



HAL
open science

Du souple vers le raide : évolutivité entre les phases de construction et de service des structures de couverture et de franchissement en fibres végétales et en bois : Conception et fabrication issues de la confrontation de résultats expérimentaux sur modèles réduits aux modèles numériques par relaxation dynamique

Marc-Noël Leyral

► **To cite this version:**

Marc-Noël Leyral. Du souple vers le raide : évolutivité entre les phases de construction et de service des structures de couverture et de franchissement en fibres végétales et en bois : Conception et fabrication issues de la confrontation de résultats expérimentaux sur modèles réduits aux modèles numériques par relaxation dynamique. Art et histoire de l'art. HESAM Université, 2023. Français. NNT : 2023HESAC041 . tel-04606843

HAL Id: tel-04606843

<https://theses.hal.science/tel-04606843>

Submitted on 10 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE ABBÉ GRÉGOIRE
Laboratoire MAP-MAACC

THÈSE EN VAE

présentée par : **Marc-Noël LEYRAL**

soutenue le : **26 octobre 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée au : **Conservatoire national des arts et métiers**

Discipline : **Architecture, urbanisme, environnement**

Spécialité : **Architecture**

Du souple vers le raide : évolutivité entre les phases de construction et de service des structures de couverture et de franchissement en fibres végétales et en bois.

Conception et fabrication issues de la confrontation de résultats expérimentaux sur modèles réduits aux modèles numériques par relaxation dynamique.

THÈSE dirigée par :
Monsieur GUENA François

Jury

Mme. Tine TYSMANS, Professeure, Département Mechanics of Materials and Constructions - MEMC, Vrije Universiteit Brussel
Présidente

M. Denis ZASTAVNI, Professeur, Institut de Recherche de Louvain pour le Territoire, l'Architecture, l'Environnement Construit (LAB) & Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), UCL Louvain
Rapporteur

M. Liberato FERRARA, Professeur, Département d'Ingénierie civile et environnementale, Politecnico de Milan (POLIMI)
Rapporteur

Mme. Sophie WU, Ir. Arch., Directrice associée, Equilibrium
Examinatrice

M. Klaas DE RYCKE, Ir. Arch., Associé et gérant, Bollinger+Grohmann Ingenieure
Examineur

M. François GUENA, Professeur, Directeur scientifique au MAP-MAACC, ENSA Paris-la-Villette
Directeur

À mes enfants Charles et Olympe.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes encadrants. Mon directeur de thèse, François Guéna, enseignant-chercheur à l'ENSA de Paris-la-Villette, spécialiste en modélisation pour l'Assistance à l'Activité Cognitive de Conception qui a eu la bienveillance de m'accueillir dans cette aventure inhabituelle, la patience de m'encadrer mais aussi pour son aide inestimable durant le projet BAYA, notamment dans la réalisation des photogrammétriques du nid et des arbres du projet.

Je remercie chaleureusement mes rapporteurs, Dr. Liberato Ferrara, professeur de conception et d'analyse des structures au Politecnico de Milan (POLIMI) et Dr. Denis Zastavni, Professeur à l'institut de recherches de Louvain, pour le temps consacré à suivre ce travail.

Liberato, une pensée particulièrement émue pour toi en me souvenant que tu avais déjà co-encadré ma tesi di laurea de master en architecture, il y a maintenant 11 ans. Jamais je n'oublierais l'humanité et la bienveillance qui ont été tiennes. Merci pour tout.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Tine Tysmans, Professeure au département Mécanique des matériaux et des constructions de l'École polytechnique de Bruxelles, Sophie Wu, Directrice associée du BET structures Equilibrium Paris et Klaas De Rycke, Associé et gérant et Bollinger+Grohmann qui ont accepté de faire partie du jury respectivement en leur qualité de présidente et de praticienne et praticien experts du domaine.

Le CNAM et l'École Doctorale Abbé Grégoire, ainsi que tous ceux qui m'y ont suivi.

Je tiens également à remercier le laboratoire AMP de l'ENSA-PLV et en particulier Rosa De Marco, Yann Nussaume et Olivier Jeudy.

