l'algorithme en fonction des résultats de l'évaluation et selon un processus impliquant quatre boucles imbriquées (1<sup>ère</sup> boucle caractéristique du nombre d'échantillons, 2<sup>ème</sup> boucle pour le nombre de mise à jour de la probabilité, 3<sup>ème</sup> boucle pour le nombre de cycle de focalisation et la 4<sup>ème</sup> boucle pour le nombre de sous-domaines) (Figure 5.4).

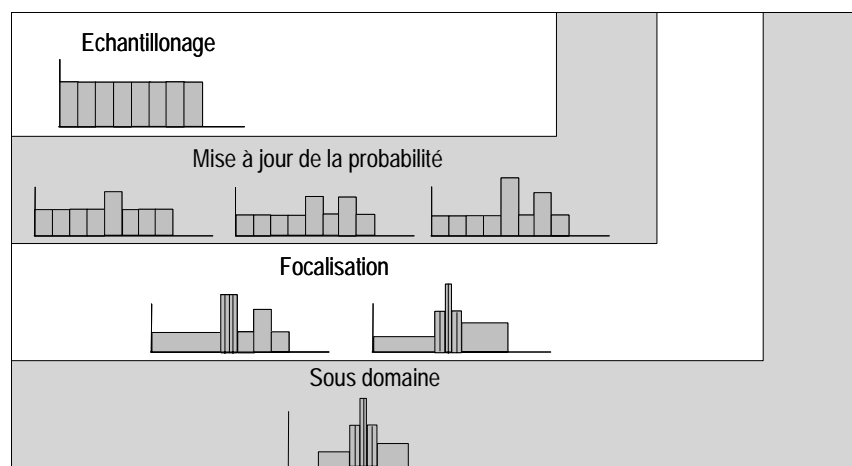


Figure 5.4: Schéma des quatre boucles imbriquées de PGSL [112,113]

Le processus s'arrête lorsque toutes les boucles ont été exécutées ou lorsque un seuil a été atteint. Les paramètres de configuration de l'algorithme sont conditionnés par le nombre de fois que chacune des boucles doit être exécutée. Contrairement au nombre important de paramètres à régler dans l'algorithme de recuit simulé, le nombre de paramètres de réglage PGSL est faible, ce qui le rend très facile à utiliser et à adapter à un nouveau problème [34].

Cette capacité d'adaptation a conditionné le choix de l'algorithme de recherche. PGSL a été donc choisi pour naviguer dans l'espace des solutions et déterminer une commande de contrôle. L'implantation de PGSL pour le contrôle de la structure a été réalisé par Domer [34].

### 5.2.2.1 Scénario de contrôle

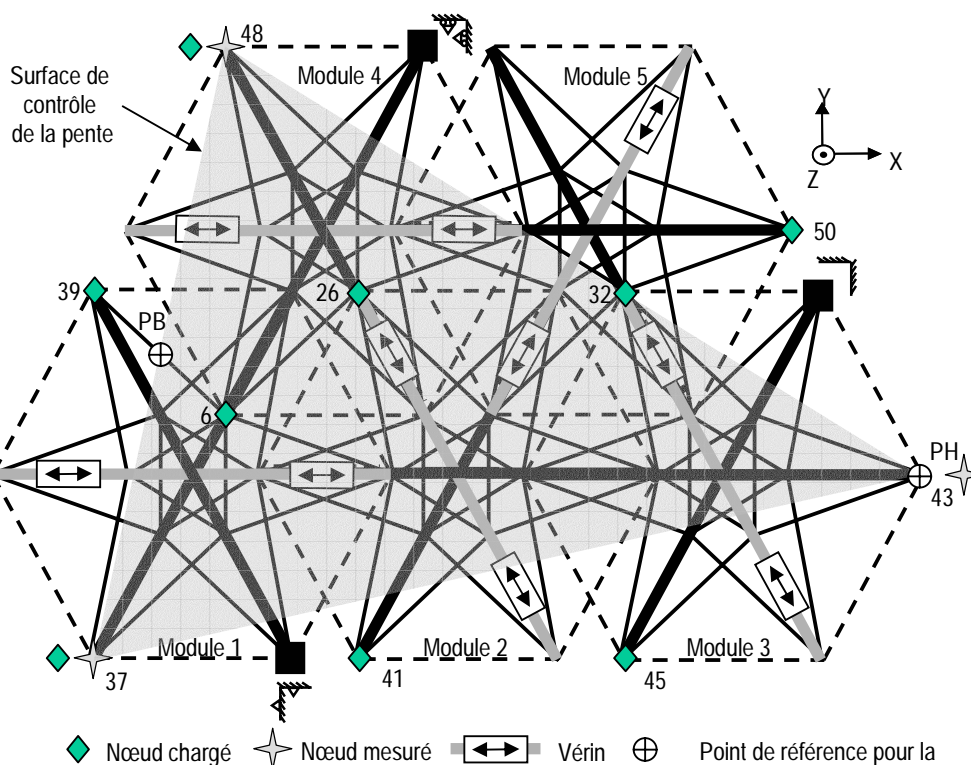
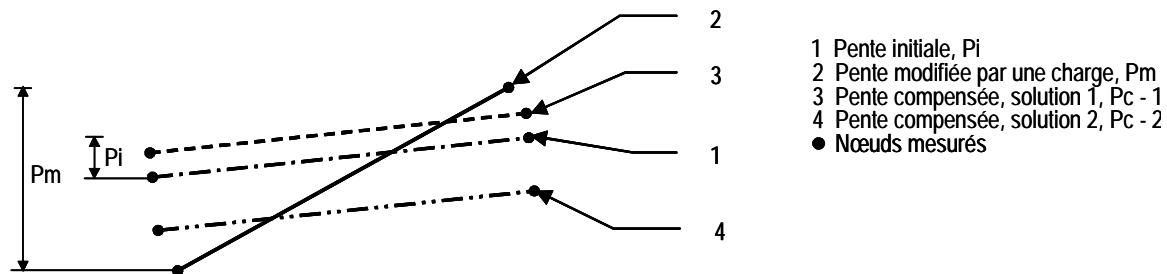


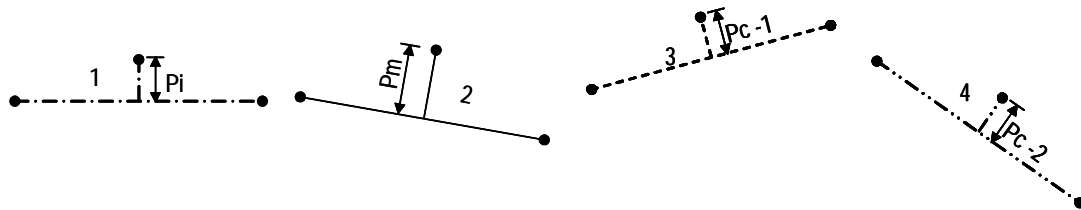
Figure 5.5: Vue en plan de 5M : Positions des noeuds mesurés et de référence pour la pente

L'objectif du contrôle de la forme de 5M est de maintenir la pente initiale de la couche supérieure de la structure sur laquelle pourrait être fixée un toit d'une halle d'exposition. Il s'agit d'un critère d'aptitude au service comparable à garantir l'écoulement de l'eau de pluie vers l'extérieur de la structure. Le comportement de la couche supérieure représentative est suivi par les déplacements de trois nœuds, 37, 43 et 48. Ils forment un triangle (Figure 5.5) aux sommets desquels serait attachée une toiture. Un capteur inductif, équipant chacun des

trois nœuds, mesure chaque déplacement vertical,  $\delta_i$ . Notons que chacun des nœuds mesurés appartient à un module appuyé.



a) Vue A-A, en élévation, longitudinalement à l'axe de contrôle



b) Vue B-B, en élévation, transversalement à l'axe de contrôle

Figure 5.6: Schéma du contrôle de la pente

La tâche du contrôle de la forme consiste à déterminer des modifications des longueurs des barres motorisées pour maintenir la pente initiale de la structure dès que celle-ci est altérée par une sollicitation extérieure (Figure 5.6). La pente linéique, soit la pente, est évaluée par la différence de hauteur de deux points appartenant au triangle : le point PH, Nœud 43, est le sommet le plus haut ; le point PB est le milieu du côté du triangle dont les extrémités sont le Nœud 37 et le Nœud 48.

$$\text{pente} = 100 \times \left( \left( \delta_{43} - \frac{(\delta_{48} + \delta_{37})}{2} \right)_{\text{initiale}} - \left( \delta_{43} - \frac{(\delta_{48} + \delta_{37})}{2} \right)_{\text{modifiée}} \right) [10^{-2} \text{ mm}] \quad (5.2)$$

$$\text{pente} = 100 \times (\text{pente}_{\text{initiale}} - \text{pente}_{\text{modifiée}}) [10^{-2} \text{ mm}] \quad (5.3)$$

A la différence de 3M, structure symétrique, pour laquelle les sommets du triangle de contrôle étaient à la même altitude, la configuration asymétrique de 5M et les déformations issues du poids des actuateurs impliquent des altitudes différentes des sommets du triangle de contrôle. De fait, une nouvelle formulation plus réaliste de l'objectif est définie (Equation 5.2).

Le niveau d'autocontrainte de la structure est introduit en allongeant les barres uniformément de 2.5 mm par rapport à la configuration des barres à autocontrainte nulle (1296 mm). Leur longueur uniforme s'élève alors à 1298.5 mm ; elle est considérée comme la position initiale des barres. Le déplacement du piston des vérins, raccourcit ou allonge les barres actives autour de cette position et modifie l'état d'autocontrainte du système. Le niveau d'autocontrainte est plus faible que pour le contrôle de la forme de 3M. En effet, un niveau plus faible d'autocontrainte autorise de plus grands mouvements des éléments actifs avant

d'atteindre les limites fixées sur les matériaux et à leur géométrie tout en assurant une certaine rigidité.

Pour les essais menés sur 5M, les modifications des longueurs des barres ont été effectuées grâce aux vérins électriques commandés par un programme Labview (Section 3.4.3). L'incrément de longueur est de 0.1 mm. Compte tenu de la charge critique de flambage des barres passives, de la contrainte maximale du Fiberline et de la poussée du vérin, le changement de la longueur des barres actives est limité à +/- 25 mm. La contrainte maximale autorisée dans les câbles intègre un facteur de sécurité deux par rapport à la contrainte de rupture (Chapitre 3 et [43]), soit  $\sigma_{\text{max-câble-autorisé}} = 613 \text{ N/mm}^2$ . Considérant les essais de flambage effectués sur des barres passives (Chapitre 3 et [86]), la force maximale,  $f_{\text{max-barre-autorisée}}$ , autorisée dans les barres s'élève à 20 000 N. La force maximale dans les barres actives est limitée à 20 000 N. Compte tenu du poids des vérins qui pourrait déstabiliser un module faiblement autocontraint, une force minimale de 2000 N est fixée dans les barres actives.

Contraintes						Objectifs		
Force maximale [kN]		Force minimale [kN]	Contrainte Maximale [MPa]	Course [mm]		Incrément [mm]	Pente initiale [10 <sup>-2</sup> mm]	Seuil [10 <sup>-2</sup> mm]
Barre active	Barre passive	Barre active	Câble	Min.	Max.	Barre active	1130	20
20	20	2	613	-25	25	0.1		

Tableau 5.2: Contraintes et objectifs imposés pour la recherche d'une commande

La recherche de solutions, effectuée par PGSL, s'appuie un modèle, *modèle structural*, pour analyser le comportement de la structure soumise à des changements de longueur de ces éléments comprimés. Le *modèle structural*, simulant les déplacements  $\delta_i$ , est construit sur la base de la géométrie, topologie, conditions aux limites et propriétés des matériaux, est analysé par la relaxation dynamique (Annexe 1).

La barre active, équipée d'un vérin électrique, doit être introduite dans le modèle structural comme un élément barre. Le poids du vérin (40kg), réparti non uniformément sur 40 cm de la barre, impliquant des déformations négligeables de flexion, seule la rigidité unilatérale est prise en compte. Considérant l'actuateur infiniment rigide, la rigidité d'une barre active est introduite dans le modèle par un module de Young équivalent pour une même section et longueur de barre. Compte tenu du poids additionnel du vérin, des charges sont appliquées aux nœuds de l'élément. Le centre de gravité du vérin n'étant pas placé au milieu de la barre, les charges aux extrémités de l'élément sont différentes et proportionnelles à la distance au centre de gravité-extrémité de l'élément. Par ailleurs, les assemblages modulaires ayant été rigidifiés, les modules de Young des câbles ont été recalculés.



La technique de recherche stochastique utilise ce modèle pour déterminer les allongements des barres afin rétablir la pente initiale. De fait, l'objectif de la recherche est de minimiser la valeur absolue de la pente définie par l'Equation 5.2 (Equation 5.4), de telle sorte que le Nœud 43 soit le plus haut du triangle de contrôle (Equation 5.5).

$$\min \left( 100 \times \left| \text{pente}_{\text{initiale}} - \left( \delta_{43} - \frac{\delta_{48} + \delta_{37}}{2} \right)_{\text{modifiée}} \right| \right) \quad (5.4)$$

tel que 
$$\delta_{PB} = \frac{\delta_{48} + \delta_{37}}{2} \quad (5.5)$$

La minimisation est bornée par un seuil, reflétant la précision des capteurs inductifs. Une précision choisie de 0.1 mm (10 fois la précision du capteur) implique sur une variation de la pente donné par

$$\text{seuil} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial \text{pente}}{\partial \delta_i} \right| \Delta \delta_i \quad (5.6)$$

$n$  est le nombre de variable et  $\Delta \delta_i$  est la précision de la mesure pour chaque capteur

$$\text{seuil} = \left| \frac{\partial \text{pente}}{\partial \text{pente}_{\text{initiale}}} \right| \Delta \delta_{\text{pente}_{\text{initiale}}} + \left| \frac{\partial \text{pente}}{\partial \delta_{37}} \right| \Delta \delta_{37} + \left| \frac{\partial \text{pente}}{\partial \delta_{43}} \right| \Delta \delta_{43} + \left| \frac{\partial \text{pente}}{\partial \delta_{48}} \right| \Delta \delta_{48} \quad (5.7)$$

$$\Delta \delta_{\text{pente}_{\text{initiale}}} = \Delta \delta_{37} = \Delta \delta_{43} = \Delta \delta_{48} = 0.1 \quad (5.8)$$

$$\Rightarrow \text{seuil} = 2 \Delta \delta_i = 20 \quad (5.9)$$

Quand une solution a été trouvée, la commande brute n'est pas appliquée directement à la structure. Compte tenu que le régime de contrôle est quasi-statique, les barres actives sont allongées l'une après l'autre. Considérant que la valeur d'une commande peut atteindre un allongement positif de 25 mm, des barres passives flamberaient, la contrainte maximale du Fiberline ou limite d'élasticité des câbles seraient atteintes. De fait, la commande appliquée est fractionnée en allongement maximal de 3.2 mm (allongement maximal brute divisé par 8). Pour des raisons expérimentales, la valeur absolue minimale de l'allongement fractionné est limitée à 0.1 mm ; dans ce cas l'allongement de la barre n'est pas fractionné et appliqué en une seule étape. Par exemple, si une solution contient un allongement de 25 mm et si la valeur minimale absolue de l'allongement est supérieure à 0.8 mm, l'application de la commande de contrôle est réalisée en 80 étapes. La séquence choisie pour l'application de la commande contribue à minimiser l'énergie interne de la structure. De fait, les barres sont allongées dans l'ordre croissant de la valeur de la consigne. Chaque étape est simulée afin de vérifier que les limites sur la géométrie et les matériaux ne sont pas atteintes. Si la simulation souligne que la force dans un élément approche la limite fixée, une nouvelle séquence est adoptée. La vérification numérique de la séquence étant faite, la commande est appliquée à la structure.

Dans le cas d'une structure active en service, au comportement complexe, l'application de la commande barre par barre est procédure la plus sûre.

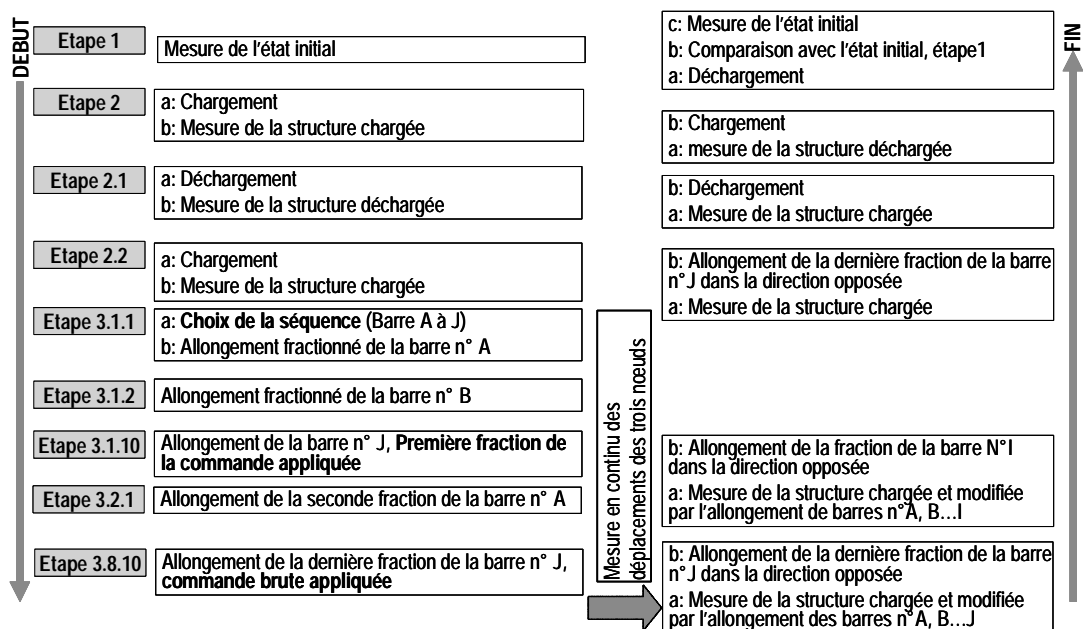


Figure 5.7: Procédure de chargement pour le contrôle de la pente

Un essai, durant lequel l'effet des allongements des barres A à J sur la pente modifiée est mesuré en continu, est divisé en trois étapes (Figure 5.7) :

- **Etape 1** : l'état initial de la structure est mesuré. Les hauteurs des nœuds 37, 48 et 43 sont mesurées par les capteurs inductifs ;
- **Etape 2** : la structure est chargée et mesurée. La structure est chargée et déchargée trois fois afin de vérifier la reproductibilité de son comportement ;
- **Etape 3** : les trois déplacements sont mesurés et la recherche d'une solution est lancée. La solution est une commande, composée d'élongations et de raccourcissements appliquée par les barres actives. La commande est fractionnée. L'application de la commande fractionnée débute par la modification de la longueur de la barre A et se poursuit dans l'ordre alphabétique jusqu'à la dernière barre. Pendant chaque étape, les déplacements des trois noeuds sont mesurés afin de se parer contre une éventuelle divergence du système ou noter l'apparition d'une solution intermédiaire. Là encore, si une observation visuelle soupçonne un comportement anormal de la structure, l'application de la commande est stoppée et la séquence est modifiée. Une fraction de la consigne étant atteinte, la seconde fraction de la commande est appliquée en commençant par la barre A jusqu'à la dernière barre. L'intégralité de la commande brute étant appliquée, les déplacements finaux sont

comparés aux simulations. Le retour à la configuration initiale est atteinte en appliquant la séquence aller dans le sens opposé. L'état final déchargé est comparé avec l'état initial. Si la compensation de la pente atteint 80 %, celle-ci est stockée.

Le scénario consistant à contrôler la pente par les déplacements des sommets d'un triangle est bien adapté à une petite structure. Pour une structure plus importante comportant des dizaines ou centaines de modules, le contrôle de plusieurs triangles permettrait à la fois d'atteindre plusieurs objectifs basés sur ce même support. En effet, le contrôle local de triangles autoriserait de contrôler la pente globale ou la courbure de la toiture.