L'ENSA de Paris-la-Villette, notamment Caroline Lecourtois, directrice, Vincentella De Comarmond, directrice adjointe, Frédéric Sallet secrétaire général, Anne d'Orazio et Thomas Elefteriou, ancienne présidente et nouveau président du C.A., Bruno Petit et Philippe Agricole de l'atelier maintenance, Philippe Bourdier, responsable de la vie étudiante, et Marc Fayolle De Mans, Jacques Bergna et Alain Raynaud de l'atelier maquette, Jérôme Candevan, Samuel Bruna, Nourel Amzil pour nous soutenir chaque année dans le cadre pédagogique de ce cours exigeant.

Mes collègues enseignants et notamment, Sylvain, Quentin avec qui on partage une large part de l'aventure, les membres et contributeurs de l'association Construire l'Architecture, Suzel, Dalil, Vincent, Yves et Yves, Nazila, Franck, Maria, Paul, Lucie, Sara, Guillaume et Guillaume, Olivier, Laetitia, Patrick et tous ceux que je n'ai pas cités. Raphaël, Fred et Mario, les anciens de la constru échelle 1.

Pierre Jehel et l'école Centrale-Supélec de Paris, pour la collaboration avec l'ENSA-Paris-la-Villette.

Tous les intervenants du cours depuis le début : Nicolas Didier, Martial Marquet, Nicolas Polaert et Edouard Bernard, Guillaume Bonin, Sébastien Perrault, Gabriel Bernard Guelle, Félix Noblot et tous les membres des jurys.

Mes étudiants avec qui j'apprends (au moins) autant que je transmets !

La Mairie de Paris et la Mairie du XIX, en particulier Sophie Godard, Cécile Becker, Eric de Grootte, Philippe Clayette et Sylvie Roudier, pour leur soutien dans le cadre du partenariat qui nous lie, ainsi que les habitants du XIXe, M. le Maire François Dagnaud et Mme. la première adjointe Halima Jemni.

BM Montage de la famille Busson (en particulier le fiston Arnaud) qui fabrique et nous donne chaque année les pièces métalliques. Marlène Mivielle (Fédération Nationale du Bois) et Guillaume Peltier (DEQUECKER Productions), pour nous avoir aidé à nous fournir en bois de frêne. Mustapha Bialatne et Piveteau Bois qui a fréquemment été un partenaire précieux. Würth France et son pôle ingénierie, en particulier Stephen Conord pour le nouveau partenariat que nous construisons ensemble.

Valéry Schollaert, ornithologue, et Roger Hérisset, expert en vannerie et docteur en ethnologie à l'Université de Bretagne Occidentale pour votre éclairage de spécialistes durant Baya.

Le Muséum National d'Histoire Naturelle, et en particulier Delphine Brabant et Florent Goussard, chercheurs en paléontologie et en anatomie comparée, pour leur gentillesse, leur temps et leur pédagogie, ainsi que pour l'accès à leurs outils numériques pour la réalisation du scanner surfacique et de la photogrammétrie du nid dans un contexte sanitaire compliqué.

Le docteur Jean-Robert Blondeau et le service de radiologie de l'hôpital de Pont-l'Abbé pour leur gentillesse et leur passion, et sans qui nous n'aurions pas pu réaliser de scanner à rayons X de notre nid de tisserin de Baya !

Benjamin Marolleau, de La Teinturerie, Christophe Kerrero, recteur de la Chancellerie des Universités de Paris, Florianne Le Thiez-Carotenuto de la Chancellerie des Universités de Paris, les École d'Art Boule et Duperré, le Campus métiers d'art, Séverine & Patrick Boyer (Osier de Gué-droit). Nicolas Prévost et Salomé Chantob, Victor Bardy et Marie Merle, Mélanie Bento, Albin Breugnot. Anna Danielsson. Geoffrey Clamour and Camille Sineau du BETA. Tous les étudiantes et toutes les étudiantes ayant participé aux chantiers participatifs. La ville de Richelieu et la famille Hymans. Merci pour votre contribution à la folle aventure de la passerelle en osier !