### 5.2.2.2 Cas de charge

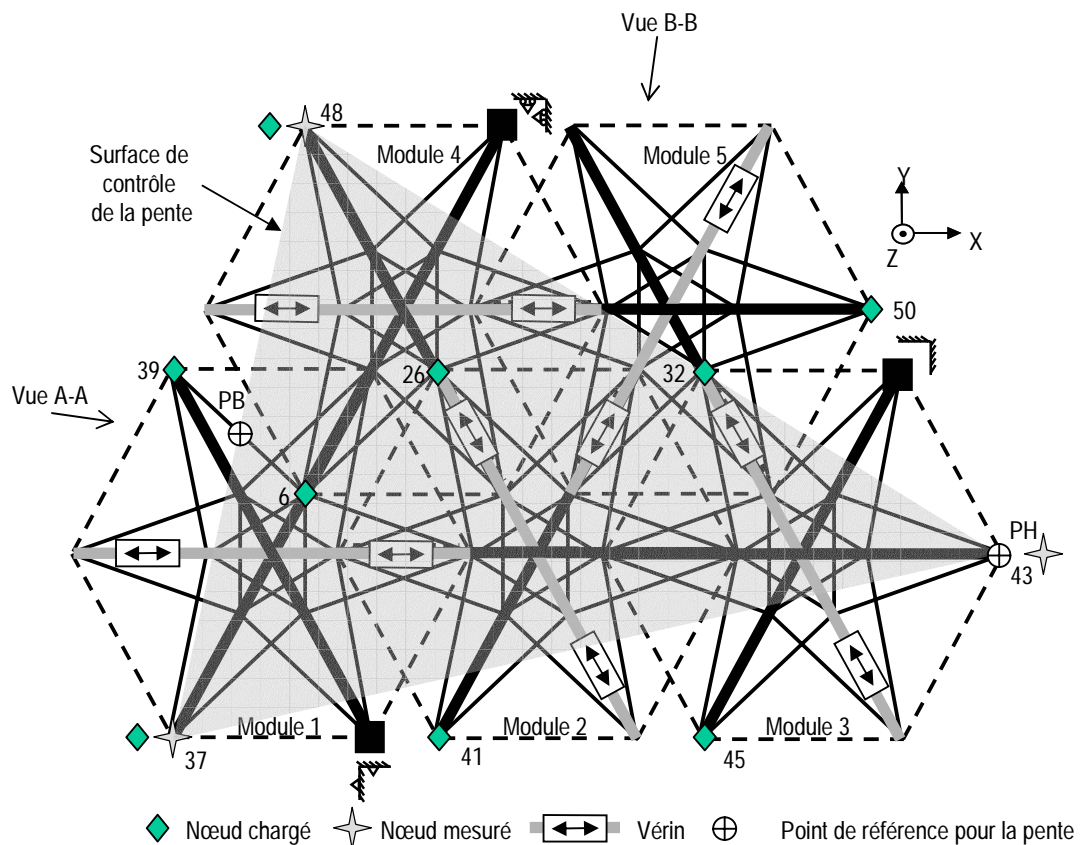


Figure 5.8: Positions des charges sur la couche supérieure de la structure

Le contrôle de la pente est étudié pour vingt cinq cas de charge répartis entre des charges ponctuelles appliquées à un nœud unique et des charges appliquées simultanément à deux nœuds de la structure (Tableau 5.3). Les cas de charge appliqués à la structure cinq modules sont des charges descendantes verticales ponctuelles. Elles font parties des charges de service et sont celles pour lesquelles ce type de structure est très sensible. Les valeurs des charges

misés en oeuvre ne sont pas représentatives quantitativement des charges réelles, cependant compte tenu qu'il a été démontré que les phénomènes non-linéaires et le couplage sont présents même pour des charges de valeurs faibles, les intensités de charge ont été choisies afin de ne pas atteindre les limites de la structure et de risquer de créer des déformations irréversibles. Les nœuds sollicités appartiennent à la couche supérieure de la structure. Des valeurs différentes de charge sont appliquées à chaque nœud chargé. Celles-ci ont été choisies dans le but de créer une valeur absolue de pente du même ordre de grandeur pour les différents nœuds sollicités. Ces trois valeurs absolues de pente sont environ 400, 600 et 750  $10^{-2}$  mm. De fait, la sensibilité du triangle de contrôle à la position de la charge est mise en évidence.

Type du cas de charge	Numéro du nœud chargé	Charge appliquée par nœud [N]	Numéro du module	Pente simulée [ $10^{-2}$ mm]	Convergence d'un actuateur
<b>CHARGE PONCTUELLE</b>					
1- Centrale	26	625	1 et 2	-413	oui
2- Centrale	26	900	1 et 2	-580	oui
3- Centrale	26	1209	1 et 2	-760	oui
4- Centrale	32	625	3 et 5	-437	oui
5- Centrale	32	859	3 et 5	-597	oui
6- Centrale	32	1092	3 et 5	-753	oui
7- Asymétrique	37	391	1	-417	non
8- Asymétrique	37	550	1	-589	non
9- Asymétrique	37	700	1	-752	non
10- Asymétrique	48	391	4	-428	non
11- Asymétrique	48	550	4	-603	non
12- Asymétrique	48	700	4	-769	non
13- Centrale	6	1092	1 et 4	-414	non
<b>CHARGE DEUX NOEUDS</b>					
14- Longitudinale	37 et 45	391	1 et 3	-384	non
15- Longitudinale	37 et 45	624	1 et 3	-607	non
16- Longitudinale	37 et 45	742	1 et 3	-719	non
17- Asymétrique	39 et 48	157	1 et 4	425	non
18- Asymétrique	39 et 48	215	1 et 4	583	non
19- Asymétrique	39 et 48	274	1 et 4	743	non
20- Couplant	41 et 50	391	2 et 5	397	non
21- Couplant	41 et 50	624	2 et 5	615	non
22- Couplant	41 et 50	742	2 et 5	719	non
23- Transversale	45 et 48	391	3 et 4	-396	non
24- Transversale	45 et 48	624	3 et 4	-626	non
25- Transversale	45 et 48	742	3 et 4	-741	non

Tableau 5.3: Cas de charges appliqués à la structure

Pour chaque cas de charge, un essai a été répété trois fois afin de vérifier la reproductibilité du comportement. Le cas de charge deux nœuds a été réalisé à l'aide d'un palonnier permettant d'appliquer des charges simultanées.

La valeur minimale de la charge a été déterminée en fonction de la pente mesurée et de la reproductibilité de l'essai. En effet, pour un écart type maximal de  $10 \times 10^{-2}$  mm de la pente mesurée pour un essai répété à trois reprises, la valeur minimale de la pente mesurée doit être au moins de  $300 \times 10^{-2}$  mm. Le facteur 30 correspond à deux fois la valeur de l'écart type et un facteur 15 limitant le bruit issu de l'incertitude sur la reproductibilité.

Les cas de charge ponctuelle sont représentés par :

- les cas de charge central n°1 à n°3 ; le nœud sollicité, Nœud 26, est situé à l'intérieur de la structure et à la connexion de deux modules, dont le Module 4 est mesuré et le Module 2 est non appuyé. Un actuateur converge au Nœud 26. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud ;
- les cas de charge central n°4 à n°6 ; le nœud sollicité, Nœud 32, est situé à l'intérieur de la structure et à la connexion de deux modules dont le Module 3 est mesuré et le Module 5 est non appuyé. Un actuateur converge au Nœud 32. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud ;
- les cas de charge asymétrique n°7 à n°9 ; le nœud sollicité, Nœud 37, est situé sur le contour de la structure, Module 1, et est mesuré. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud ;
- les cas de charge asymétrique n°10 à n°12 ; le nœud sollicité, Nœud 48, est situé sur le contour de la structure, Module 4, et est mesuré. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud ;
- le cas de charge central n°13 ; le nœud sollicité, Nœud 6, est situé à l'intérieur de la structure et à la connexion de deux modules appuyés, Module 1 et Module 4. Une valeur unique de charge est appliquée au nœud.

Le seul nœud de la couche supérieure appartenant aux deux modules non appuyés n'a pas été choisi car la valeur minimale de la charge à imposer pour atteindre une pente de  $300 \times 10^{-2}$  mm était trop élevée.

Les cas de charge deux nœuds sont représentés par (Tableau 5.3) :

- les cas de charge longitudinal n°14 à n°16 ; les nœuds sollicités, Nœud 37 et 45, appartiennent à des modules appuyés mais n'étant pas connectés, Module 1 et Module 3 (le Module 2 les relie). De plus, les deux nœuds appartiennent au contour de la structure et la droite passant par eux est parallèle à la direction X. Le Nœud 37 est mesuré. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud ;

- les cas de charge asymétrique n°17 à n°19 ; les noeuds sollicités, Nœud 39 et 48, appartiennent à des modules appuyés et connectés, Module 1 et Module 4. Les deux nœuds appartiennent au contour de la structure et sont très proches. Le Nœud 48 est mesuré. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud ;
- les cas de charge couplant n°20 à n°22 ; les noeuds sollicités, Nœud 41 et 50, appartiennent à des modules non appuyés, Module 2 et Module 5. Les deux nœuds appartiennent au contour de la structure. Aucun des nœuds chargés n'est mesuré. De fait, le couplage est important. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud ;
- les cas de charge transversale n°23 à n°25 ; les noeuds sollicités, Nœud 45 et 48, appartiennent à des modules appuyés, Module 3 et Module 4. Les deux nœuds appartiennent au contour de la structure. La droite passant par les deux nœuds coupe transversalement la structure. Le Nœud 48 est mesuré. Trois valeurs de charge sont appliquées au nœud.

Pour les cas de charge choisis, la pente est la plus affectée pour un chargement asymétrique deux nœuds sur le contour de la structure, Nœud 39 et Nœud 48, alors que la valeur de la charge appliquée doit être 3 fois plus grande pour un chargement ponctuel central au Nœud 26 pour créer une pente équivalente. Une charge ponctuelle placée sur le contour de la structure au Nœud 39, est la position de charge créant la pente la plus importante. La variation de la pente est plus sensible pour les cas de charge ponctuelle aux positions asymétriques sur le contour de la structure (Figure 5.8).

### 5.3 Résultats des essais

L'objectif du contrôle de la forme de 5M est de maintenir la pente initiale de la couche supérieure de la structure en modifiant la longueur des éléments comprimés. L'efficacité des allongements des barres sur le contrôle de la pente est évaluée par l'Equation 5.10.

$$\text{pente compensée [\%]} = \left( 1 - \left| \frac{\Delta \text{pente}_{\text{mesurée}}}{\text{pente}_{\text{mesurée}}} \right| \right) \times 100 \quad (5.10)$$

où 
$$\Delta \text{pente} = \text{pente}_{\text{finale}} - \text{pente} \quad (5.11)$$

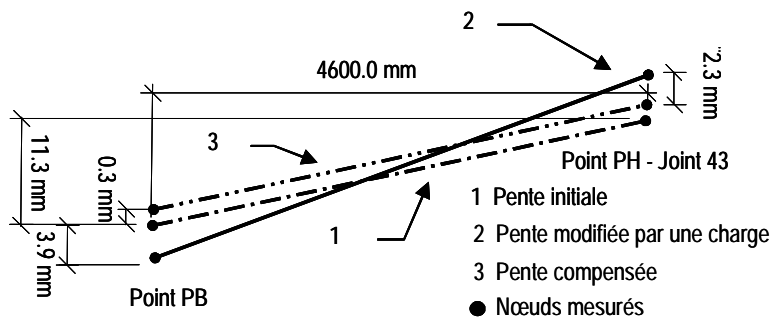
La  $\text{pente}_{\text{finale}}$ , est la  $\text{pente}$  après que la commande ait été appliquée. Elle est comparée à la  $\text{pente}_{\text{initiale}}$ . Une valeur de la  $\text{pente}_{\text{compensée}}$  supérieure à 95 % signifie que la commande appliquée à la structure chargée a permis de rétablir la  $\text{pente}_{\text{initiale}}$ .

Pour tous les cas de charge, les commandes (combinaisons d'allongement des barres) créent des changements efficaces dans la couche supérieure dépendant de l'objectif de rétablissement de la pente initiale. Bien que le comportement de structure est non-linéaire et que l'espace des solutions est exponentiel, cela démontre que la combinaison de PGSL et de

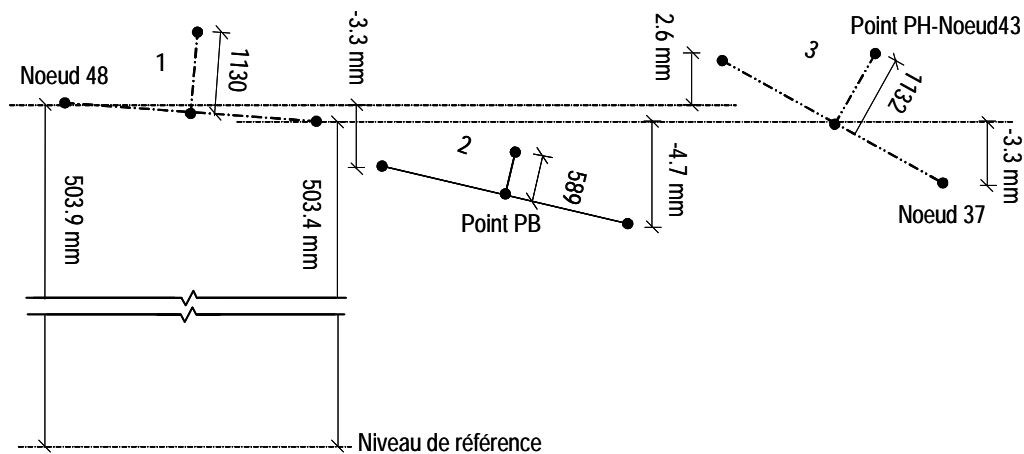
la relaxation dynamique a le potentiel d'identifier des bonnes commandes (Figure 5.9). Par exemple, deux solutions calculées pour le cas de charge n°8 sont répertoriées dans le Tableau 5.4 et le comportement mesuré et simulé pour ces solutions dans le Tableau 5.5.

Numéro de barre	29	57	119	145	90	26	60	116	87	148
Etape	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Allongement [mm] Fraction 1	-2.45	-2.21	-2.12	-1.48	-0.9	-0.87	0.8	1.16	1.45	1.57
Etape	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Allongement [mm] Fraction 2	-4.9	-4.42	-4.25	-2.97	-1.8	-1.75	1.6	2.32	2.9	3.25
Etape	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Allongement [mm] Commande brute	-7.35	-6.63	-4.46	-2.7	-2.6	2.4	2.4	3.49	4.35	4.75

Tableau 5.4: Exemple de la séquence d'une commande appliquée en trois fractions, cas de charge n°8



a) Vue A-A, en élévation, longitudinalement à l'axe de contrôle



b) Vue B-B, en élévation, transversalement à l'axe de contrôle

Figure 5.9: Schéma des déplacements de la compensation de la pente pour le cas de charge n°8

Une illustration graphique d'une de ces solutions est donnée par la Figure 5.9. Pour tous les cas de charge, les simulations du fractionnement de la commande ont souligné que les contraintes dans les éléments restaient dans la fourchette des valeurs autorisées.

	Pente Initiale [10 <sup>-2</sup> mm]	Pente modifiée				Pente finale				Pente compensée (%)
		Nœuds [mm]			pente [10 <sup>-2</sup> mm]	Nœuds			pente [10 <sup>-2</sup> mm]	
		37	48	43 PH		37	48	43 PH		
simulation	1130	498.8	500.6	516.9	-589	506.5	500.1	514.6	2	99
mesure	1130	498.9	500.9	516.8	-559	502.2	499.5	513.6	-145	75

Tableau 5.5: Exemple des déplacements et de la pente pour le cas de charge n°8

### 5.3.1 Charge ponctuelle

Sur les figures mettant en évidence l'évolution de la pente en fonction de l'étape de la commande appliquée, la ligne pleine correspond aux mesures prises sur la structure par le système de contrôle et les pointillés correspondent à la pente simulée par le modèle structural.

Les commandes appliquées à la structure ont été déterminées en s'appuyant sur le modèle structural. Une valeur de compensation de la pente supérieure à 95 % ou une pente voisine de zéro signifie que la pente initiale a été rétablie. Une valeur de la corrélation supérieure à 95 % signifie que la déviation du comportement simulé au comportement mesuré de la structure est non significative.

$$\text{corrélation [\%]} = \left( 1 - \left| \frac{\text{pente}_{\text{mesurée}} - \text{pente}_{\text{simulée}}}{\text{pente}_{\text{simulée}}} \right| \right) \times 100 \quad (5.12)$$

$$\text{déviation [\%]} = 100 - \text{corrélation} \quad (5.13)$$

#### 5.3.1.1 Corrélation initiale

La corrélation (Equation 5.12) entre la pente simulée et mesurée pour les cas de charge ponctuelle est illustrée dans la Figure 5.10. Pour tous les cas de charge ponctuelle, la corrélation entre le modèle structural et les mesures est supérieure à 78 %. De plus, la corrélation varie très peu entre les trois valeurs de charge appliquées à un même nœud (comparaison des cas de charge, n°1 à 3, n°4 à 6, n°7 à 9, n° 10 à 12). De fait, dans la fourchette de charges appliquées aux nœuds, la corrélation est presque constante. Notons que l'incertitude de mesure des capteurs inductifs sur la pente a plus d'influence sur les petites



charges. De plus, la variation faible de corrélation pour des charges à un même nœud peut provenir du frottement dans les assemblages.

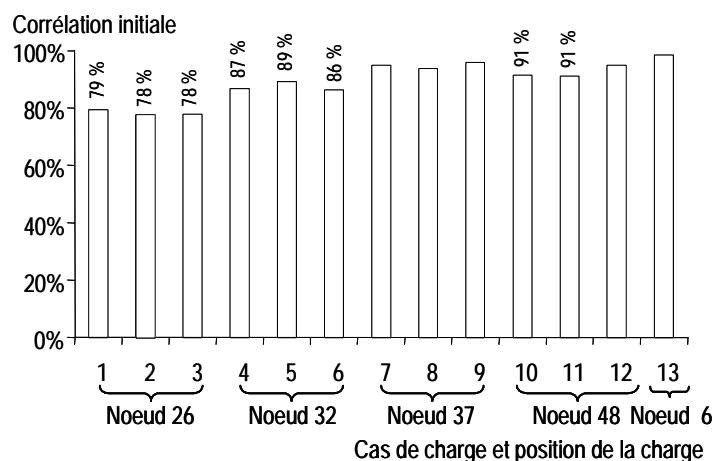


Figure 5.10: Corrélation entre la pente simulée par le modèle structural et mesurée pour les cas de charge ponctuelle

La déviation est non significative pour la charge au Nœud 6 (cas de charge n° 13). La déviation est faible pour des charges appliquées au Nœud 37 (6 %) et au Nœud 48 (8%). La déviation augmente pour les charges au Nœud 32 (12 %) et devient relativement importante aux autres cas de charge, pour les charges appliquées au Nœud 26. Remarquons que la corrélation est moins bonne (<90 %) pour des cas de charge centrale pour lesquels un vérin converge au nœud sollicité (cas de charge n°1 à 6).

### 5.3.1.2 Compensation de la pente

L'efficacité des commandes appliquées pour rétablir la pente initiale pour les cas de charge ponctuelle est illustrée dans la Figure 5.11. Pour tous les cas de charge ponctuelle, la commande appliquée autorise une compensation de la pente supérieure à 78 %. De fait, la position des actuators est adéquate pour les cas de charge ponctuelle et leur modélisation dans le modèle structural est cohérente. Pour neuf cas de charge sur treize, les modifications de longueur des barres permettent de compenser la pente modifiée par une charge et de retrouver la pente initiale (cas de charge n°1 à 6 et 10 à 12 – compensation > 95 %). L'efficacité de la commande, pour une charge asymétrique placée au Nœud 37, est accentuée légèrement avec l'augmentation de la valeur de la charge : la compensation varie de 8 % la charge la plus faible et la plus élevée (cas de charge n°7 et n°9). Bien qu'une incertitude de mesure puisse altérer les mesures, ce comportement est non intuitif. De fait, d'autres commandes devraient être appliquées pour vérifier si cette constatation se reproduit.