Salem Mostefaoui, Olivier Leclerc, David Cousin-Marsy et Olivier Namias pour vos superbes photographies et vos précieux conseils sur la diffusion de nos actions.

Tous ceux qui nous suivent pour Construire l'Architecture et ceux qui nous contactent, nous répondent ou nous aident dans nos études à l'instar de l'ETSA Madrid et de la Dr. Almudena Majano Majano, du Dr. Jef Rombouts, ingénieur et architecte, et de Ludovic Regnault, architecte, de Bollinger + Grohmann et du Dr. Bernardino D'Amico que nous avons contacté en 2017.

Caroline Simmenauer et Wided Cherif pour la collaboration à la rédaction, la relecture et les corrections.

Mes collègues chez VPG (dont Dimitri et Charles mes relecteurs pour Faire Tenir), mes collègues de B+G et parmi eux Klaas qui a mis énergie et moyens à ma disposition pour mener diverses recherches et Nicolas et Paul pour leur aide précieuse parfois au dernier moment. Mes collègues d'EVP et notamment Marc qui organise les Utopies Constructives et Quentin Chef mon binôme sur ces recherches.

À Papa et à Maman, qui m'ont donné le goût de l'enseignement et de la recherche mais qui, par-dessus tout, m'ont appris à apprendre. J'espère que vous fiers de là où vous vous trouvez. Merci tout particulièrement à ma tante Sylvie. À mes frères Hervé et Jérôme, leurs épouses Carine et Gwéna et tous mes neveux et nièces. Merci d'être là pour moi et de m'avoir donné envie de poursuivre ce but. À ma famille, Michel et Marie Claire, Anne-Sophie et Jean-Michel,

Catherine et Cyrille, Laurence, Lili et Henri, Pascale, Nicole, Jacques, Fab et Greg et tous ceux qui m'ont accompagné.

Mes enfants, Charles et Olympe : vous êtes mon moteur, j'espère que vous serez un jour aussi fier de moi que je le suis de vous.

Votre mère Anna.

À mes proches et amis, Anne-Catherine et JR, Pierre et Maria, David et Laëtitia, Hugues et Sabrina, Alexis et Delphine, Soraya, Matthieu et Peline, Louis et Juliette, Val et Anne-Cécile, Vivi et Amber, Thomas et Erika, Antonin et Meriem, et tous les autres que je ne peux citer ici !

À tous ceux et toutes celles que possiblement j'ai oublié et qui, je l'espère, me pardonneront !

Résumé

Introduction au résumé

Le présent document constitue un mémoire de doctorat selon la procédure de la validation des acquis d'expérience ou V.A.E, il est donc organisé sur un format spécifique :

1. La première partie propose un retour réflexif autour de la construction de mon parcours professionnel et personnel, articulé autour de mon engagement porté à la question pédagogique.

Après un positionnement de mon action dans le contexte des expériences existantes dans d'autres établissements, je décris mon parti dans l'enseignement et la recherche et l'illustre au travers d'une sélection d'initiatives d'études et de pédagogie. En partant de cette mise en contexte, cette partie rend compte de la cohérence de mes activités passées et à venir, en lien avec la présente démarche de doctorat par V.A.E.

2. La seconde partie propose une synthèse des recherches scientifiques et des deux principaux axes choisis de mes travaux de recherches : la **conception et la vérification des gridshells élastiques** d'une part, et, d'autre part, la **conception et la vérification des coques tressées en fibres naturelles** tel que l'osier. Ces deux typologies se rejoignent sur leur mise en œuvre, qui profite de la souplesse de la géométrie et/ou du matériau pour faciliter la mise en forme, géométrie qui est ensuite raidie pour préparer la phase de service (usage de la construction).

Le résumé ci-dessous donne donc une vision globale de ces deux axes de recherches au travers du prisme de leur points communs.