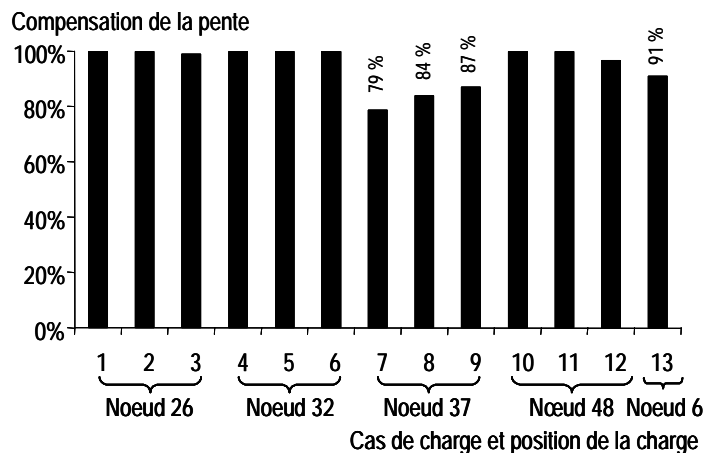


Figure 5.11: Compensation de la pente pour les cas de charge ponctuelle

La comparaison des résultats des différents cas de charge souligne que la position d'une charge verticale ponctuelle a peu d'influence sur l'efficacité de la compensation de la pente. Seules les commandes pour compenser la pente créée par des charges à un des nœuds asymétriques mesurés, Nœud 37 (cas de charge n°7 à 9), baissent faiblement l'efficacité de la compensation, alors que pour un autre nœud asymétrique et mesuré, Nœud 48, la pente compensée dépasse les 95 %.

La comparaison de la Figure 5.11 et Figure 5.10 souligne que l'application d'une commande, pour une déviation initiale non significative entre la pente mesurée et simulée, ne conduit pas forcément à une meilleure compensation de la pente. Bien que la corrélation, pour une charge appliquée au Nœud 26 n'est que de 78 % (moyenne pour les trois valeurs de charge, cas de charge n°1 à n°3), la compensation de la pente dépasse 95 %. La Figure 5.12 montre la convergence de la pente vers zéro alors que l'erreur initiale était de 78 %. Dans ce cas, l'intégralité de la commande n'a pas à être appliquée ; la compensation maximale est atteinte entre l'étape 9 et 10. Cette commande modifiée est stockée afin d'être réutilisée à l'avenir si la structure est sollicitée à ce nœud. D'autre part, l'allure des deux courbes sont semblables : le changement de monotonie de la pente à l'étape 4 et 6 est aussi mesuré. De plus, la convergence vers la solution est non-linéaire. En résumé, la Figure 5.12 témoigne la robustesse du système.

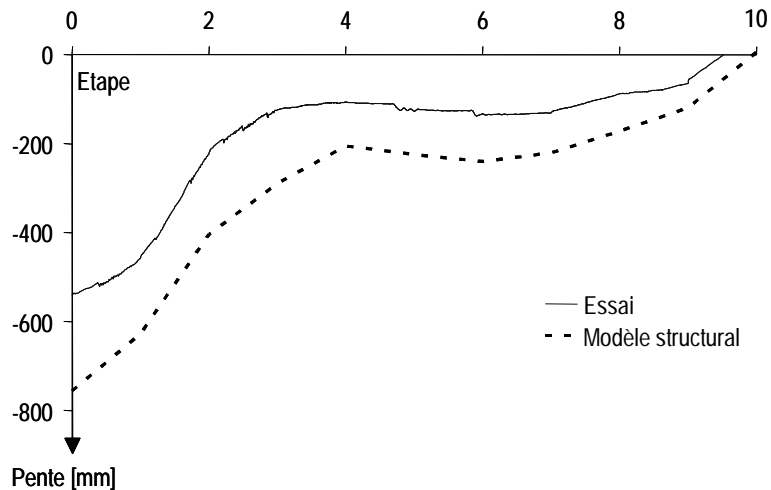


Figure 5.12: Robustesse du système, Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour un cas de charge ponctuelle, cas de charge n°3

Bien que la corrélation initiale, pour des charges appliquées au Nœud 37, dépasse 95 %, la compensation de la pente est en moyenne de 80 %. La Figure 5.13 montre que pour le cas de charge n°9, les allongements appliqués à la structure ne sont pas suffisants pour compenser intégralement la pente. Dans les cas où l'application d'une seule commande ne suffit pas pour atteindre l'objectif de contrôle, il est possible de continuer le contrôle, les modifications des longueurs des barres, en démarrant de la nouvelle configuration déformée. Compte tenu que la pente restant à compenser et que la valeur des allongements déjà appliqués sont faibles, un processus itératif de faible modification de longueur de barre pourrait mener à une compensation maximale.

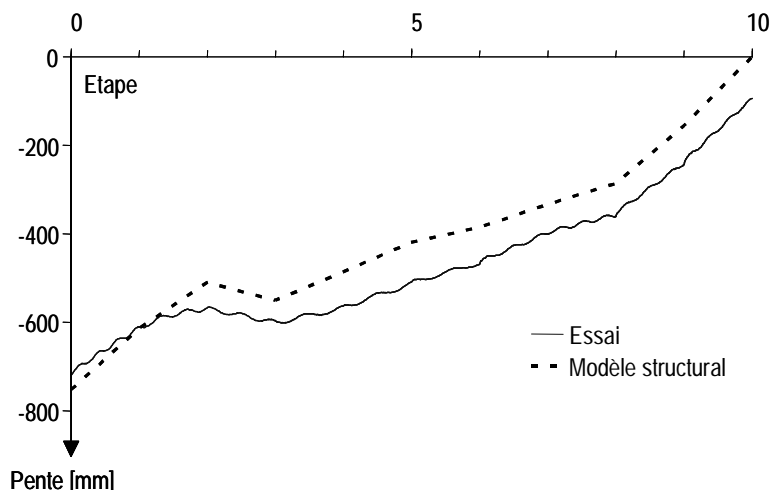


Figure 5.13: Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour le cas de charge n°9. Notez que la commande n'a pas été fractionnée

Les petites fluctuations sur les mesures sont dues à des vibrations provenant d'un essai de fatigue effectué dans le local limitrophe.

### 5.3.2 Chargement deux nœuds

Sur les figures mettant en évidence l'évolution de la pente en fonction de l'étape de commande appliquée, la ligne pleine correspond aux mesures prises sur la structure par le système de contrôle et les pointillés correspondent à la pente simulée par le modèle structural.

#### 5.3.2.1 Corrélation initiale

Pour tous les cas de charge ponctuelle, la corrélation entre le modèle structural et les mesures est supérieure à 72 %. De plus, la corrélation varie très peu entre les trois valeurs de charge appliquées à un même nœud (comparaison des cas de charge, n°14 à 16, n°17 à 19, n°20 à 22, n° 23 à 25). De fait, dans la fourchette de charges appliquées aux nœuds, la corrélation est presque constante. Notons que l'incertitude de mesure des capteurs inductifs sur la pente a plus d'influence sur les petites charges. De plus, la variation faible de corrélation pour des charges à un même nœud peut provenir aussi du frottement dans les assemblages.

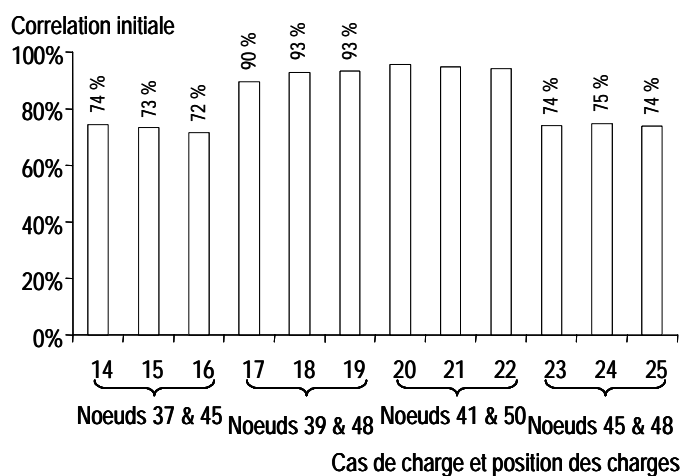


Figure 5.14: Corrélation entre la pente simulée par le modèle structural et mesurée pour les cas de charge deux nœuds

La déviation est non significative pour les charges simultanées au Nœud 41 et au Nœud 50 (cas de charge couplant n° 20 à 22). La déviation est faible (8%) pour des charges simultanées, appliquées au Nœud 39 et au Nœud 48 (cas de charge asymétrique n° 17 à 19). La corrélation moyenne est moins bonne (73 % et 74 %) pour des cas de charge longitudinale et transversale (cas de charge n° 14 à 16 et cas de charge n°23 à 25).

Pour les cas de charge couplant n°20 à n°22, bien que les nœuds chargés n'appartiennent pas aux modules mesurés, la corrélation entre pente mesurée et simulée est bonne.

### 5.3.2.2 Compensation de la pente

L'efficacité des commandes appliquées pour rétablir la pente initiale pour les cas de charge deux nœuds est illustrée dans la Figure 5.15. Pour dix cas de charge deux nœuds sur douze, la commande appliquée autorise une compensation de la pente supérieure à 86 %. Pour sept cas de charge sur douze, les modifications de longueur des barres permettent de compenser la pente modifiée par une charge et de retrouver la pente initiale (cas de charge n°14 à 16, 22 à 25 et n° 20 – compensation > 95 %). Les modifications de longueur des barres actives, pour le cas de charge couplant n°22, n'ont permis une compensation de la pente que de 65 %. De plus, considérant tous les cas de charges deux nœuds, la position des actuateurs est adéquate et leur modélisation dans le modèle structural est cohérente.

L'efficacité de la commande, pour un cas de charge couplant, charge au Nœud 41 et au Nœud 50, baisse avec l'augmentation de la valeur de la charge : la compensation baisse de 95 % à 76 % et 65 % (cas de charge n°20 à 22). Pour ces cas de charge, aucun des nœuds mesurés n'appartient aux deux modules chargés simultanément. Ces deux modules chargés ne sont pas appuyés. De fait, le couplage semble influencer l'efficacité du contrôle.

L'efficacité de la commande, pour cas de charge asymétrique deux nœuds, n'est pas cohérente : la compensation est meilleure pour la charge la plus élevée. (comparaison des cas de charge n°18 et n°19). De fait, une nouvelle commande devrait être appliquée pour vérifier si cette constatation se reproduit. Bien qu'une incertitude de mesure puisse altérer les mesures, ce comportement est non intuitif. Néanmoins, l'efficacité de la commande dépasse les 86 %.

La comparaison de la Figure 5.14 et Figure 5.15 souligne que l'application d'une commande, pour une déviation initiale non significative entre la pente mesurée et simulée, ne conduit pas forcément à une meilleure compensation de la pente. Bien que la corrélation initiale, pour deux cas de charge couplant, est supérieure à 95 % (cas de charge n°20 à n°21), la compensation de la pente n'est que de 76 et 65 %. Ici, le couplage entre module entre module affecte l'efficacité de la commande appliquée. Là encore, dans les cas où l'application d'une seule commande ne suffit pas pour atteindre l'objectif de contrôle, il est possible de continuer le contrôle, les modifications des longueurs des barres, en démarrant de la nouvelle configuration déformée.

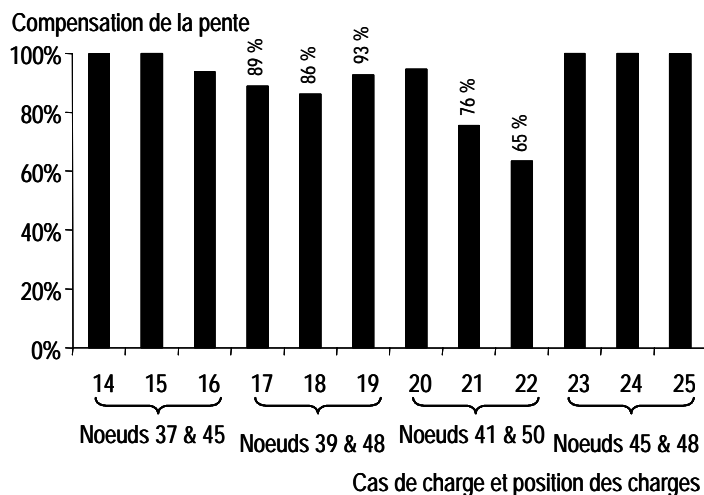


Figure 5.15: Compensation de la pente pour les cas de charge ponctuelle pour les cas de charge deux nœuds

Une corrélation initiale imparfaite ne conduit pas forcément à une mauvaise compensation de la pente. Bien que les corrélations initiales, pour les cas de charges n°14 à 16 et n°23 à 25 ne sont que respectivement de 74% et 73 % (moyenne pour les trois valeurs de charge), la compensation de la pente dépasse 95 %. Dans ces cas, l'incertitude initiale du comportement du système ne conduit pas, après l'application d'une commande, à une augmentation de l'incertitude : le système est robuste.

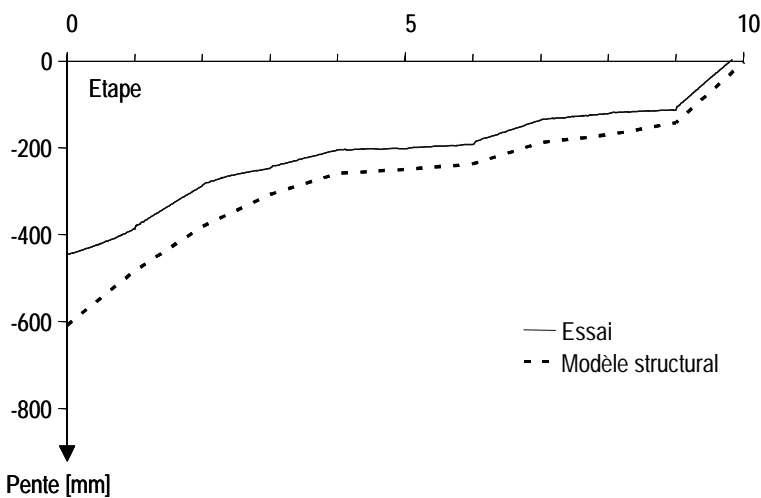


Figure 5.16: Robustesse du système. Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour un cas de charge deux nœuds, cas de charge n°15

La Figure 5.16 montre la convergence de la pente vers zéro alors que l'erreur initiale était de 74 %. Dans ce cas, l'intégralité de la commande n'a pas à être appliquée ; la compensation maximale est atteinte à la fin de la dernière étape. Cette commande modifiée est stockée afin

d'être réutilisée à l'avenir si la structure est sollicitée à ce nœud. D'autre part, l'allure des deux courbes sont semblables : la convergence vers la solution est non-linéaire.

La Figure 5.17 montre la convergence de la pente vers zéro alors que l'erreur initiale est de 73 % (cas de charge n°23). Dans ce cas, l'intégralité de la commande n'a pas à être appliquée ; la compensation maximale est atteinte à pendant l'avant dernière étape. Cette commande modifiée est stockée afin d'être réutilisée à l'avenir si la structure est sollicitée à ce nœud.

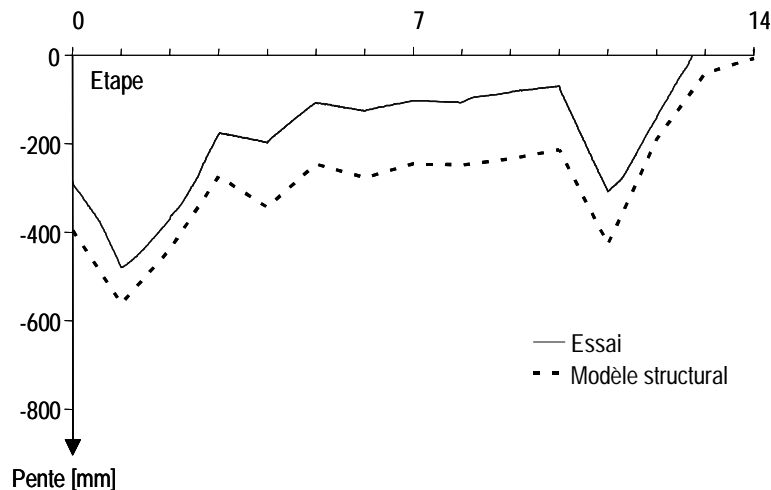


Figure 5.17: Robustesse du système. Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour un cas de charge deux nœuds, cas de charge n°23

D'autre part, l'allure des deux courbes sont semblables. La convergence vers la solution est non-linéaire et non monotone. Les changements de monotonie de la trajectoire de la pente mesurée et de la pente simulée sont respectés. L'allongement de certaines barres semble avoir une influence prépondérante sur la variation de la pente.

### 5.3.3 Comparaison des commandes de qualité équivalente

L'algorithme de recherche associé à la relaxation dynamique propose plusieurs solutions pour compenser la pente pour les différents cas de charge. Par exemple, pour le cas de charge n°14, deux solutions existent pour rétablir la pente initiale (Figure 5.18). Les deux courbes correspondent à la pente mesurée sur la structure. Remarquez qu'un nombre restreint de six barres actives est nécessaire pour atteindre l'objectif dans la solution 1. La comparaison avec la Figure 5.15, souligne une fois de plus la robustesse du système (corrélation initiale de 73 %). De plus, la compensation maximale est atteinte pour les deux solutions durant l'allongement d'une barre active. Ces deux commandes modifiées sont stockées afin d'être réutilisées à l'avenir si la structure est sollicitée à ce nœud. Pour des commandes équivalentes,

un critère doit être défini afin de choisir quelle solution appliquer. Compte tenu que l'application de la solution 1 nécessite, par exemple moins d'énergie (seulement six barres sont nécessaires), elle sera prioritaire.

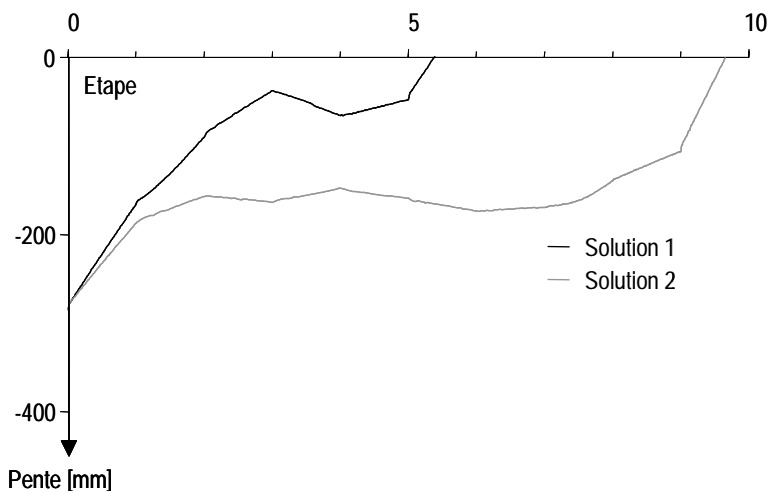


Figure 5.18: Comparaison de deux commandes pour un cas de charge deux nœuds, cas de charge n°14

## 5.4 Conclusions partielles

L'objectif du contrôle de la forme de 5M est d'assurer un critère d'aptitude au service pour une structure au comportement complexe avec une nouvelle approche de la détermination de la commande. Un nombre limité de barre est motorisé pour contrôler la pente de la couche supérieure sur laquelle pourrait être fixée un toit d'une halle d'exposition. La structure est contrôlée en mode quasi-statique.

Les essais numériques et expérimentaux du contrôle actif en mode quasi-statique ont montré pour les vingt cinq cas de charge appliqués sur 5M que :

- bien que 5M soit sensible aux charges asymétriques, la mise en place d'un contrôle actif, avec un nombre limité d'actuateurs, permet de satisfaire un critère de l'aptitude au service ;
- les bonnes solutions sont stockées afin de pouvoir être réutilisées si la structure est soumise à l'avenir à la même sollicitation ;
- bien que la taille de l'espace des solutions soit exponentielle, la combinaison de PGSL et de la relaxation dynamique permet de naviguer dans cet espace et de déterminer au moins une commande efficace;



- le système est robuste pour les cas de charge considérés : une incertitude initiale du modèle de comportement du système ne conduit pas, après l'application d'une commande, à une augmentation de l'incertitude ; le système converge vers l'objectif. La commande résultante est proche de celle déterminée à l'aide du modèle structural (en entrée de l'algorithme de recherche) ;
- pour une incertitude initiale non significative entre la pente mesurée et simulée, l'application d'une commande ne conduit pas forcément à la compensation complète de la pente ;
- la disposition symétrique et en ligne des actionneurs est efficace pour satisfaire ce critère;
- des commandes de qualité équivalente existent pour remplir le même objectif ;
- la technique expérimentale consistant à l'application de la commande par fraction de la commande brute est adéquate pour le contrôle de la pente en mode quasi-statique ;
- le couplage important peut faire baisser l'efficacité de la commande.