Résumé des travaux scientifiques de la thèse

Un gridshell élastique est une typologie constructive de couvertures efficace : une grille en treillis souple est construite à plat avant d'être mise en forme par flambement. Ensuite, la structure est rigidifiée. La conception et l'analyse structurale d'un gridshell élastique impliquent une étape de recherche de forme qui peut être faite avec un modèle physique ou avec un modèle numérique calculé avec une méthode valable pour les grandes déformations. Il est alors légitime de se demander dans quelle mesure les résultats de ces modèles traduisent le comportement réel de l'ouvrage ?

Un algorithme de relaxation dynamique a ainsi été réalisé et appliqué à un modèle numérique d'un gridshell. En parallèle, des modèles physiques ont été construits à différentes échelles et testés en les chargeant. Les résultats ont été comparés et divers facteurs pouvant influencer les

résultats ont été identifiés. Grâce à de nouvelles expériences numériques et physiques, l'influence de ces facteurs a été quantifiée et des conclusions utiles aux concepteurs pour interpréter leurs résultats respectifs ont pu en être tirées.

* * *

L'utilisation de fibres naturelles – comme l'osier – pour fabriquer des objets est vertueuse car elle nécessite des intrants limités et ses émissions de CO2 sont minimales. Dans le domaine de l'architecture et de la construction, on utilise parfois des tressages de ces fibres pour des abris vernaculaires ou dans certaines parties d'édifices architecturaux contemporains, mais ils sont généralement limités à des éléments de remplissage non structuraux. La question est la suivante : est-il possible de concevoir et de construire des coques structurelles tressées en osier à des fins architecturales ? Dans ces domaines également, les concepteurs doivent prédire le comportement des constructions à échelle réelle sur des modèles physiques ou sur des modèles numériques calculés en grandes déformations.

Grâce à des mesures expérimentales, l'efficacité de la densité et de l'orientation des brins de divers tressages sur une surface continue en fonction des champs de contraintes principales qu'elle subit a été caractérisée. Ces données ont nourri un algorithme rendant la conception et l'optimisation des coques tressées accessibles pour les architectes et les designers. La validité de l'algorithme a été démontrée en comparant ses prédictions avec des modèles physiques. Ensuite, la faisabilité de la construction d'éléments structuraux par tressage de fibres naturelles a été démontrée par la réalisation d'un pavillon public à échelle réelle.

Mots-clés : *gridshell élastique, bois, fibres naturelles, coques, relaxation dynamique, recherche de forme, osier, tressage, modélisation numérique, modèles réduits, optimisation.*

Résumé en anglais

Introduction to the abstract

This document constitutes a doctoral thesis according to the procedure of “validation of acquired experience” or V.A.E, it is therefore organized on a specific format:

1. The first part proposes a reflective report of the construction of my professional and personal career, articulated around my commitment to the educational question.
After positioning my action in the context of existing experiences in other establishments, I describe my position in teaching and research and illustrate it with a selection of study and pedagogical initiatives. In this context, this part reports on the consistency of my past and future activities, in connection with this V.A.E. doctorate.
2. The second part offers a synthesis of scientific research of the two main axes chosen for my research work: the **design and verification of elastic gridshells** on the one hand, and, on the other hand, the **design and verification of woven shells in natural fibres** such as wicker. These two typologies have similarities in their construction method in the frame of an architectural realization, which takes advantage of the flexibility of the geometry and/or the material to facilitate shaping, then which is stiffened to prepare it for the service phase (use of the construction).

The summary below therefore gives an overview of these two lines of research through the prism of their common points.

Abstract of the scientific research of the thesis

An elastic gridshell is an efficient covering constructive typology: a flat elastic grid is built before buckling the structure into shape, in active and post-formed bending. Then, the structure is stiffened. The design and structural analysis of an elastic gridshell involve a stage of form-finding that can be done with a physical model or with a numerical model calculated with a method that is valid for large deflections. The question is: are the predictions of these models valid when extrapolated to the real-scale project?

A dynamic relaxation algorithm has thus been done and applied to a numerical model of a gridshell. In parallel, physical models has been construct and tested by loading at different scales. Results have been compared and various factors that can influence the results have been identified. With new numerical and physical experiences, the influence of these factors has been quantified and useful conclusions to the designers are provided for the interpretation of their respective results.