## 6 Perspectives et travaux futurs

Ce chapitre présente des nouvelles directions de recherche pour la suite du projet. D'autres objectifs, qui sont en cours d'étude dans le cadre de la thèse de Domer (publication début 2003), concernant l'apprentissage de la structure sont décrits brièvement ci dessous. L'apprentissage, reposant sur l'information explicite, se situe à deux niveaux :

- étalonnage en temps réel du modèle prédictif à l'aide des déplacements de la structure mesurés et enregistrés dans une base de données. La technique des réseaux artificiels de neurones serait déployée pour l'amélioration de la qualité du modèle [33];
- l'utilisation des commandes de contrôle appliquées avec succès ayant été stockées dans une base de données, contribuerait à améliorer la performance du comportement de la structure. L'application du « raisonnement par cas » (Case-based Reasoning) [73] est la méthode qui permettrait ainsi d'accélérer la recherche d'une commande.

### 6.1 Recherche multicritère

La recherche d'une commande de contrôle pour le contrôle de 5M était menée pour un incrément de changement de longueur de 0.1 mm et une course de 50 mm (+/- 25 par rapport à la longueur initiale et uniforme de toute les barres). La commande de contrôle est appliquée par fractionnement de la commande brute et par allongement d'une barre à la fois en commençant par l'allongement négatif maximal. L'étude numérique de ce fractionnement de la séquence (80 étapes avant d'atteindre la commande brute) a permit de constater pour les 25 cas de charge étudiés:

- une solution ou plusieurs solutions peuvent surgir pour une étape intermédiaire (Figure 6.1) ;

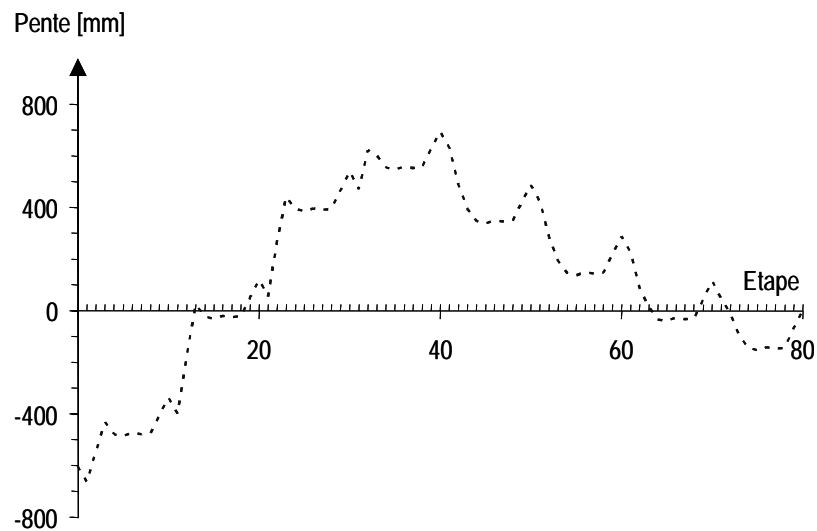


Figure 6.1: Existence de nouvelles solutions pour des étapes intermédiaires

- une ou plusieurs solutions de meilleure qualité peuvent surgir pour une étape intermédiaire, cas de charge n°6 (Figure 6.2);

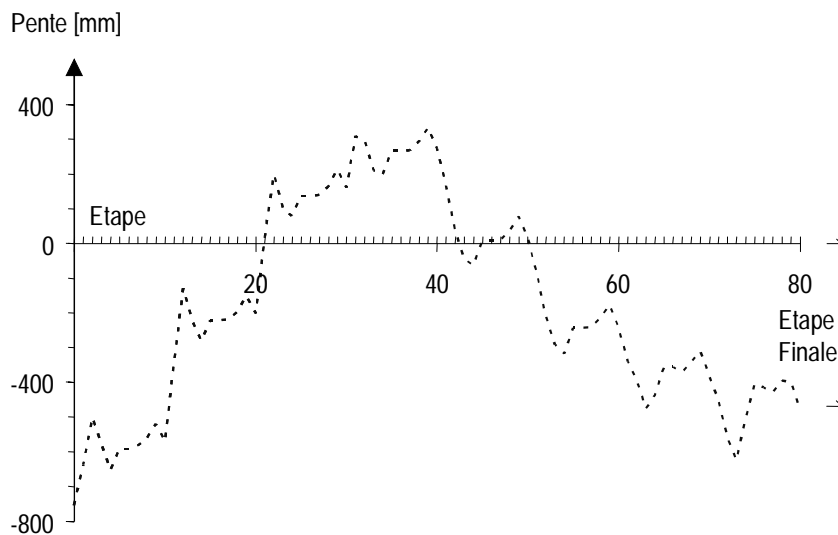


Figure 6.2: Existence de solutions meilleures pour des étapes intermédiaires

Ces observations n'étaient dépendantes ni de la valeur de la charge appliquée ni de la position ou du type de chargement. La Figure 6.1 et la Figure 6.2 soulignent qu'en fait l'intégralité de la course utile (12 étapes et 21 étapes) n'est pas nécessaire pour atteindre l'objectif fixé.

De nouvelles solutions de commande pouvant surgir en mettant un effet d'échelle sur la commande déterminée par l'algorithme de recherche même si celle-ci n'a pas rempli correctement l'objectif fixé. Plusieurs avantages liés ressortent de cet heuristique : économie d'énergie du système, non saturation des actionneurs ou actionneur proche de son état initial réservant une capacité de réaction à de nouvelles sollicitations. Cette dernière remarque

pourrait être intégrée directement dans l'algorithme de recherche, cette recherche de solution serait alors multicritère. Par contre, l'ajout d'un critère risque d'augmenter considérablement la complexité de la recherche et son corollaire, le temps de calcul. Par exemple, si deux critères sont inscrits dans une même fonction objective, le réglage du poids de chaque critère est délicat. La séparation des critères d'optimisation ou la combinaison d'une recherche unicritère avec une approche de Pareto serait sûrement plus efficaces.

Pour notre application, l'ébauche d'une technique de recherche déductive et itérative, séparant les critères est proposée. Elle permettrait la réduction drastique de l'espace des solutions. Elle est formulée pour distinguer la commande minimale nécessaire pour compenser la pente créée par un cas de charge en procédant par :

- une recherche d'une solution sur la plage complète ou une plage virtuelle plus étendue ;
- une recherche d'une solution intermédiaire en fractionnant la commande brute ;
- une diminution et redéfinition de la plage ;
- une recherche d'une solution sur la plage redéfinie ;
- une recherche d'une solution intermédiaire en fractionnant la nouvelle commande ;
- et ainsi de suite... jusqu'un seuil soit atteint.

Par exemple, pour la Figure 6.1, la taille de l'espace de recherche est  $500^{10}$  ( $500 = 50 \times 10$ , positions possibles pour 10 barres avec 500 positions possibles d'allongement). Une solution intermédiaire existe pour le quart de la course initiale, une nouvelle recherche réduit la taille de l'espace des solutions à  $125^{10}$ . Dans ce cas, la taille de l'espace des solutions baisse avec l'Equation 6.1 :

$$N = \left( \frac{C}{f \times i} \right)^n \quad (6.1)$$

N est la taille de l'espace des solutions, C est la course d'une barre et n est le nombre de barres actives, i l'incrément de longueur ( $i \geq 1$ ) et f est la fraction utile de la commande. L'Equation 6.1 montre que le fractionnement de la commande équivaut à augmenter la taille de l'incrément initial.

Un autre argument pour axer la recherche d'une solution, dans le futur, vers des commandes minimales repose sur la perte occasionnelle de précision du modèle pour des allongements trop élevés. La Figure 6.3 illustre l'effet sur la pente de deux commandes appliquées pour des allongements maximaux différents. Alors que la simulation propose une commande convergent vers la pente initiale, la trajectoire de la pente mesurée s'écarte de la pente simulée à partir de l'étape 21. En effet, l'éloignement de la position initiale des barres accentue les effets non-linéaires sur le comportement de la structure : de nombreux câbles peuvent venir à

se détendre. Par contre, une commande minimale permet de compenser sans équivoque la pente.

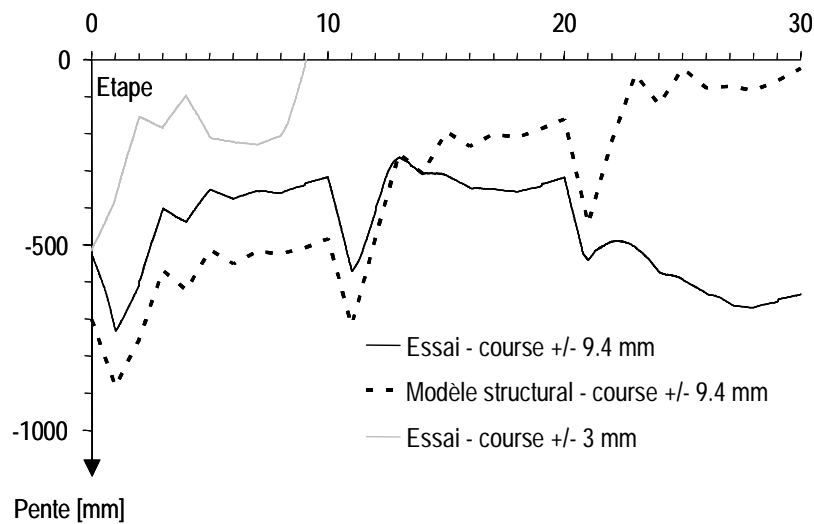


Figure 6.3: Comparaison de deux commandes pour des allongements maximaux différents, cas de charge n°12

Une utilisation de la course utile des vérins nécessite un modèle très précis et pourrait mener à la divergence du système. Une vérification supplémentaire de la tension des câbles pour structure sollicitée permettrait d'améliorer la corrélation du modèle structural et des mesures.

## 6.1.1 Amélioration de la qualité de la solution

L'application d'une commande ne suffit pas pour retrouver intégralement la pente initiale pour certains cas de charge. Différentes techniques sont proposées pour atteindre l'objectif.

### 6.1.1.1 Sollicitation itérative à partir de la configuration déformée

Pour des cas de charges pour lesquels la commande a contribué à remplir en grande partie l'objectif (> 75 %) Il est possible continuer le contrôle en partant de la configuration déformée. L'analyse de la trajectoire en fonction de la barre souligne une efficacité prépondérante de certaines barres sur la pente. Compte tenu de la robustesse du système, l'identification de ces barres actives et leur allongement additionnel et itératif par ordre d'efficacité, mèneraient à la convergence vers l'objectif.

Cette technique ne serait appliquée que pour des faibles déviations par rapport à l'objectif.

### 6.1.1.2 Utilisation d'une solution d'un autre cas de charge

L'application d'une commande ne suffit pas pour retrouver intégralement la pente initiale pour certains cas de charge. La Figure 6.4 illustre l'évolution de la pente en appliquant une nouvelle solution. Celle-ci est en fait une commande déterminée pour une charge sollicitant les mêmes nœuds pour une valeur de charge supérieure. Ici la commande du cas de charge n°18 (charge de 214 N simultanée au Nœud 39 et Nœud 48) est réutilisée pour compenser la pente pour le cas de charge n°17 (charge de 157 N simultanée au Nœud 39 et Nœud 48). L'application d'une partie de cette commande permet de rétablir la pente initiale alors que l'ancienne solution n'autorisait qu'une compensation de 88 %. Avant d'allonger les barres, les efforts dans les éléments sont simulés afin de s'assurer que les limites fixées ne sont pas dépassées. Cette nouvelle solution est stockée pour être réutilisée à l'avenir.

L'extrapolation de cette constatation implique que la connaissance d'un nombre limité de commandes efficaces serait suffisante pour répondre à des sollicitations dans une fourchette de valeurs de charge. Une vérification de cette hypothèse autorisant une simplification de la recherche de la commande est nécessaire.

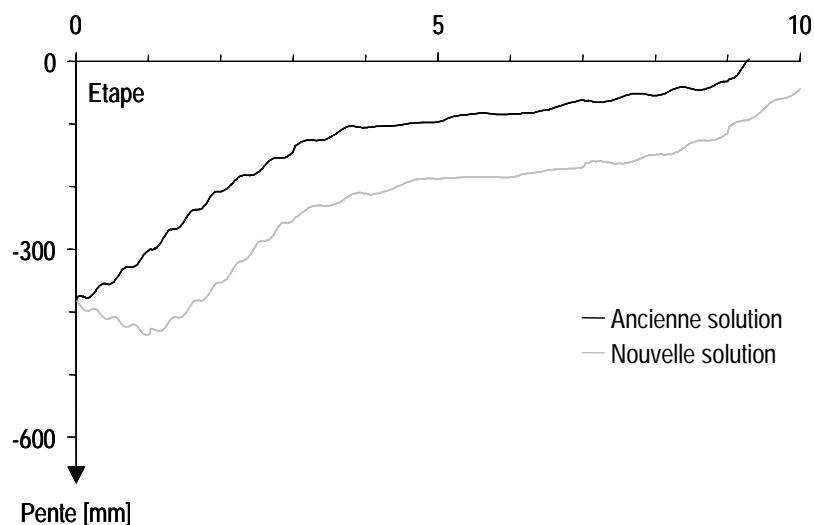


Figure 6.4: Une nouvelle solution pour compenser la pente

### 6.1.1.3 Autres natures de cas de charge

Les cas de charge étudiés dans les études expérimentales et numériques étaient limités à des charges verticales descendantes. D'autres cas de charge, simulant la charge de vent, sont à étudier : chargement horizontal et vertical ascendant.

#### **6.1.1.4 Etalonnage du modèle**

Dans la mesure où les techniques décrites précédemment ne sont pas efficaces, une amélioration du modèle structural doit être effectuée. Un étalonnage du modèle, semblable à celui réalisé pour le modèle étalonné dans le chapitre 3, est une technique simple augmentant l'efficacité du contrôle. D'autres techniques plus sophistiquées émergeant de l'intelligence artificielle peuvent contribuer à un étalonnage du modèle en temps réel.

### **6.2 Identification du système**

L'identification des sollicitations appliquées à une structure où les changements de comportement structural (plastification, tassement) pendant la durée de vie de l'ouvrage, est un domaine de recherche en pleine expansion. Cette identification est cruciale pour la définition des modèles de comportement d'un ouvrage pour l'ingénieur [117].

#### **6.2.1 Environnements changeants**

Les essais sur 5M ont mis en évidence qu'une structure de type tensegrité modulaire et réutilisable sensible aux charges asymétriques et aux faibles changements de sollicitations extérieures et caractérisée par un comportement non-linéaire et couplé peut satisfaire un critère de l'aptitude au service en étant équipée d'un système de contrôle actif, avec un nombre limité d'actuateurs. Les essais ont été réalisés pour des sollicitations connues, à savoir des positions et des valeurs de charge prédéfinies. Bien le système de contrôle sache comment réagir à des sollicitations connues, une structure placée dans un environnement inconnu et changeant a besoin d'identifier à quel type de sollicitation est elle soumise. Rappelons que la pente de 5M était évaluée à l'aide des déplacements mesurés en trois points. Or, le tableau 5.3 (Chapitre 5), souligne que différents cas de charge impliquent un effet équivalent sur la pente. Si la position de la charge n'est pas connue, quelle commande faut-il appliquer ? Trois techniques d'identification du chargement sont proposées :

- ajout d'un ou plusieurs capteurs apportant des informations supplémentaires ;
- utilisation des actuateurs pour interroger la structure. L'idée consiste à autosolliciter la structure pour identifier le type de charge. Par exemple, la structure est sollicitée par une charge  $x$ . En allongeant les barres actives, certains allongements impliqueront des déplacements verticaux positifs, négatifs ou non significatifs. Cette investigation permettrait déjà de faire une première sélection des cas de charge. La répétition de cette autointerrogation permettrait de distinguer itérativement la charge  $x$ . Dès que la charge est connue, une solution est appliquée. L'autointerrogation grâce à son système



actif consent à fournir une quantité d'information exponentielle servant à identifier la sollicitation, alors que l'information récoltée en ajoutant uniquement un système passif (capteur) est limité et définitif ;

- ajout de capteurs et autointerrogation de la structure. L'efficacité de la technique décrite au point précédent serait améliorée. Néanmoins, trop de capteurs peuvent conduire une baisse de l'efficacité du système.

Cette technique d'identification serait plus efficace si elle est employée avec de l'information explicite (déplacements mesurés enregistrés).

## 6.2.2 Structure autoréparable

La question la plus courante posée par les observateurs extérieurs au milieu des tensegrités est : « que se passe-t-il lors de la rupture d'un ou plusieurs câbles ? La structure globale est elle ruinée ? ». La redondance du système explique sa stabilité dans ce cas. Au-delà de cette stabilité, la ruine d'un élément conduit à une modification du comportement de la structure. Les mêmes techniques d'identification par autointerrogation, décrites ci-dessus, permettraient d'identifier quel est l'élément(s) défaillant(s).

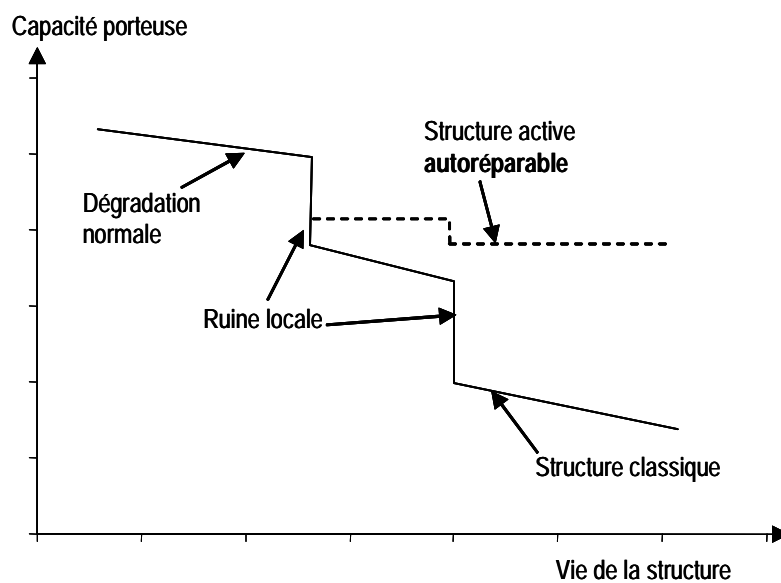


Figure 6.5: Schéma comparatif de structures autoréparable et classique. Une ligne horizontale indique qu'il n'y a pas de dégradation temporelle de la structure

Alors que pour une structure classique, la ruine d'un élément peut mener, par exemple, à la baisse de sa capacité porteuse ou sa ruine intégrale, une structure équipée d'un système de contrôle actif permettrait d'une part d'identifier l'élément défaillant et d'autre part de s'autoréparer (Figure 6.5). Une autoréparation consiste à adapter sa forme afin d'atteindre une

configuration meilleure. De fait, la capacité porteuse serait rehaussée sans pour autant atteindre sa capacité initiale.

### **6.3 Etude du mode dynamique - Planification de la trajectoire**

L'objectif du critère d'aptitude au service, consistant à contrôler la pente, ne nécessite pas un mode de fonctionnement dynamique. Compte tenu de la difficulté de mettre en équation le comportement d'une structure tensegrité, le mode de contrôle quasi-statique d'une structure active de type tensegrité est le plus sûr. Néanmoins, au lieu d'allonger une barre après l'autre, l'application d'une commande pourrait être réalisée en actionnant les barres simultanément par la planification de la trajectoire. Elle permettrait ainsi d'éviter le choix de la séquence et sa vérification par le calcul. Cette technique repose sur la méthode développée par Kiss et al. [72] pour le pilotage d'une grue.