* * *

The use of natural fibres – such as wicker – to make objects is virtuous because it requires limited inputs, and its CO2 emissions are minimal. In the field of architecture and construction, braiding of these fibres are sometimes used for vernacular shelters or in some part of contemporary architectural buildings, but they are generally limited to non-structural filling elements. So the question is: is it feasible to design and build structural wicker braided shells for architectural purpose? In this field too, designers must predict real-scale constructions behavior on physical models or on numerical model calculated in large deflections.

Thanks to experimental measurements, efficiency of various stems' densities and orientations of a braided continuous surface according to the fields of principal stresses has been characterized. These data have supplied an algorithm making design and optimization of braided shells accessible for architects and designers. The validity of the algorithm has been demonstrated by comparing its predictions with physical models. Then, the feasibility to build structural elements by braiding natural fibers has been demonstrated by the realization of a full-scale public pavilion.

Keywords: *elastic gridshell, timber, natural fibres, shells, dynamic relaxation, form finding, wicker, braiding, numerical modelling, physical modelling, optimization.*

Table des matières

Remerciements	4
Résumé	8
Résumé en anglais	10
Table des matières	12
Liste des tableaux	15
Liste des figures	17
Liste des annexes.....	28
Introduction	29
Première partie : Description de la construction du parcours professionnel et personnel : un engagement porté à la question pédagogique.....	32
1. Construction de l'expérience.....	34
1.1. Parcours d'études	34
1.2. Praticien et enseignant confronté à l'expérimentation	36
2. Analyse des acquis de l'expérience.....	43
2.1. Réflexions sur la pédagogie	43
2.2. Expérimentation et échelle 1 : quelques exemples dans l'état de l'art.....	44
2.2.1. THINKSHELL ou Construire le courbe, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France	44
2.2.2. <i>Intelligent Fabrication</i> , ENSA Paris-Versailles, Paris, France.....	45
2.2.3. Block Research Group, ETH Zurich, Suisse.....	47
2.2.4. ILEK, l'institut de recherche sur les structures légères, Université de Stuttgart, Allemagne	48
2.2.5. Autres pavillons réalisés dans un cursus pédagogique.....	49
2.3. Expérimentation et échelle 1 : Sculpture Tectonique / Expérimenter à l'échelle 1	51
Deuxième partie : Synthèse des recherches scientifiques et techniques.	62
3. Introduction	63
4. Évolutivité du souple au raide dans le mode constructif : concevoir, modéliser et étudier les gridshells élastiques	74
4.1. Introduction sur la nécessité d'une vulgarisation du procédé conceptuel de la flexion active appliqué au cas des gridshells élastiques	74
4.1.1. Problématique.....	74
4.1.2. Méthodologie et plan.....	75

4.2.	État de l'art : les premiers gridshells modernes	76
4.3.	Étude de la flexion.....	80
4.4.	La recherche de forme ou form-finding	83
4.4.1.	L'approche par la maquette.....	84
4.4.2.	La méthode numérique : discrétisation de la surface en un réseau de Tchebychev 88	
4.4.3.	La relaxation dynamique	91
4.5.	L'algorithme ELASTICA	97
4.6.	Projet Élastica : application à un pavillon échelle 1.....	99
4.6.1.	Site et conception architecturale	99
4.6.2.	Choix du matériau	102
4.6.3.	Vérifications du non-flambement du gridshell et mise au point des détails ..	104
4.6.4.	Autres vérifications structurelles.....	109
4.7.	Validité des résultats issus de l'étude de modèles numériques et de modèles physiques 112	
4.7.1.	Présentation de l'objet d'étude	113
4.7.2.	Problématique et méthodologie.....	114
4.7.3.	Phase de consolidation	115
4.7.4.	Phase de recalibrage	119
4.7.5.	Méthodologie d'analyse de la contribution de la raideur rotationnelle des nœuds 121	
4.7.6.	Méthodologie d'analyse de la contribution de la raideur en plan des membrures 124	
4.7.7.	Résultats comparés des essais sur modèles physiques et numériques	125
4.7.8.	Conclusions et applications	127
4.8.	Conclusion sur le premier axe de recherche.....	129
5.	Projet Baya : évolution du souple au raide dans la matérialité des coques structurelles réalisées grâce au tressage de fibres végétales	131
5.1.	Problématique : est-il possible de réaliser des coques structurelles tressées à l'échelle architecturale et, si oui, comment les concevoir et les optimiser ?	131
5.2.	Méthodologie	132
5.3.	Les nids : de la structure réciproque au tressage	133
5.4.	Les tressages : un aperçu de l'état de l'art de la vannerie et de ses applications à l'architecture.....	136