L'observation des faibles fluctuations sur la pente mesurée dans la Figure 6.4, montre que la structure est sensible aux vibrations (essai de fatigue dans le local limitrophe). Du moment où la structure est construite, motorisée et équipée d'un système de bus permettant de faire du temps réel, l'étude des vibrations d'un tel système sous actionné non linéaire aux multiples degrés de liberté augmenterait la connaissance, nécessaire, pour des applications spatiales (panneaux solaires, bras d'antennes...) de ce type de structure.

### **6.4 Etude de la séquence**

Une étude approfondie de l'influence de la séquence des allongements dans l'application d'une commande devrait être réalisée. En effet, s'il s'avère qu'elle ait une importance, la taille de l'espace des solutions passerait d'une fonction exponentielle à une fonction factorielle !

### **6.5 Délocalisation du contrôle**

Le contrôle d'une structure plus vaste pourrait être envisagée en délocalisant le contrôle. La délocalisation consiste à définir des zones locales de contrôle. Dans ce cas, il y aurait un contrôle local en agissant à l'intérieur d'une zone et un contrôle global pour lequel les zones agiraient entre elles.

## 6.6 Caractérisation statique et cinématique de la structure modulaire

Compte tenu que les structures 3 modules et 5 modules ont été construites de façon modulaire, trois types de configuration ont été réalisés lors de la mise en place des structures de l'IMAC. Il est intéressant d'observer si les propriétés statiques et cinématiques d'une structure composée d'un module seul sont modifiées pour les configurations multimodulaires et si ces structures peuvent être classées dans les catégories de Tableau 2.1. En effet, Kazi-aoual et al. [67] proposent une technique pour extrapoler les propriétés d'un module à une structure multimodulaire.

Considérant les propriétés géométriques pour un module données ci-dessous, les valeurs du nombre de mécanismes et d'états d'autocontrainte sont calculées.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Nombre d'éléments : } b = 30 \\ \text{Nombre de noeuds: } j = 13 \\ \text{Nombre de directions bloquées : } k = 6 \\ m: \text{nombre de mécanismes} \\ s: \text{nombre d'états d'autocontrainte} \\ ra : \text{rang de } A \end{array} \right.$$

$$ra = \text{Ker}(A) \Rightarrow ra = 27$$

$$3j - k - b = 3 \cdot 13 - 6 - 30 = 3 \Rightarrow m - s = 3$$

$$s = b - ra = 30 - 27 \Rightarrow s = 3$$

$$m = 3j - k - ra = 3 \cdot 13 - 6 - 27 \Rightarrow m = 6$$

La même procédure a été employée pour déterminer les propriétés cinématiques et statiques pour les autres configurations. Un récapitulatif de celles-ci est illustré dans le tableau ci-dessous.

Configuration	Nombre d'éléments b	Nombre de noeuds j	Nombre de directions bloquées	Rang de A ra	Nombre de mécanismes m	Nombre d'états d'autocontrainte s
1 module	30	13	6	27	6	3
3 modules	90	33	6	90	3	0
5 modules	150	51	6	150	0	3

Tableau 6.1: Récapitulatif des caractéristiques calculées des différentes configurations de tensegrité de l'IMAC

Avant de vérifier si parmi la base calculée des vecteurs d'états d'autocontrainte, il existe une combinaison linéaire d'entre eux assurant que les câbles soient en traction et les barres en

soient compression, le tableau permet de souligner les tendances suivantes sur la stabilité des différentes structures :

- *1 module* : la structure est cinématiquement et statiquement indéterminée. Le nombre de mécanismes est supérieur au nombre d'états d'autocontrainte. Compte tenu qu'il existe une base d'états d'autocontrainte et de mécanismes pour la structure 1 module, il est probable que dans sa géométrie d'autocontrainte la structure admette des mécanismes infinitésimaux. Des états d'autocontrainte compatibles avec la rigidité unilatérale de leurs éléments stabilisant la position d'équilibre considérée ont été déterminés.
- *3 modules* : la structure est statiquement déterminée et cinématiquement indéterminée. Dans ce cas, s'il n'existe pas un état d'autocontrainte qui puisse rigidifier les mécanismes, la structure est un mécanisme fini (catégorie III, Tableau 2.1). Or, celle construite à l'IMAC est stable. Par conséquent, la question de la nature de la stabilité de cette configuration trois modules se pose ! Il faut souligner que la théorie développée ne tient compte d'aucune force extérieure. Est-ce l'imprécision sur les données géométriques qui altère l'analyse matricielle de la structure. La configuration de modules se recouvrant limite-t-elle l'analyse ? S'agit-il d'une structure funiculaire ou mixte? une étude ultérieure est nécessaire pour identifier cette contradiction expérimentale numérique.
- *5 modules* : la structure est cinématiquement déterminée et statiquement indéterminée. Dans ce cas, elle se rapproche d'une configuration de treillis hyperstatique rencontrée dans les constructions classiques. Il faut néanmoins vérifier qu'il existe un état d'autocontrainte compatible avec la rigidité des éléments.

La stabilité de la structure composée de trois modules, 3M, étudiée à l'IMAC est difficilement explicable par la théorie. Une étude ultérieure devra être menée afin de vérifier si de hypothèses supplémentaires doivent être prises en compte ou d'identifier si ce cas est une exception pour laquelle la théorie développée ne s'applique pas.

## 7 Conclusions

La question scientifique du travail de doctorat décrit dans ce document est : « Est-ce possible de créer une structure active de type tensegrité pour assurer un critère d'aptitude au service ? ». Les essais numériques et expérimentaux du contrôle actif en mode quasi-statique ont montré que la mise en place d'un contrôle actif, avec un nombre limité d'actuateurs, permet de satisfaire des critères de l'aptitude au service, bien que les structures de tensegrité modulaires et réutilisables soient sensibles aux charges asymétriques et aux faibles changements de sollicitations extérieures et soient caractérisées par un comportement non-linéaire et hautement couplé. La réponse positive à la question scientifique souligne la nécessité de relever **plusieurs défis** afin d'y parvenir :

- liés à la **construction** : une structure modulaire à vocation réutilisable de type tensegrité composée d'abord de trois modules, puis de cinq modules et finalement une structure active, jouant sur la longueur des barres, unique et inédite composée de cinq modules, a été construite et testée avec succès. Un module est composé de six éléments comprimés et de vingt quatre éléments tendus partagés entre trois longueurs distinctes.

Ces trois structures ont permis de souligner au niveau de la construction et de la conception que la construction d'une structure ou structure active de type tensegrité en grandeur nature nécessite une réflexion approfondie sur la conception des assemblages, composants d'une importance primordiale pour une structure modulaire et réutilisable. Une conception judicieuse des connections des éléments aux nœuds permet d'assurer que la structure ne travaille qu'en éléments barres et qu'aucun moment parasite n'apparaisse dans les barres et les nœuds. Ceci est d'autant plus important que pour une structure active les éléments actifs impliquent des charges asymétriques.

Par ailleurs, la conception d'une tensegrité impose une procédure rigoureuse de montage modulaire car les imperfections sur les composants peuvent créer une géométrie non optimale et des conditions de précontrainte non uniformes et inconnues. Le temps au montage et son corollaire, l'économie d'argent, sont aussi conditionnés par la conception judicieuse des assemblages. D'autre part, les deux types d'assemblage conçus dans le cadre de cette construction ont montré leur potentiel à remplir ce cahier des charges ;

- liés à l'**analyse structurale** d'un système non-linéaire géométrique dont la rigidité des éléments est unilatérale : les essais numériques et expérimentaux du comportement statique de la structure ont montré que la relaxation dynamique associée à un modèle est robuste et rapide pour simuler le comportement aussi bien des charges verticales ponctuelles et multiples que l'élongation des barres télescopiques.

Les essais statiques ont mis en évidence que pour une fourchette de charges ponctuelles uniques et multiples, le comportement est localement linéaire, mais globalement non-linéaire. Bien que le comportement de la structure soit localement linéaire pour des charges ponctuelles ou de petites déformations des éléments, l'hypothèse de superposition n'est pas valable en général. Chaque cas de charge nécessite un nouveau calcul numérique compte tenu de la non-linéarité géométrique. D'autres phénomènes, tels les frottements et la relaxation dans les câbles peuvent perturber le comportement de la structure.

- liés à la **recherche et application d'une commande de contrôle** : le choix de l'objectif s'est orienté vers le contrôle de la pente de la couche supérieure de la structure de tensegrité sur laquelle serait attaché le toit d'une halle d'exposition temporaire. L'évolution de la pente est suivie par l'intermédiaire des déplacements de trois noeuds formant un triangle. Ce critère, ne limitant pas la recherche d'une commande à une solution unique ou vers un état connu, aucune méthode analytique traditionnelle efficace n'a pu être identifiée. De plus, il n'existe pas de formulation analytique directe entre la géométrie déformée de la structure et les allongements des barres et une linéarisation n'est pas valable.

Deux techniques de recherche stochastique, le « recuit simulé » et PGSL associées à la méthode d'analyse structurale, ont montré leur capacité à naviguer dans l'espace des solutions borné par des contraintes liées aux matériaux et à la géométrie des éléments, et à trouver dans un temps raisonnable une ou plusieurs combinaisons des élongations de barres pour satisfaire le critère pour une structure soumise à différents types de cas de charge.

L'application d'une commande de contrôle n'est pas triviale dans le sens que seul l'état final est connu et que le chemin pour l'atteindre nécessite la définition d'une séquence respectant les contraintes des matériaux et de leur géométrie. L'investigation d'une commande est d'autant plus coûteuse en temps de calcul. Pour réduire ce dernier, les bonnes solutions et leur séquence d'application ont été stockées et réutilisées pour des cas de charge connus, ce qui a permis d'accélérer le contrôle et ainsi d'améliorer la performance du comportement.

D'autres remarques et suggestions issues de la construction de la structure et de la recherche, et l'application de la commande contrôle peuvent être formulées :

- un nœud central construit, autorisant la convergence des éléments comprimés à tout moment en un point uniquement par contact, est une solution technique n'étant pas limitée à la structure construite dans la halle de l'IMAC, mais pourrait s'appliquer à d'autres structures composées de barres et câbles comme celles proposées par Saitoh [120] et Wang [151]. De plus, pour la construction, c'est une solution peu coûteuse car aucune soudure, perçage ou pliage n'est à réaliser. Les structures déployables, les manèges ou encore les prothèses sont d'autres domaines qui pourraient tirer profit du concept de cet assemblage ;
- la tensegrité peut être le lieu d'application d'un autre matériau que l'acier tel que le Fiberline, polyester renforcé de fibres de verre, pour les barres rendant la structure plus légère. Le bois, le bambou, d'autres matériaux composites, le béton à poudre réactive et le verre pourraient être utilisés d'autant plus que de part la bonne conception des assemblages les barres ne travailleraient qu'en compression. De fait, certaines structures seraient peu coûteuses et d'autres seraient l'objet de réalisations architecturales inédites ;
- le système est robuste pour les cas de charges considérés: une incertitude initiale du modèle de comportement du système ne conduit pas, après l'application d'une commande, à une augmentation de l'incertitude ; le système converge vers l'objectif. La commande résultante est proche de celle déterminées à l'aide du modèle analytique (en entrée de l'algorithme de recherche) ;
- l'utilisation d'un modèle corrigé par les mesures quand la corrélation du modèle analytique et expérimental n'était pas bonne, peut améliorer considérablement la qualité du contrôle. Ceux-ci pourraient être quantifiés en greffant une technique d'étalonnage par un réseau de neurones au modèle numérique ;
- de nouvelles solutions de commande peuvent surgir en mettant un effet d'échelle sur la commande déterminée par l'algorithme de recherche même si celle-ci n'a pas rempli correctement l'objectif fixé. Plusieurs avantages ressortent de cet heuristique : économie d'énergie du système, non saturation des actionneurs ou actionneur proche de son état initial réservant une capacité à réagir à de nouvelles sollicitations. Cette dernière remarque pourrait être intégrée directement dans l'algorithme de recherche, cette recherche de solutions serait alors multicritères. Une technique permettant de découpler les critères est proposée.
- la structure dite « active », compte pour chacun de ses modules un nombre restreint de deux actionneurs installés symétriquement. Le nombre d'appareils majeurs à gérer

s'élève à vingt quatre : vingt pour la gestion des actuateurs, trois pour la gestion des déformations de la structure et un ordinateur, maître du système. Même fonctionnant dans un régime quasi-statique, cela implique le multiplexage de ces appareils. La communication entre ces derniers est gérée par un programme développé sur Labview dispensant et recevant les données sur le bus de terrain CAN sous le protocole CanOpen aux vingt trois appareils. L'utilisation de ce bus de communication, qui ne cesse de convaincre de nouveaux constructeurs automobiles pour gérer en temps réel aussi bien la gestion du moteur que celle de l'essuie-glace, est une des premières applications dans le domaine du génie civil. La puissance de ce support de communication n'exclue pas pour autant une certaine complexité. Un système actif nécessite des sécurités au niveau logiciel mais aussi indépendant de la boucle de contrôle afin d'éviter la ruine de la structure causée par une défaillance ou mauvaise manipulation du système.

Les travaux réalisés sur le contrôle actif en mode quasi-statique d'une tensegrité sous un critère d'aptitude au service sont une contribution importante dans la projection de la création d'une structure intelligente. De plus, un concept étendu de structure active, « une structure autoréparable », utilisant l'autointerrogation pour identifier des sollicitations inconnues ou des ruines locales des éléments constitutifs, permettant ainsi l'adaptation de la géométrie vers une meilleure configuration pour un ou des éléments constitutifs défaillants, est proposé.



## Références bibliographiques

- [ 1] **ABDULLAH M M.**, *Optimal Placement of Output Feedback Controllers on Slender Civil Structures at Discrete Locations*, 22, pp 1042-1047, **2000**.
- [ 2] **ADELI H., SALEH A.**, *Schemes for placement of controllers*, Control, Optimization, and Smart Structures- High Performance Bridges and Buildings of the Future, 142-146, english, **1999**.
- [ 3] **ADRIAENSSENS S.M.L., BARNES M. R.**, *Tensegrity Spline Beam Grid Shell Structures*, Engineering structures, 23, pp 29-36, **2001**.
- [ 4] **AGRAWAL A.K.**, *Response of Light Equipment on Torsional Building with Passive Tuned Mass Damper*, Computers & Structures, 78, pp 591-602, **2000**.
- [ 5] **AGRAWAL A.K., YANG J. N.**, *A Semi-Active Electromagnetic Friction Dampers for Response Control of Structures*, IABSE lucerne, pp 1-8, **2000**.
- [ 6] **AVERSENG J., KAZI-AOUAL M. N., CROSNIER B.**, *Strategy for Selfstress Implementation in Tensegrity systems*, 5th International Conference on Space Structures, Ed. G. A.R. Parke, P. Disney, Thomas Telford, London, pp 31-38, **2002**.
- [ 7] **BARATTA A., PAPA F., ZUCCARO G.**, *Linear active Control for Linear and Nonlinear Structures*, IEEE, pp 574-579, **1997**.
- [ 8] **BARNES M.R.**, *Formfinding and Analysis of Tension Space Structures by Dynamic Relaxation*, The City University, **1977**.
- [ 9] **BAUMANN F., FEST E., SMITH I. F. C.**, *Développement d'un système de mesure pour évaluer la tension dans les câbles du tensegrite*, Travail de Semestre, Swiss Federal Institute of Technology, unpublished, 15 p., **2000**.
- [ 10] **BÉCHIR M., PONS J.C.**, *relation tension-frequence de resonance dans les systemes de tensegrite*, Systèmes de Tensegrité, Edition de l'Esperou, 21-24, Montpellier, France, **1997**.
- [ 11] **BELKACEM S.**, *Recherche de forme par relaxation dynamique des structures reticulees spatiales autocontraintes*, PH, D. thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, **1987**.
- [ 12] **BEN KAHLA N., KÉBICHE K.**, *Nonlinear Elastoplastic Analysis of Tensegrity Systems*, Engineering structures, 23, pp 1552-1566, **2000**.
- [ 13] **BEN KAHLA N., MOUSSA B., PONS J.C.**, *Nonlinear Dynamic Analysis of Tensegrity Systems*, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 49-58, Gabes, Tunisie, **1998**.
- [ 14] **BOSCH R.**, *CAN Specification 2.0 Part A*, 31 p., **1993**.

- 
- [ 15] **BROWN A.S., ANKIREDDI S., YANG H.T.Y.**, *Actuator and Sensor Placement for Multiobjective Control of Structures*, Journal of Structural Engineering, 8, **1999**.
- [ 16] **CALATRAVA S.**, *The Synthetic Power of Games and Metaphor*, In: Deborah Evans, ed. *Bridging the Gap: Rethinking the Relationship of Architect and Engineer.*, Chap. 8, **1991**.
- [ 17] **CALLADINE C. R., PELLEGRINO S.**, *Further Remarks on First-order Infinitesimal Mechanism*, International Journal of Solids and Structures, 29, pp 2119-2122, **1992**.
- [ 18] **CALLADINE C.R.**, *Buckminster Fuller's "Tensegrity" Structures and Clerk Maxwell's Rules for the Construction of Stiff Frames*, International Journal Solid Structures, 12, Cambridge, **1977**.
- [ 19] **CASAS J.-R.**, *A Combined Method fo Measuring Cable forces: The Cable-Stayed Alamillo Bridge, Spain*, IABSE, Structural Engineering International, 4, 235-240, **1994**.
- [ 20] **CD-SYSTEMS**, *CANopen Library for Labview*, **2001**.
- [ 21] **CHEN J-C.**, *Response of Large Space Structures with Stiffness Control*, J. Space, 21 (5), 10 p., **1984**.
- [ 22] **CHUNG L.L.**, *Modified Predictive Control of Structures*, Engineering Structures, 21, pp 1076-1085, **1999**.
- [ 23] **CIA**, *CANopen Communication Profile for Industrial Systems*, CiA Draft Standard 301, 63 p., **1996**.
- [ 24] **CIVJAN S.A., JIRSA J.O., CARRASQUILLO R.L., FOWLER D.W.**, *Instrument to evaluate remaining prestress in damaged prestressed concrete bridge girders*, PCI Journal, 43, 62-71, **1998**.
- [ 25] **COMERFORD J., LAZZARI M., RUGGERI G., SALVANESHI P., FANELLI M., GIUSEPPETTI G., MAZZA G.**, *Causal models and knowledge integration system modelling*, IABSE. Knowledge-Based Systems in Civil Engineering, 331-340, Beijing, Chine, **1993**.
- [ 26] **CONNELLY R., WHITELEY W.**, *The stability of tensegrity frameworks*, International Journal of Space Structures, 7, 153-163, Canada, **1992**.
- [ 27] **CROSNIER B., CEVAER F.**, *Stratégie de mise en precontrainte dans les systemes de tensegrité et contrôle*, Revue Française du Génie Civil, Edition Spéciale "Tensegrité: Analyse et Progrès", In press, **2001**.
- [ 28] **CROSNIER B., CEVAER F.**, *Le nœud du probleme*, Systèmes de Tensegrité, Edition de l'Esperou, 31-35, Montpellier, France, **1997**.
- [ 29] **CUNHA A., CAETANO E.**, *Dynamic Meadurements on Stay Cables of Cable-stayed Bridges Using an Interferometry Laser System*, Experimental Techniques, 38-43, **1999**.
- [ 30] **DI GENNARO, LOZITO N., ROMANELLI N.**, *New Malpensa 2000 Airport Spatial Structure: Material and Production Procedures*, Space Frames and Lattices, 6, Bari, Italie, **1995**.