5.5.	Le choix du matériau de l'étude	141
5.6.	Conception de l'algorithme BAYA.....	145
5.6.1.	Problématique et méthodologie.....	145
5.6.2.	Les lois de tressage optimal	146
5.6.3.	L'algorithme BAYA de tressage optimal des coques architectoniques	150
5.7.	Vérifications expérimentales.....	153
5.7.1.	Les lois de tressage optimal par une étude sur des éprouvettes physiques	153
5.7.2.	Les contraintes principales	154
5.8.	Applications	156
5.8.1.	Le tisserin de Baya et sa nidification	156
5.8.2.	Étude du nid et comparaison aux résultats de l'algorithme BAYA	161
5.8.3.	Recherche de forme : la goutte d'eau et le bas lesté	164
5.8.4.	Projet Baya : application à un pavillon suspendu à l'échelle 1	166
5.9.	Conclusion sur le second axe de recherche	170
	Conclusion.....	172
	Bibliographie.....	185
	Annexes	189
	Annexe 1 – État de l'art de la conception des gridshells élastiques post-formés.....	190
	Annexe 2 – Élaboration des principes du tressage optimal des coques structurales.....	199
	Résumé	204
	Résumé en anglais	204

Liste des tableaux

Tableau 1 – « Une tour Montparnasse contemporaine », études dynamiques et étude des détachements tourbillonnaires de Van Karman [33].	35
Tableau 2 – Comportement du gridshell Kagome : comparaison entre résultats issus d'une modélisation numérique par relaxation dynamique et un essai de chargement sur un modèle physique à échelle 1/2 [32].	59
Tableau 3 – Paramètres de l'algorithme ELASTICA pour le projet Élastica.	97
Tableau 4 – Paramètres mécaniques et économiques des matériaux et évaluation multicritère.	103
Tableau 5 – Charges nodales limites de flambement pour les gridshells Elastica et de Mannheim.	105
Tableau 6 – Charges limites de flambement par l'algorithme ELASTICA et par la formule des coques cylindriques.	107
Tableau 7 – Calcul du coefficient de sécurité sur les charges limites.	107
Tableau 8 – Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux sur un gridshell élastique post-formé à simple lattage et sans contreventements.	116
Tableau 9 – Données du modèle à échelle 1/2 du gridshell Élastica (simple lattage, sans contreventement).	123
Tableau 10 – Comparaison et calibrage des essais sur modèles réduits à l'échelle 1/2 du gridshell Élastica.	124
Tableau 11 – Contribution de la raideur rotationnelle des nœuds et de la flexion en plan des membrures sur modèles numérique et physique échelle 1/10 ^{ème} .	125
Tableau 12 – Contribution de la raideur rotationnelle des nœuds sur modèles numérique et physique échelle 1/2.	125
Tableau 13 – Contribution de la raideur rotationnelle des nœuds sur modèles numérique et physique échelle 1.	126
Tableau 14 – Paramètres d'entrée et pas des essais.	148
Tableau 15 – Paramètres de sorties et vérifications.	148
Tableau 16 – Calcul du coefficient de sécurité sur les charges limites.	153
Tableau 17 – Étapes de construction du nid selon Crook [8] [Guidou H., Bento M., Camail A., Bauduret M., Boukili S., Salinas J. P. – CTA EE1].	159
Tableau 18 – Modes de ruptures pressentis pour la passerelle [croquis par Nicolas Prévost].	181