- 
- [ 31] **DJOUADI S.**, *Le controle des structures tensegrité*, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Montpellier, France, **1998**.
- [ 32] **DJOUADI S., PONS J.C., CROSNIER B.**, *Le contrôle des structures de tensegrité*, Systèmes de Tensegrité, Edition de l'Esperou, 25-30, Montpellier, France, **1997**.
- [ 33] **DOMER B., FEST E., LALIT V., SMITH I. F. C.**, *Combining the Dynamic Relaxation Method with Artificial Neural Networks to Enhance Simulation of Tensegrity Structures*, ASCE-Structural Engineering, to be published, **2003**.
- [ 34] **DOMER B., RAPHAEL B., SHEA K., SMITH I. F. C.**, *Comparing Two Stochastic Search Techniques for Structural Control*, ASCE - Computing in Civil Engineering, submitted for publication, **2001**.
- [ 35] **DOWSLAND K.**, *Simulated Annealing*, Reeves, C. (ed.): Modern heuristic techniques for combinatorial problems, McGraw-Hill, pp 20-69, **1995**.
- [ 36] **DYKE S.J., YI F.**, *On the Performance of Controlled Civil Engineering Structures*, pp 1-6, **2000**.
- [ 37] **EMMERICH D. G.**, *Construction de reseaux autotendants*, Brevet N°1,377,290, Brevet délivré par le ministère de l'industrie, **1964**.
- [ 38] **ESD - GMBH**, *CAN- PCI/331 PCI-CAN Interface - Hardware Installation and Technical Data*, 15 p., **2001**.
- [ 39] **EXPO02**, <http://www.expo02.ch>, (last accessed 11/10/02).
- [ 40] **FARAVELLI L., YAO T.**, *Use of Adaptative Network Fuzzy Control of Civil Structures*, Microcomputers in Civil Engineering, 11, 67-76, **1996**.
- [ 41] **FEST E., DOMER B., SHEA K., SMITH I. F. C.**, *Towards Intelligent Tensegrity Structures*, Third World Conference on Structural Control, Wiley, **2002**.
- [ 42] **FEST E., SHEA K., DOMER B., SMITH I. F. C.**, *Adjustable Tensegrity Structures*, ASCE-Structural Engineering, **2003**.
- [ 43] **FEST E., SMITH I.**, *Construction et modelisation des structures de tensegrites*, Publication IMAC, Rapport Technique, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, **1999**.
- [ 44] **FEST E., SMITH I. F. C.**, *Deux structures actives de type tensegrite*, CTICM - Revue Construction Métallique, 3, pp 19-27, **2002**.
- [ 45] **FEST E., SMITH I. F. C.**, *Construction et caracterisation d'une structure de tensegrite*, Revue Française du Génie Civil, Edition Spéciale "Tensegrité: Analyse et Progrès", In press, **2002**.
- [ 46] **FIBERLINE**, *Fiberline Design Manual for Structural Profiles in Composite Materials*, 79 p., **1995**.
- [ 47] **FOX M. A.**, *Beyond Kinetic*, Kinetic Design Group, 12 p., **2001**.
- [ 48] **FULLER R. B.**, *Tensile Intergrity Structures*, U. S. Patent N°3,063,521, **1962**.

- [ 49] **FURUYA A.**, *Concept of Deployable Tensegrity Structures in Space Application*, International Journal of Space and Structures, 7, pp 135-143, **1992**.
- [ 50] **GHABOUSSI J., JOGHATAIE A.**, *Active Control of Structures Using Neural Networks*, J. Engng Mech., ASCE, 121(4), pp 555-67, **1995**.
- [ 51] **GOODIER A, MATTHEWS S.**, *Knowledge Based Systems Applied to Real-time Structural Monitoring*, Information Processing in Civil and Structural Engineering Design, Civil Comp Press, 263-270, **1996**.
- [ 52] **HANAGAN L.M., KULASEKERE E.C., WALGAMA K.S., PREMARATNE K.**, *Optimal Placement of Actuators and Sensors for Floor Vibration Control*, Journal of Structural Engineering, pp 1380-1387, **2000**.
- [ 53] **HANAOR A.**, *Double-layer Tensegrity Grids: Static Load Response. II: Experimental Study*, Journal of Structural Engineering, 117 (6), pp 1675-1684, **1991**.
- [ 54] **HANAOR A.**, *Aspects of Design of Double-Layer Tensegrity Domes*, International Journal of Space Structures, 7, pp 101-113, **1990**.
- [ 55] **HANAOR A., LIAO M.-K.**, *Double-layer Tensegrity Grids: Static Load Response. I: Analytical Study*, Journal of Structural Engineering, 117 (6), pp 1661-1674, **1991**.
- [ 56] **HANSEN H. I., THOFT-CHRISTENSEN P., MENDES P. A., BRANCO F. A.**, *Wind-Tunnel Tests of a Bridge Model with Active Vibration Control*, Structural Engineering International, IABSE, 4, pp 249-253, **2000**.
- [ 57] **HBM**, *Module MP 55 - PME - Manuel d'utilisation*, 66 p., **1998**.
- [ 58] **HOUSNER G.W.**, *Structural Control: Past, Present, and Future*, Journal of Engineering Mechanics, 123, **1997**.
- [ 59] **HUSTIN S.**, *A New Standard Cell Placement Program Based on the Simulated Annealing Algorithm*, Master of Science, University of California, Berkeley, Department of Electrical Engineering and Computer Science, **1988**.
- [ 60] **IDELSON S. R., CARDONA A.**, *A Load-Dependent Basis for Reduced Nonlinear Structural Dynamics*, Computers Structures, 20 (1-3), pp 203-210, **1985**.
- [ 61] **INGBER D.E.**, *The Architecture of Life*, Scientific American, pp 30-39, **1998**.
- [ 62] **INSTITUT DE STRUCTURES, EPFL**, *Manuel Qualité*, <http://isswww.epfl.ch/manuel/chap5.html#5.5> (last accessed 10/2002).
- [ 63] **ISO-OSI**, *ISO 11898, Road Vehicles, Interchange of Digital Information - Controller Area Network (CAN) for High-speed Communication*, **1993**.
- [ 64] **JAKOB**, *Jakob Inox Line*, Catalogue, 5, 168 p., **1998**.
- [ 65] **KANCHANASARATool N., WILLIAMSON D.**, *Modelling and Control of class NSP Tensegrity Structures*, Int. J. Control, Taylor & Francis, 75 (2), pp 123-139, **202**.
- [ 66] **KAWAGUCHI K., LU Z.-Y.**, *Construction of Three-Strut Tension Systems*, Space Structures, Thomas Telford, London, 5, pp 1-10, London, **2002**.

- 
- [ 67] **KAZI-AOUAL M. N., QUIRANT J., LAPORTE R. ,** *L'autocontrainte dans les systemes de tensegrite*, Colloque Lagrange "Tensegrité : Analyse et Projet" Ed. Revue Française de Génie Civil, Rome, **2002**.
- [ 68] **KEBICHE K., KAZI-AOUAL M. N., MOTRO R.,** *Geometrical Non-linear Analysis of Tensegrity Systems*, Engineering Structures, Elsevier, 21, pp 864-876, **1999**.
- [ 69] **KÉBICHE K., KAZI-AOUAL M.N.,** *Comportement des systèmes de tensegrites*, Systèmes de Tensegrité, Edition de l'Esperou, 37-40, Montpellier, France, **1997**.
- [ 70] **KELLER T.,** *Towards Structural Forms for Composite Fibre Materials*, Structural Engineering International, 9, 4, pp 297-300, **2000**.
- [ 71] **KIRPATRICK S., GELATT C. D., VECCHI P.,** *Optimization by Simulated Annealing*, Science, 220, pp 671-680, **1983**.
- [ 72] **KISS B., LEVINE J., MÜLLHAUPT P.,** *Modelling, Flatness and Simulation of a Class of Cranes*, Peridica Polytechnica Ser. El. Eng., (3) 43, pp 215-255, **1999**.
- [ 73] **KOLODNER J.,** *Case-Based Reasoning*, Morgan Kaufmann, San Mateo, 668 p., **1993**.
- [ 74] **KONO Y., CHOONG K.K., SHIMADA T., KUNIEDA H.,** *An Experimental Investigation of a Type of Double Layer Tensegrity Grids*, Journal of IASS, 41 (131), **2000**.
- [ 75] **KUZNETSOV E. N.,** *Underconstrained Structural System*, Springer, New York, **1991**.
- [ 76] **KUZNETSOV E. N.,** *Discussion of "First-Order Infinitesimal Mechanism"*, International Journal of Solids and Structures, 27, 4, pp 517-519, **1991**.
- [ 77] **LALVANI H.,** *Morphology*, International Journal of Space and Structures, 11, **1996**.
- [ 78] **LAZZARI M., SALVANESHI P., CADEI M.,** *Applying AI to Structural Safety Monitoring and Evaluation*, AI in Civil and Structural Engineering, IEEE Expert, Intelligent Systems and their Applications, 24-34, **1996**.
- [ 79] **LE SAUX C., BOUDERBALA M., CEVAER F., MOTRO R.,** *Strut-strut Contact in Numerical Modeling of Tensegrity System Folding*, 40th Anniversary of IASS, Shell and Spatial Structures: from Recent past to Next Millenium, D1-D10, **1999**.
- [ 80] **LIAPI K. A.,** *A Novel Portable and Collapsible Tensegrity Unit for the Rapid Assembly of Tensegrity Networks*, 5th International Conference on Space Structures, Ed. G. A.R. Parke, P. Disney, Thomas Telford, London, pp 39-46, **2002**.
- [ 81] **LOSS & CO. INC.,** *Tension Gauge*, U.S. Patent N° 5,461,929.
- [ 82] **LUST-TEC,** *CDA 3000 Application Manual - Adaption of the Drive System to the Application*, 276 p., **2000**.
- [ 83] **LUST-TEC,** *CDA 3000 Operation Manual - Inverter Drive System*, 72 p., **2000**.
- [ 84] **LUST-TEC,** *CM-CAN2 - User Manual - Communication Module for CANopen*, 82 p., **2000**.

- [ 85] **MAEDA Y., WATANABE E., TACHIBANA E., ODA K., FURUTA H.**, *Marine Floating System Proposed to Support the 2008 Olympics*, 16th Congress of IABSE, Lucerne, Switzerland, **2000**.
- [ 86] **MARGUCCIO D., FEST E., SMITH I. F. C.**, *Etude de la consequence de chocs sur les barres en fiberline montées dans les structures tensegrités*, Travail de Semestre, 15 p., **2000**.
- [ 87] **MAZZOLANI M., MAZZOLANI S.**, *The New Space Structure of Malpensa 2000: Test and Design*, Spaces Frames and Lattices, 8, Naples, Italie, **1995**.
- [ 88] **MERO A. G.**, *Connector for Space Framework, M12*, <http://www.mero.com/interiors/products/m12.shtml>, **1972**.
- [ 89] **MOTRO R.**, *Tensarch: a Tensegrity Double Layer Grid Prototype*, 5th International Conference on Space Structures, Ed. G. A.R. Parke, P. Disney, Thomas Telford, London, **2002**.
- [ 90] **MOTRO R.**, *Introduction aux systèmes de tensegrité*, Systèmes de Tensegrité, Edition de l'Esperou, 5-13, Montpellier, France, **1997**.
- [ 91] **MOTRO R.**, *Système de tensegrite : structures autocontraintes constituées de barres et de cables*, Construction Métallique, 2, 16 p., **1991**.
- [ 92] **MOTRO R.**, *Tensegrity Systems and Structural Research*, IASS, Colloquium Proceedings, Madrid, Espagne, **1997**.
- [ 93] **MOTRO R.**, *Tensegrity: the State of the Art*, 5th International Conference on Space Structures, Ed. G. A.R. Parke, P. Disney, Thomas Telford, London, pp 97-106, **2002**.
- [ 94] **MOTRO R.**, *La Tensegrité: principe structural*, Revue Française du Génie Civil, Edition Spéciale: "Tensegrité: Analyse et Progrès", To be published., **2003**.
- [ 95] **MOTRO R.**, *Forms and Forces in Tensegrity Systems*, Third International Conference on Space Structures, Ed. H. Nooshin, Elsevier, pp 180-185, **1984**.
- [ 96] **MOTRO R.**, *Tensegrity Systems: State of the Art*, International Journal of Space and Structures, 7, pp 75-83, **1992**.
- [ 97] **MURAKAMI H.**, *Static and Dynamic Analyses of Tensegrity Structures. Part 1. Nonlinear Equations of Motion*, International Journal of Solids and Structures, 38, pp 3599-3613, **2001**.
- [ 98] **OKUBO H., KOMATSU N., TSUMURA T.**, *Tendon Control System for Active Shape Control of Flexible Space Structures*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 6, Osaka, Japan, **1996**.
- [ 99] **OPPENHEIM I. J.**, *Geometric Effects in an Elastic Tensegrity Structure*, Journal of Elasticity, 59 (1-3), pp 51-65, **2000**.
- [100] **PAPADRAKAKIS M.**, *A Method for the Automatic Evaluation of Dynamic Relaxation Parameters*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 25, pp 35-48, **1981**.

- [101] **PASSINO K. M.**, *Toward Bridging the Perceived Gap Between Conventional and Intelligent Control Systems*, In: Gupta M.M., Sinha N. K., ed. *Intelligent Control Systems*, IEEE Press, Chap. 1, pp 3-27, New York, **1996**.
- [102] **PEDRETTI M.**, *www.ppeng.ch*, Passera & Pedretti, Consulting Engineers, Lugano, Switzerland.
- [103] **PELLEGRINO S.**, *A Class of Tensegrity Domes*, *International Journal of Space Structures*, 7, pp 127-139, **1992**.
- [104] **PELLEGRINO S.**, *Structural Computations with the Singular Value Decomposition of the Equilibrium Matrix*, *International Journal of Solids and Structures*, 30, 21, pp 3025-3035, **1993**.
- [105] **PELLEGRINO S., CALLADINE C.R.**, *Matrix Analysis of Statically and Kinematically Indeterminate Frameworks*, *Int. J. Solids Structures*, 22, 19, Cambridge, England, **1985**.
- [106] **PERELLI Y., FEST E., SMITH I. F. C.**, *Comportement des structures tensegrités*, Travail de Diplôme, Swiss Federal Institute of Technology, 79 p., **2000**.
- [107] **PERELLI Y., MOROSOLI C., FEST E., SMITH I. F. C.**, *Etude des barres du tensegrite*, Travail de Semestre, Swiss Federal Institute of Technology, 35 p., **1999**.
- [108] **PETROSKI H.**, *Invention by Design: How Engineers Get from Thought to Thing*, Harvard University Press, London, **1996**.
- [109] **QUIRANT J.**, *Recherche de Forme pour les Systèmes Tensegrité*, Systèmes de Tensegrité, Edition de l'Esperou, 15-20, Montpellier, France, **1997**.
- [110] **QUIRANT J., KÉBICHE K., KAZI-AOUAL M. N.**, *Système de tensegrite: comportement et sensibilité des modules simples*, *Revue Française du Génie Civil*, 4, **2000**.
- [111] **RADACANU V., MOTRO R.**, *New Tensegrity Grids*, IASS Symposium2001, ed. Kuneida, Nagoya, TP143, **2001**.
- [112] **RAPHAEL B., SMITH I. F. C.**, *A probabilistic search algorithm for finding optimally directed solutions*, *Proceedings of Construction Information Technology*, Icelandic Building Research Institute, Reykjavik, pp 708-721, **2000**.
- [113] **RAPHAEL B., SMITH I. F. C.**, *A Direct Stochastic Algorithm for Global Search*, of *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier, to be published, **2002**.
- [114] **RECSKI A., SCHWÄRZLER W.**, *One-Story Building as Tensegrity III*, *Discrete Applied Mathematics*, 39 (2), pp 137-146, **1992**.
- [115] **REHAK D-H., GARETT JR. J-H.**, *Neural Computing for Intelligent Structural System*, *Intelligent Structures Monitoring and Control*, Ed. Y.K Wen, Elsevier, 147-161, **1991**.
- [116] **ROBBIN T.**, *Engineering A New Architecture*, Yale University Press, Chap.3, pp 25-37, **1996**.
- [117] **ROBERT-NICOUD Y., RAPHAEL B., SMITH I. F. C.**, *Decision support through multiple models and probabilistic search*, *Proceedings of Construction Information Technology 2000*, Icelandic Building Research Institute, Reykjavik, pp 765-779, **2000**.

- [118] **ROSSIER S.**, *Optimization of cable structures using genetic algorithms*, EPFL - DGC - LSC, travail pratique de diplôme, Lausanne, Suisse, unpublished, **1993**.
- [119] **SAITOH M.**, *Beyond the Tensegrity - A New Challenge Toward Tensegric World*, IASS Symposium 2001, Nagoya, Ed. Kunieda, pp 316-317, **2001**.
- [120] **SAITOH M., OKADA A., TABATA H.**, *Study on the Structural Characteristics of Tensegric Arch*, IASS Symposium, Nagoya, Ed. Kunieda, TP 146, 8 p., **2001**.
- [121] **SALAMA M., UMLAND J., BRUNO R., GARBA J.**, *Shape Adjustment of Precision Truss Structures: Analytical and Experimental Validation*, Smart Structures and Materials, 240-248, Pasadenna, Etats-Unis, **1993**.
- [122] **SALERNO G.**, *How to Recognise the Order of Infinitesimal Mechanisms: a Numerical Approach*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 35, 7, pp 1351-1395, **1992**.
- [123] **SALVANESHI P., CADEI M., LAZZARI M.**, *A causal modeling framework for the simulation and explanation of the behavior of structures*, Artificial Intelligence in Engineering, 11, 205-216, **1997**.
- [124] **SETO K.**, *Modeling and Active Vibration Control of Flexible Structures*, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, pp 15-24, Kyoto, Japan, **1998**.
- [125] **SHEA K., FEST E., SMITH I. F. C.**, *Developping Intelligent Tensegrity Structures with Stochastic Search*, Advanced Engineering Informatics, Elsevier, 16, pp 21-40, **2002**.
- [126] **SHEA K., SMITH I.**, *Intelligent structures: a new direction in structural control*, Artificial Intelligence in Structural Engineering, Computer Science, 398-410, Heidelberg, Spinger, **1998**.
- [127] **SHIBUTA S., MORINO Y., SHIBAYAMA Y., SEKINE Y.**, *Adaptative Control of Space Truss Structures by Piezoelectric Actuator*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 3, 697-718, Tsukuba, Japan, **1992**.
- [128] **SKELTON R. E., DE OLIVEIRA M. C.**, *Convexifying LMI Methods for Integrating Structure and Control Design*, 3rd World Conference on Structural Control, Como, Ed. Wiley, In Press, **2002**.
- [129] **SKELTON R. E., HELTON J. W., ADHIKARI R., PINAUD J. P., CHAN W.**, *An Introduction to the Mechanics of Tensegrity Structures*, Handbook on Mechanical Systems Design, pp 1-141, **2001**.
- [130] **SKELTON R.E., PINAUD J.P., MINGORI D.L.**, *Dynamics of the Shell Class of Tensegrity Structures*, Journal of the Franklin Institute, 338, pp 255-320, **2001**.
- [131] **SMITH I. F. C.**, *The Impact of New Measurement Systems on Structural Engineering*, Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection , ed: P. Rastogi and D. Inaudi, pp 1-14, **2000**.
- [132] **SMITH I., SHEA K.**, *Extending active control to build intelligent structures*, Structures for the Future - The Search for Quality, IABSE Reports, 83, 1057-1064, Zurich, Switzerland, **1999**.
- [133] **SNELSON K.**, [www.grunch.net/snelson/](http://www.grunch.net/snelson/).



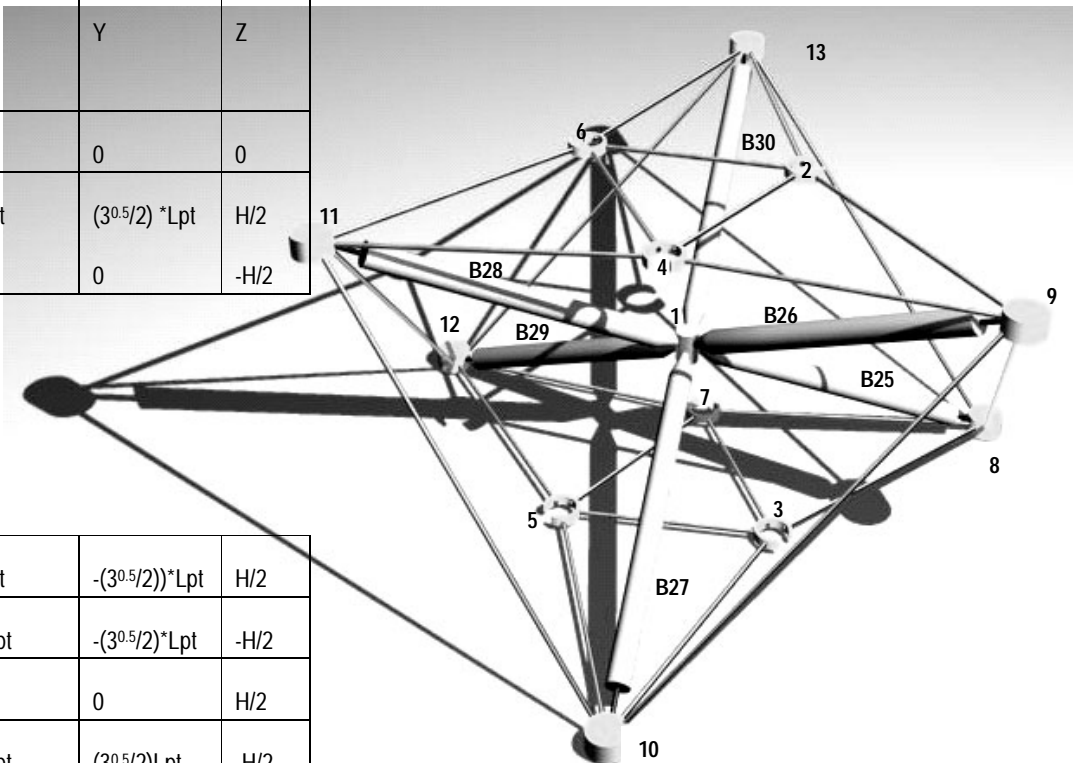
- 
- [134] **SNELSON K.**, *Conitnuous Tension, Discontinuous Compression Structures*, U.S. Patent N°3,169,611, **1965**.
- [135] **SOONG T. T., MANIOLIS G. D.**, *Active Structures*, ASCE- Journal of Structural Engineering, 113 (11), pp 2290-3010, **1987**.
- [136] **SPENCER B. F., SOONG T. T.**, *New Applications and Development of Active and Semi-active and Hybrid Control techniques for Seismic and Non-seismic Vibration in USA*, Proceedings of International Post-SmiRT Conference on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Structures, pp 23-25, Cheju, Korea, **1999**.
- [137] **SPENCER B.F , SAIN M. K. ,** *Controlling Buildings: a New Frontier in Feedback*, IEEE Control Systems, 19-35, **1997**.
- [138] **SULTAN C.**, *Modeling, Design and Control Tensegrity Structures with Applications*, Perdue University, PhD Thesis, **1999**.
- [139] **SULTAN C., CORLESS M., SKELTON R. E.**, *Symmetrical Reconfiguration of Tensegrity Structures*, International Journal of Solids and Structures, Pergamon, 39, pp 2215-2234, **2002**.
- [140] **SWARTZ W., SECHEN C.**, *New Algorithms for the Placement and Routing of Macro Cells*, IEEE Conference on Computer-Aided Design, Santa Clara, pp 336-339, **1990**.
- [141] **TANI A., KAWAMURA H., RYU S.**, *Intelligent Fuzzy Optimal Control of Building Structures*, 20(3), pp 184-92, **1998**.
- [142] **TARCZEWSKI R.**, *Actively Adaptable Structures*, Space Structures, Thomas Telford, London, 5, pp 1501-1510, **2002**.
- [143] **TARNAI T.**, *Higher Order Infinitesimal Mechanism*, Acta antiqua Academiae Scientiarum Hungaricae, 102, pp 363-378, **1989**.
- [144] **TIBERT G.**, *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*, PH, D. thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, **2002**.
- [145] **TIBERT G., PELLEGRINO S.**, *Review of Formfinding Methods for Tensegrity Structures*, [http:// civ.eng.cam.ac.uk/dsl/tensegrity.pdf](http://civ.eng.cam.ac.uk/dsl/tensegrity.pdf) ( last accessed 01/02), **2002**.
- [146] **TOPPING B.H.V. , KHAN A.I. ,** *Dynamic Relaxation Analysis and Design of Engineering Structures*, Structural Engineering Computational Technology Seminar, **1992**.
- [147] **VASSART N, LAPORTE R. , MOTRO R.**, *Detremination of Mechanism's Order for Kinematically and Statically Indetermined Systems*, International Journal of Solids and Structures, 37, pp 3807-3839, France, **2000**.
- [148] **VENTRELLA E., VOLPE A.**, *The Vestrut System and its Application for the New Passengers Terminal "malpensa 2000", Airport of Milan*, Space Frames and Lattices, 1-10, Naples, Italie, **1995**.
- [149] **WADA B.K, DAS S.**, *Application of adaptive structures concepts to civil structures*, Intelligent Structures-Monitoring and Control, 195-217, **1991**.

- [150] **WAKEFIELD D. S.**, *Engineering Analysis of Tension Structures: Theory and Practice*, Engineering structures, 21, 680-690, Bath, UK, **1998**.
- [151] **WANG B.-B.**, *AP & ATP Grids - Bridging Tensegrity to Cable-Strut*, 5th International Conference on Space Structures, Ed. G. A.R. Parke, P. Disney, Thomas Telford, London, 5, pp 1200-1208, **2002**.
- [152] **WANG Z.**, **CHEN S.**, **HAN W.**, *The Static Shape Control for Intelligent Structures*, Finite Elements in Analysis and Design, 26, pp 303-314, **1997**.
- [153] **WANG Z.**, **CHEN S.**, **HAN W.**, *Integrated Structural and Control Optimization of Intelligent Structures*, Engineering Structures, 21, pp 183-191, **1999**.
- [154] **WILLIAMSON D.**, **SKELTON R.E.**, *A General Class of Tensegrity Systems*, **1998**.
- [155] **YANG J. N.**, **KIM J.-H.**, **AGRAWAL A.K.**, *Resetting Semiactive Stiffness for Seismic Response Control*, Journal of Structural Engineering, pp 1427-1433, **2000**.
- [156] **YAO J.T.P.**, *Concept of structural control*, ASCE Journal of the Structural Control, 98, 1567-1574, **1972**.
- [157] **YEN G.G.**, *Reconfigurable Learning Control in Large Space Structures*, IEEE Transactions and Control Systems Technology, 2, 362-370, **1994**.
- [158] **YOU Z.**, *Displacement Control of Prestressed Structures*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 144, pp 51-59, **1997**.
- [159] **ZAGAR Z.**, **DELIC D.**, *Intelligent Computer Integrated Structures: a New Generation of Structures*, Advanced Technologies, 8 p., Zagreb, Croatia, **1993**.
- [160] **ZHANG L.**, **WARDENIER J.**, **EEKHOUT A. C. J. M.**, *Analysis of Various Types of Tensegrity Steel Roof Structures*, 5th International Conference on Space Structures, Ed. G. A.R. Parke, P. Disney, Thomas Telford, London, pp 1227-1236, **2002**.
- [161] **ZUK T.**, *The Next 100 Years of Architecture*, 16th Congress of IABSE, Lucerne 2000, Lucerne, Switzerland, **2000**.
- [162] **ZUK W.**, *Kinetic Architecture*, ASCE Civil Engineering, 62, **1968**.

## Annexes

### Coordonnées d'un module

N° l'élément	X	Y	Z
1	0	0	0
2	$1/2 * Lpt$	$(3^{0.5}/2) * Lpt$	$H/2$
3	$Lpt$	0	$-H/2$



4	$1/2 * Lpt$	$-(3^{0.5}/2) * Lpt$	$H/2$
5	$-1/2 * Lpt$	$-(3^{0.5}/2) * Lpt$	$-H/2$
6	$-Lpt$	0	$H/2$
7	$-1/2 * Lpt$	$(3^{0.5}/2) * Lpt$	$-H/2$
8	$1/2 * Lgt$	$(3^{0.5}/2) * Lgt$	$-H/2$
9	$Lgt$	0	$H/2$
10	$1/2 * Lgt$	$-(3^{0.5}/2) * Lgt$	$-H/2$
11	$-1/2 * Lgt$	$-(3^{0.5}/2) * Lgt$	$H/2$
12	$-Lgt$	0	$-H/2$
13	$-1/2 * Lgt$	$(3^{0.5}/2) * Lgt$	$H/2$

### Topologie

éléments	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
noeud	2	4	6	3	5	7	2	9	4	11	6	13	7	8	3
noeud	4	6	2	5	7	3	9	4	11	6	13	2	8	3	10
éléments	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
noeud	10	5	12	8	9	10	11	12	13	1	1	1	1	1	1
noeud	5	12	7	9	10	11	12	13	8	8	9	10	11	12	13

Lgt=1189 mm

Lpt=689 mm

H=514.5 mm

## Caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure active composée de 5 modules, paramètres d'entrée pour l'analyse structurale

Materials Characteristics				Geometric Characteristi	
MAT	Module Young	Gamma	Sigma	NUMERO GEOM	CROSS-SECTION
	1	36400	5.00E-05	0	13.86
	2	247500	0.00038	1	703
	3	192500	0.00028	2	703
	4	165000	0.00021	3	703
	5	83000	0	4	703
				5	703
				6	703
				7	703
				8	703
				9	703
				10	703
				11	703
				12	703

Initial Nodes Positions							
Node	x	y	z	Node	x	y	z
1	0	0	0	26	982.5	1029.7	514.5
2	1577	0	0	27	594.5	1029.7	-514.5
3	3154	0	0	28	400.5	1365.72	514.5
4	788.5	1365.72	0	29	594.5	1701.74	-514.5
5	2365.5	1365.72	0	30	2559.5	1701.74	514.5
6	194	336.02	514.5	31	2753.5	1365.72	-514.5
7	388	0	-514.5	32	2559.5	1029.7	514.5
8	194	-336.02	514.5	33	2171.5	1029.7	-514.5
9	-194	-336.02	-514.5	34	1977.5	1365.72	514.5
10	-388	0	514.5	35	2171.5	1701.74	-514.5
11	-194	336.02	-514.5	36	594.5	-1029.7	-514.5
12	1771	336.02	514.5	37	-594.5	-1029.7	514.5
13	1965	0	-514.5	38	-1189	0	-514.5
14	1771	-336.02	514.5	39	-594.5	1029.7	514.5
15	1383	-336.02	-514.5	40	2171.5	-1029.7	-514.5
16	1189	0	514.5	41	982.5	-1029.7	514.5
17	1383	336.02	-514.5	42	3748.5	1029.7	-514.5
18	3348	336.02	514.5	43	4343	0	514.5
19	3542	0	-514.5	44	3748.5	-1029.7	-514.5
20	3348	-336.02	514.5	45	2559.5	-1029.7	514.5
21	2960	-336.02	-514.5	46	1383	2395.43	-514.5
22	2766	0	514.5	47	-400.5	1365.72	-514.5
23	2960	336.02	-514.5	48	194	2395.43	514.5
24	982.5	1701.74	514.5	49	2960	2395.43	-514.5
25	1176.5	1365.72	-514.5	50	3554.5	1365.72	514.5
				51	1771	2395.43	514.5

Boundary conditions

-----

Dir Fixed Nodes

X	42		
Y	42	36	
Z	42	36	46

## Links Characteristics

Link	Nodes	Nodes	Type	MAT	GEOM	Link	Nodes	Nodes	Type	MAT	GEOM	Link	Nodes	Nodes	Type	MAT	GEOM
1	6	8	cable	2	1	51	40	41	cable	4	1	101	28	48	cable	3	1
2	8	10	cable	2	1	52	41	7	cable	4	1	102	48	24	cable	3	1
3	10	6	cable	2	1	53	7	26	cable	4	1	103	29	46	cable	3	1
4	7	9	cable	2	1	54	26	33	cable	4	1	104	46	25	cable	3	1
5	9	11	cable	2	1	55	2	33	truss	1	2	105	25	17	cable	3	1
6	11	7	cable	2	1	56	2	22	truss	1	2	106	17	27	cable	3	1
7	6	16	cable	3	1	57	2	40	truss	5	5	107	27	47	cable	3	1
8	16	8	cable	3	1	58	2	41	truss	1	2	108	47	29	cable	3	1
9	8	37	cable	3	1	59	2	7	truss	1	2	109	46	34	cable	4	1
10	37	10	cable	3	1	60	2	26	truss	5	6	110	34	17	cable	4	1
11	10	39	cable	3	1	61	18	20	cable	2	1	111	17	6	cable	4	1
12	39	6	cable	3	1	62	20	22	cable	2	1	112	6	47	cable	4	1
13	11	27	cable	3	1	63	22	18	cable	2	1	113	47	48	cable	4	1
14	27	7	cable	3	1	64	19	21	cable	2	1	114	48	46	cable	4	1
15	7	36	cable	3	1	65	21	23	cable	2	1	115	4	46	truss	1	2
16	36	9	cable	3	1	66	23	19	cable	2	1	116	4	34	truss	5	9
17	9	38	cable	3	1	67	18	43	cable	3	1	117	4	17	truss	1	2
18	38	11	cable	3	1	68	43	20	cable	3	1	118	4	6	truss	1	2
19	27	16	cable	4	1	69	20	45	cable	3	1	119	4	47	truss	5	10
20	16	36	cable	4	1	70	45	22	cable	3	1	120	4	48	truss	1	2
21	36	37	cable	4	1	71	22	32	cable	3	1	121	30	32	cable	2	1
22	37	38	cable	4	1	72	32	18	cable	3	1	122	32	34	cable	2	1
23	38	39	cable	4	1	73	23	42	cable	3	1	123	34	30	cable	2	1
24	39	27	cable	4	1	74	42	19	cable	3	1	124	31	33	cable	2	1
25	1	27	truss	1	2	75	19	44	cable	3	1	125	33	35	cable	2	1
26	1	16	truss	5	3	76	44	21	cable	3	1	126	35	31	cable	2	1
27	1	36	truss	1	2	77	21	13	cable	3	1	127	30	50	cable	3	1
28	1	37	truss	1	2	78	13	23	cable	3	1	128	50	32	cable	3	1
29	1	38	truss	5	4	79	42	43	cable	4	1	129	32	12	cable	3	1
30	1	39	truss	1	2	80	43	44	cable	4	1	130	12	34	cable	3	1
31	12	14	cable	2	1	81	44	45	cable	4	1	131	34	51	cable	3	1
32	14	16	cable	2	1	82	45	13	cable	4	1	132	51	30	cable	3	1
33	16	12	cable	2	1	83	13	32	cable	4	1	133	35	49	cable	3	1
34	13	15	cable	2	1	84	32	42	cable	4	1	134	49	31	cable	3	1
35	15	17	cable	2	1	85	3	42	truss	1	2	135	31	23	cable	3	1
36	17	13	cable	2	1	86	3	43	truss	1	2	136	23	33	cable	3	1
37	12	22	cable	3	1	87	3	44	truss	5	7	137	33	25	cable	3	1
38	22	14	cable	3	1	88	3	45	truss	1	2	138	25	35	cable	3	1
39	14	41	cable	3	1	89	3	13	truss	1	2	139	49	50	cable	2	1
40	41	16	cable	3	1	90	3	32	truss	5	8	140	50	23	cable	4	1
41	16	26	cable	3	1	91	24	26	cable	2	1	141	23	12	cable	4	1
42	26	12	cable	3	1	92	26	28	cable	2	1	142	12	25	cable	4	1
43	17	33	cable	3	1	93	28	24	cable	2	1	143	25	51	cable	4	1
44	33	13	cable	3	1	94	25	27	cable	2	1	144	51	49	cable	4	1
45	13	40	cable	3	1	95	27	29	cable	2	1	145	5	49	truss	5	11
46	40	15	cable	3	1	96	29	25	cable	2	1	146	5	50	truss	1	2
47	15	7	cable	3	1	97	24	34	cable	3	1	147	5	23	truss	1	2
48	7	17	cable	3	1	98	34	26	cable	3	1	148	5	12	truss	5	12
49	33	22	cable	4	1	99	26	6	cable	3	1	149	5	25	truss	1	2
50	22	40	cable	4	1	100	6	28	cable	3	1	150	5	51	truss	1	2

## Nodal Forces

-----

Node	Fx	Fy	Fz	Node	Fx	Fy	Fz
1	0	0	-325	26	0	0	-289
2	0	0	-325	27	0	0	-29
3	0	0	-325	28	0	0	-16
4	0	0	-325	29	0	0	-16
5	0	0	-325	30	0	0	-16
6	0	0	-29	31	0	0	-16
7	0	0	-29	32	0	0	-289
8	0	0	-16	33	0	0	-29
9	0	0	-16	34	0	0	-289
10	0	0	-16	35	0	0	-16
11	0	0	-16	36	0	0	-15
12	0	0	-289	37	0	0	-15
13	0	0	-29	38	0	0	-275
14	0	0	-16	39	0	0	-15
15	0	0	-16	40	0	0	-275
16	0	0	-289	41	0	0	-15
17	0	0	-29	42	0	0	-15
18	0	0	-16	43	0	0	-15
19	0	0	-16	44	0	0	-275
20	0	0	-16	45	0	0	-15
21	0	0	-16	46	0	0	-15
22	0	0	-29	47	0	0	-275
23	0	0	-29	48	0	0	-15
24	0	0	-16	49	0	0	-275
25	0	0	-29	50	0	0	-15
				51	0	0	-15

## NODAL VALUES

Node	Coordinates			Displacements			Node	Coordinates			Displacements		
1	-12.679	3.143	-4.49	-12.679	3.143	-4.49	26	968.7	1030.52	489	-13.8	0.8203	-25
2	1566.9	-0.26	-25.4	-10.091	-0.26	-25.4	27	589.4	1034.12	-513	-5.12	4.4224	1.13
3	3146.1	-3.42	-10.7	-7.9523	-3.42	-10.7	28	387	1367.31	498	-13.5	1.5863	-16
4	779.23	1368	-9.33	-9.2746	2.495	-9.33	29	590	1706.5	-525	-4.47	4.7596	-10
5	2358.5	1366	-21.3	-7.0422	0.521	-21.3	30	2549	1699.55	499	-11	-2.1868	-16
6	177.85	336.4	498	-16.151	0.41	-16.1	31	2751	1367.83	-533	-2.71	2.1098	-19
7	379.98	2.831	-550	-8.017	2.831	-35.6	32	2548	1027.24	504	-11.6	-2.4558	-10
8	176.62	-336	509	-17.38	0.377	-5.83	33	2168	1032.25	-532	-3.31	2.5543	-17
9	-202.78	-332	-530	-8.7775	4.084	-15.5	34	1966	1364.27	516	-11.3	-1.4475	1.9
10	-404.34	2.964	505	-16.335	2.964	-9.67	35	2169	1704.55	-537	-2.56	2.8076	-23
11	-201.06	340.3	-529	-7.0561	4.264	-14.9	36	584.9	-1029.7	-515	-9.61	0	0
12	1757	333.3	485	-14.028	-2.68	-29.3	37	-616.6	-1027.15	504	-22.1	2.5458	-11
13	1959.4	0.973	-536	-5.5798	0.973	-21.7	38	-1199	7.74066	-532	-10	7.7407	-17
14	1755.8	-338	498	-15.213	-2.12	-17	39	-609.8	1034.88	508	-15.3	5.1775	-6.2
15	1376.7	-334	-543	-6.3174	1.813	-28.8	40	2165	-1031.4	-540	-6.92	-1.7024	-25
16	1174.6	-0.85	521	-14.447	-0.85	6.128	41	965.6	-1031.96	483	-16.9	-2.257	-32
17	1377.6	337.7	-523	-5.4432	1.699	-8.95	42	3749	1029.7	-515	0	0	0
18	3336.4	330.2	506	-11.556	-5.82	-8.67	43	4333	-9.17254	515	-10.4	-9.1725	0.59
19	3538.7	-1.44	-526	-3.2585	-1.44	-11.4	44	3744	-1033.57	-527	-4.62	-3.8721	-13
20	3334.9	-342	502	-13.091	-6.08	-12.2	45	2545	-1036.29	495	-15	-6.5923	-20
21	2955.9	-336	-533	-4.0553	-0.46	-18.6	46	1381	2400.96	-515	-1.94	5.5263	0
22	2753.6	-4.71	500	-12.43	-4.71	-14.7	47	-407.3	1370.92	-536	-6.77	5.1966	-22
23	2957.2	335.8	-535	-2.7965	-0.27	-20.1	48	179.8	2398.49	504	-14.2	3.0553	-10
24	969.64	1703	504	-12.86	0.948	-10.3	49	2959	2399.58	-528	-0.81	4.1468	-13
25	1171.3	1370	-545	-5.2265	3.929	-30.8	50	3546	1363.38	503	-8.98	-2.3354	-11
							51	1760	2396.39	493	-10.9	0.9587	-21

## Liste des figures

<i>Figure 1.1:</i>	<i>Différents chemins de lecture de la thèse</i>	6
<i>Figure 2.1:</i>	<i>Convergence de trois disciplines</i>	10
<i>Figure 2.2:</i>	<i>Comparaison de la nouvelle approche avec l'approche classique [127]</i>	11
<i>Figure 2.3:</i>	<i>Exemple d'un mécanisme fini</i>	16
<i>Figure 2.4:</i>	<i>Exemple d'un mécanisme infinitésimal</i>	16
<i>Figure 3.1:</i>	<i>Vue en plan de l'élément modulaire</i>	30
<i>Figure 3.2:</i>	<i>Vue en élévation de l'élément modulaire</i>	31
<i>Figure 3.3:</i>	<i>Photo plan de la structure composée de trois modules. Remarquons qu'entre modules les éléments comprimés ne se touchent pas. Des plots en béton surélèvent la structure de 0.75 mètres.</i>	31
<i>Figure 3.4:</i>	<i>Vue en plan de la structure composée de trois modules</i>	32
<i>Figure 3.5:</i>	<i>Photo en élévation mettant en évidence les appuis en béton surélevant la structure.</i>	32
<i>Figure 3.6:</i>	<i>Vue en élévation de la structure composée de trois modules: les trois couches de la structure sont mises en évidence</i>	33
<i>Figure 3.7:</i>	<i>Photo en perspective de la structure composée de cinq modules. Remarquons l'asymétrie de la structure et que deux modules ne sont pas appuyés</i>	34
<i>Figure 3.8:</i>	<i>Photo en élévation de la structure composée de cinq modules surélevée par trois appuis. Notez le noeud central se résumant à une sphère.</i>	34
<i>Figure 3.9:</i>	<i>Vue en plan de la structure composée de cinq modules la structure : remarquons que le Module 2 et Module 5 ne sont pas appuyés</i>	35
<i>Figure 3.10:</i>	<i>Section variable du tube Notez l'excentricité du centre de gravité, source d'excentricité et de frottement dans les assemblages</i>	37
<i>Figure 3.11:</i>	<i>Photo du flambage d'un tube</i>	38
<i>Figure 3.12:</i>	<i>Endommagement d'une barre en Fiberline créée par un choc</i>	38
<i>Figure 3.13:</i>	<i>Description d'un câble</i>	39
<i>Figure 3.14:</i>	<i>Extrémité du câble de longueur fixe</i>	39
<i>Figure 3.15:</i>	<i>Système télescopique décomposé pour la structure composée de trois et cinq modules</i>	40

<i>Figure 3.16:</i>	<i>Système de réglage de la longueur du câble</i>	41
<i>Figure 3.17:</i>	<i>Schéma d'une rotule de traction. La partie remplie est la pièce fixe.</i>	42
<i>Figure 3.18:</i>	<i>Schéma de deux rotules de compression. La partie remplie est la pièce fixe</i>	42
<i>Figure 3.19:</i>	<i>Extrémité de la barre s'appuyant sur le nœud N°1</i>	43
<i>Figure 3.20:</i>	<i>Noeud central, N°1, de la structure composée de trois modules</i>	43
<i>Figure 3.21:</i>	<i>Evolution du noeud central N°1 (Figure 3.20), nœud central N°2 (2001)</i>	44
<i>Figure 3.22:</i>	<i>Extrémité de la barre s'appuyant sur la sphère pour le nœud N°3</i>	44
<i>Figure 3.23:</i>	<i>Vues d'un noeud central, nœud N°3 (2001), de la structure composée de cinq modules</i>	45
<i>Figure 3.24:</i>	<i>Vues d'un noeud central, N°3 équipé de son cylindre de sécurité. Remarquons que le cylindre ne fait que reposer sur les barres supérieures</i>	45
<i>Figure 3.25:</i>	<i>Vue en coupe du noeud N°3. Remarquez que les barres convergent toujours au centre de la sphère</i>	46
<i>Figure 3.26:</i>	<i>Schéma du noeud central N°2. Remarquez que les barres ne convergent pas toujours et impliquent la rotation du noeud</i>	46
<i>Figure 3.27:</i>	<i>Assemblage modulaire décomposé (1999)</i>	47
<i>Figure 3.28:</i>	<i>Evolution de l'assemblage modulaire (2002)</i>	47
<i>Figure 3.29:</i>	<i>Appui fixe</i>	48
<i>Figure 3.30:</i>	<i>Appui unidirectionnel</i>	48
<i>Figure 3.31:</i>	<i>Appui bidirectionnel</i>	49
<i>Figure 3.32:</i>	<i>Tension Gauge® mis en place sur un câble</i>	50
<i>Figure 3.33:</i>	<i>Schéma du montage d'un module</i>	52
<i>Figure 3.34:</i>	<i>Noeud destiné au montage d'un module</i>	53
<i>Figure 3.35:</i>	<i>Le noeud N°3 et ses six barres</i>	54
<i>Figure 3.36:</i>	<i>Schéma du dispositif de la structure active</i>	56
<i>Figure 3.37:</i>	<i>Vue globale de la structure et de son système de contrôle actif et de son créateur</i>	56
<i>Figure 3.38:</i>	<i>Vue en plan mettant en évidence la position des vérins</i>	57
<i>Figure 3.39:</i>	<i>Avantages et désavantages des technologies pour l'application</i>	58
<i>Figure 3.40:</i>	<i>Vue en élévation d'un actuateur implanté dans une barre. Notez le capteur inductif, le microrupteur de sécurité, la lampe témoin et la fixation de sécurité</i>	59
<i>Figure 3.41:</i>	<i>Variateur de fréquence et module de communication pour le bus, CDA 32.008</i>	60
<i>Figure 3.42:</i>	<i>Face avant de l'amplificateur de mesure d'un capteur inductif, MPE-MP55</i>	61
<i>Figure 3.43:</i>	<i>Capteur LVDT, mesurant le déplacement d'un nœud</i>	61



<i>Figure 3.44:</i>	<i>Détails de la fixation de la tige du capteur au piston du vérin</i>	62
<i>Figure 3.45:</i>	<i>Vue en coupe longitudinale des extrémités du vérin permettant l'intégration dans la barre. Notons qu'à ces deux extrémités le vérin est simplement enfilé dans le tube en Fiberline.</i>	63
<i>Figure 3.46:</i>	<i>Face avant du panneau regroupant des appareils</i>	65
<i>Figure 3.47:</i>	<i>Schéma du transfert des informations</i>	67
<i>Figure 3.48:</i>	<i>Panneau de contrôle développé sur LabVIEW</i>	68
<i>Figure 3.49:</i>	<i>Microrupteur de commande de fin de course. Remarquons que la course avant et arrière peut être réglée. La course maximale du piston entre borne est de +/- 30 mm</i>	70
<i>Figure 3.50:</i>	<i>Rupteur de commande pour le déplacement vertical descendant d'un nœud</i>	70
<i>Figure 3.51:</i>	<i>Rupteur de commande pour le déplacement vertical ascendant et descendant d'un nœud</i>	70
<i>Figure 4.1:</i>	<i>Boucle de contrôle pour le contrôle de la forme</i>	76
<i>Figure 4.2:</i>	<i>Relations entre longueurs des éléments télescopiques et géométrie de la structure</i>	76
<i>Figure 4.3:</i>	<i>Espace des solutions. L'utilisation de l'axe vertical logarithmique montre la relation exponentielle entre le nombre de solutions et le nombre de barres télescopiques</i>	77
<i>Figure 4.4:</i>	<i>Vue en plan de 3M : Position des capteurs de déplacement et des charges</i>	80
<i>Figure 4.5:</i>	<i>Vue en élévation de 3M : Position des capteurs de déplacement et des charges</i>	81
<i>Figure 4.6:</i>	<i>Vue en plan de 3M : Position de la surface de contrôle et des charges</i>	82
<i>Figure 4.7:</i>	<i>Schéma du contrôle de la pente</i>	83
<i>Figure 4.8:</i>	<i>Description des mouvements d'une barre télescopique</i>	83
<i>Figure 4.9:</i>	<i>Procédure de chargement pour le contrôle de la pente</i>	85
<i>Figure 4.10:</i>	<i>Corrélation entre le modèle analytique et les mesures expérimentales</i>	87
<i>Figure 4.11:</i>	<i>Comportement de la structure soumise à une sollicitation asymétrique</i>	89
<i>Figure 4.12:</i>	<i>Comportement de 3M soumise à une charge symétrique</i>	90
<i>Figure 4.13:</i>	<i>Superposition élastique de déplacement pour prédire le comportement</i>	92
<i>Figure 4.14:</i>	<i>Réponse de la structure en fonction du nombre de barres modifiées. Comparaison des 2 méthodes prédictives</i>	94
<i>Figure 4.15:</i>	<i>Vue en plan de 5M, position des capteurs et des charges</i>	95
<i>Figure 4.16:</i>	<i>Chargement asymétrique : Déplacement du Nœud 50 du module 5.</i>	95
<i>Figure 4.17:</i>	<i>Chargement asymétrique : Déplacement du Nœud 45 du module 3.</i>	95

<i>Figure 4.18:</i>	<i>Superposition élastique pour prédire le comportement : Déplacements au Nœud 50, superposition des charges au nœuds 48 et 37</i>	96
<i>Figure 4.19:</i>	<i>Réponse de la structure en fonction du nombre de barres modifiées.</i>	97
<i>Figure 4.20:</i>	<i>Schéma des déplacements simulée pour une solution générée par le recuit simulé avec le modèle analytique implémenté dans la relaxation dynamique, cas de charge n°2</i>	99
<i>Figure 4.21:</i>	<i>Contrôle de la pente avec cinq barres actives par module</i>	100
<i>Figure 4.22:</i>	<i>Contrôle de la pente avec deux barres actives par module</i>	101
<i>Figure 5.1:</i>	<i>Position des actuateurs et capteurs de déplacement verticale</i>	106
<i>Figure 5.2:</i>	<i>Boucle de contrôle pour le contrôle de la forme</i>	108
<i>Figure 5.3:</i>	<i>Relations entre longueurs des éléments télescopiques et la géométrie de la structure</i>	108
<i>Figure 5.4:</i>	<i>Schéma des quatre boucles imbriquées de PGS� [112,113]</i>	109
<i>Figure 5.5:</i>	<i>Vue en plan de 5M : Positions des nœuds mesurés et de référence pour la pente</i>	110
<i>Figure 5.6:</i>	<i>Schéma du contrôle de la pente</i>	111
<i>Figure 5.7:</i>	<i>Procédure de chargement pour le contrôle de la pente</i>	114
<i>Figure 5.8:</i>	<i>Positions des charges sur la couche supérieure de la structure</i>	115
<i>Figure 5.9:</i>	<i>Schéma des déplacements de la compensation de la pente pour le cas de charge n°8</i>	119
<i>Figure 5.10:</i>	<i>Corrélation entre la pente simulée par le modèle analytique et mesurée pour les cas de charge ponctuelle</i>	121
<i>Figure 5.11:</i>	<i>Compensation de la pente pour les cas de charge ponctuelle</i>	122
<i>Figure 5.12:</i>	<i>Robustesse du système, Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour un cas de charge ponctuelle, cas de charge n°3</i>	123
<i>Figure 5.13:</i>	<i>Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour le cas de charge n°9. Notez que la commande n'a pas été fractionnée.</i>	123
<i>Figure 5.14:</i>	<i>Corrélation entre la pente simulée par le modèle analytique et mesurée pour les cas de charge deux nœuds</i>	124
<i>Figure 5.15:</i>	<i>Compensation de la pente pour les cas de charge ponctuelle pour les cas de charge deux nœuds</i>	126
<i>Figure 5.16:</i>	<i>Robustesse du système. Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour un cas de charge deux nœuds, cas de charge n°15</i>	126
<i>Figure 5.17:</i>	<i>Robustesse du système. Comparaison de la compensation de la pente simulée et mesurée pour un cas de charge deux nœuds, cas de charge n°23</i>	127

---

<i>Figure 5.18:</i>	<i>Comparaison de deux commandes pour un cas de charge deux nœuds, cas de charge n°14</i>	<i>128</i>
<i>Figure 6.1:</i>	<i>Existence de nouvelles solutions pour des étapes intermédiaires</i>	<i>132</i>
<i>Figure 6.2:</i>	<i>Existence de solutions meilleures pour des étapes intermédiaires</i>	<i>132</i>
<i>Figure 6.3:</i>	<i>Comparaison de deux commandes pour des allongements maximaux différents, cas de charge n°12</i>	<i>134</i>
<i>Figure 6.4:</i>	<i>Une nouvelle solution pour compenser la pente</i>	<i>135</i>
<i>Figure 6.5:</i>	<i>Schéma comparatif de structures autoréparable et classique</i>	<i>137</i>



## Liste des tableaux

<i>Tableau 2.1:</i>	<i>Récapitulatif des propriétés d'un treillis</i>	18
<i>Tableau 3.1:</i>	<i>Récapitulatif des caractéristiques mécaniques et géométriques moyennes du tube en Fiberline</i>	37
<i>Tableau 3.2:</i>	<i>Caractéristiques mécaniques et géométriques du câble</i>	40
<i>Tableau 3.3:</i>	<i>Position des actuateurs et des capteurs sur la structure 5M</i>	57
<i>Tableau 3.4:</i>	<i>Caractéristiques principales des éléments constituant l'actuateur</i>	60
<i>Tableau 3.5:</i>	<i>Paramètres principaux de fonctionnement du moteur</i>	61
<i>Tableau 3.6:</i>	<i>Caractéristiques des capteurs inductif et de l'amplificateur à fréquence porteuse</i>	62
<i>Tableau 3.7:</i>	<i>Les paramètres de communication sur le bus</i>	67
<i>Tableau 3.8:</i>	<i>Caractéristiques de la carte d'interface CAN</i>	68
<i>Tableau 3.9:</i>	<i>Valeurs des bornes des systèmes de sécurité</i>	71
<i>Tableau 4.1:</i>	<i>Description du type, de la position et de l'amplitude des charges verticales et la position des nœuds mesurés</i>	79
<i>Tableau 4.2:</i>	<i>Cas de charge pour le contrôle de la pente</i>	85
<i>Tableau 4.3:</i>	<i>Exemple de deux commandes avec quinze barres actives pour le cas de charge n°2</i>	98
<i>Tableau 4.4:</i>	<i>Comparaison des déplacements mesurés et simulés de la solution du Tableau 4.3 pour le cas de charge n°2. Les trois nœuds initialement sont à la même hauteur.</i>	99
<i>Tableau 5.1:</i>	<i>Position des actuateurs et des capteurs sur la structure 5M</i>	107
<i>Tableau 5.2:</i>	<i>Contraintes et objectifs imposés pour la recherche d'une commande</i>	112
<i>Tableau 5.3:</i>	<i>Cas de charges appliqués à la structure</i>	116

<i>Tableau 5.4:</i>	<i>Exemple de la séquence d'une commande appliquée en trois fractions, cas de charge n°8</i>	<i>119</i>
<i>Tableau 5.5:</i>	<i>Exemple des déplacements et de la pente pour le cas de charge n°8</i>	<i>120</i>
<i>Tableau 6.1:</i>	<i>Récapitulatif des caractéristiques calculées des différentes configurations de tensegrité de l'IMAC</i>	<i>139</i>

# Curriculum Vitae

## Etienne Fest

Français  
Né le 15 avril 1974 à Mulhouse, France  
etienne\_fest@hotmail.com



## Formation

---

<b>Docteur ès sciences</b> Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse	<b>2002</b>
<b>Diplôme d'études Approfondies MAISE, Matériaux Avancés, Ingénierie des Structures et des Enveloppes</b> Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Paris, France	<b>1997</b>
<b>Maîtrise de Mécanique &amp; Licence de Mécanique</b> Université Louis Pasteur, Strasbourg, France	<b>1996-1995</b>
<b>Diplômes d'études Universitaires Générales type A (Deug)</b> Science des structures et de la matière, option électronique-électrotechnique-automatique Université de Haute Alsace, Mulhouse, France	<b>1994</b>
<b>Baccalauréat scientifique type C, Mulhouse, France</b>	<b>1992</b>

## Langues étrangères

---

**Français:** langue maternelle  
**Anglais:** très bonnes connaissances  
**Allemand:** bonnes connaissances  
**Espagnol:** notions de base  
**Italien:** notions de base

## Expériences professionnelles

---

<b>Travail de doctorat</b> intitulé « Une structure active de type tensegrité » : combine des développements avancés d'intelligence artificielle, d'automatique, de mesure des déformations et de mécanique des structures. Développement, construction et essais du système.	<b>1999-2002</b>
<b>Assistanat scientifique :</b>	<b>depuis 1998</b>
➤ <b>Chargé de l'enseignement</b> pour les travaux dirigés de « Dynamique des structures », et travaux pratiques de « Acoustique des matériaux »	
➤ <b>Collaboration</b> dans le projet: « Constraint-Based Risk Assessment for Construction Projects » : analyse de risque pour les constructions de génie civil.	<b>1998-2001</b>
➤ <b>Expertises</b> pour les Transports Publics Genevois, "Etudes des nuisances sonores occasionnées par les rails de tramways dans les courbes" et "Fissuration des joints de bords des rails"	<b>1998</b>
➤ Développement d'un « Système automatisé de mesure des déformations par inclinométrie pour le suivi à long terme des ouvrages d'art »	<b>1997</b>
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil et Département de Matériaux	

Monteur-mécanicien, chef d'équipe  
Atelier de Construction et Réparation de Richwiller, France

**1993 à 1996**  
**juillet-août**

---

### **Distinction et brevet**

**Nomination pour un prix** pour une publication par le Journal of Structural Engineering (American Society of Civil Engineer)  
Dépôt d'un **brevet** en cours, « Rotule, assemblage pour des éléments en compression »

---

### **Centres d'intérêt**

**Organisateur** de manifestations

**Activités sportives** : tennis (**compétition** depuis 1985), football, sports de glisse alpin et nautique

Arbitre de tennis

Connaisseur de vins et spiritueux

---

### **Publications à comité de lecture**

**FEST E., SHEA K., SMITH I. F. C.**, *An Active Tensegrity Structure*, ASCE - Journal of Structural Engineering, soumis.

**FEST E., DOMER B., SMITH I.F.C.**, *Vers des systèmes intelligents: l'exemple d'une structure active de type tensegrité*, Tracés , 13 , **2003**.

**DOMER B., FEST E., LALIT V., SMITH I. F. C.**, *Combining the Dynamic Relaxation Method with Artificial Neural Networks to Enhance Simulation of Tensegrity Structures*, ASCE - Journal of Structural Engineering, 129 (5), pp 515-526, **2003**.

**FEST E., SHEA K., DOMER B., SMITH I. F. C.**, *Adjustable Tensegrity Structures*, ASCE - Journal of Structural Engineering, 129 (4), pp 672-681, **2003**.

**FEST E., DOMER B., SHEA K., SMITH I.F.C.**, *Towards Intelligent Tensegrity Structures*, Proceedings of the Third World Conference on Structural Control, ed. F. Casciati, Wiley, Como, Italie, pp 449-455, **2003**.

**FEST E., SMITH I.F.C.**, *Construction et Caractérisation d'une Structure de Tensegrité*, Revue Française du Génie Civil, Edition Spéciale "Tensegrité: Analyse et Progrès", to be published, **2003**.

**FEST E.**, *Une structure active de type tensegrité*, Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 168 p, **2002**

**FEST E., SMITH I.F.C.**, *Deux Structures Actives de Type Tensegrité*, CTICM - Revue Construction Métallique, 3, pp 19-27, **2002**.

**SHEA K., FEST E., SMITH I.F.C.**, *Developping Intelligent Tensegrity Structures with Stochastic Search*, Advanced Engineering Informatics, Elsevier, 16, pp 21-40, **2002**.

**SMITH I.F.C., SHEA, K. AND FEST E.** *Computational control for active structures* Advanced Technologies in Structural Engineering, Structures Congress, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, , pp 1-8, **2000**.