Tableau 19 – Les trois grandes familles de lattages des gridshells élastiques post-formés... 190	
Tableau 20 – État de l’art sur les diverses façons de réaliser le lattage des gridshells élastiques post-formés..... 191	
Tableau 21 – Quatre procédés pour abouter les lattes des gridshells élastiques post-formés.193	
Tableau 22 – État de l’art sur les diverses façons de réaliser les nœuds des gridshells élastiques post-formés..... 194	
Tableau 23 – État de l’art sur les diverses façons de réaliser les contreventements des gridshells élastiques. 196	

Liste des figures

Figure 1 – L’Ombrelle (2017) : un pavillon agréable mais un échec sur le fonctionnement structurel.....	40
Figure 2 – Élastica (2020) et Baya (2021) : les deux premiers pavillons du cours Explorer à l’échelle 1.	40
Figure 3 – Recherche sur de nouveaux connecteurs pour ossatures en bambous [13].	42
Figure 4 – FAB Shell et Chebydesic Pavilion [www.thinkshell.fr].	45
Figure 5 – Pavillon courbe au motif japonais Kagome réalisé par Intelligent Fabrication avec la technique des bandes de plâtre, une autre façon de construire souple avant de raidir pour la phase de service [crédits photos : Fluid Bodies Team].	46
Figure 6 – Deux pavillons funiculaires par le Block Research Group, au Domaine de Boisbuchet (en haut) et à biennale de Venise (Armadillo Vault, en bas) [crédits photos : CIRECA Domaine de Boisbuchet & Iwan Baan].....	47
Figure 7 – Glasbau (à gauche) et Rosenstein-Pavillon (photo par Daria Kovaleva) en béton allégé par l’ILEK (à droite).	48
Figure 8 – Gridshell Toledo (à gauche) et Toledo 2.0 (à droite) à Naples, Arch. A. Fiore, Arch. D. Lancia, Prof. Arch. S. Pone, Prof. Arch. S. Colabella, Arch. B. Parenti, consultants structure : Arch. B. D’Amico, Prof. Ing. F. Portioli.....	49
Figure 9 – Recherches sur les gridshells à l’ETSA Madera, Madrid, Espagne, Dr. Manuel Guaita Fernández, Almudena Majano, Antonio Lara-Bocanegra.....	49
Figure 10 – Accoya post-formed gridshell par les étudiants de la Melbourne School of Design en Australie.	50
Figure 11 – F ² Pavilion, San Antonio’s Travis Park , USA par 14 étudiants de l’UTSA College of Architecture.....	50
Figure 12 – La Vrilllette (Sculpture Tectonique 2018) sur le toit de la Cité de la Mode et du Design.....	51
Figure 13 – L’étuve (à gauche) et la cintreuse (au centre et à droite) imaginées pour la réalisation de La Vrilllette.....	52
Figure 14 – Transfert d’énergie pendant la relaxation dynamique d’un gridshell gridshell [Komisarova A. & Carresi L. – CTA EE1].	54
Figure 15 – Dôme de la rue Euler à Paris, Bouchaud architectes, VP&Green ingénieurs structure.....	54
Figure 16 – Extrait de l’algorithme ELASTICA.....	55

Figure 17 – Cinématique du flambement général du gridshell obtenue par ELASTICA lorsque la charge nodale dépasse la charge critique.	55
Figure 18 – Éprouvette de test du comportement mécanique des tressages contraints, maillage de la coque, efforts et contraintes principales dans les éléments finis, et tressage optimal par l’algorithme BAYA appliqué à une poutre.	56
Figure 19 – Dispositif expérimental physique.	57
Figure 20 – Sections du scanner RX, modèle 3D du nid reconstruit numériquement et comparaison avec les prédictions de l’algorithme BAYA.	57
Figure 21 – Isochromes et isoclines par photoélasticimétrie pour un chargement spécifique comparées aux contraintes prévues par l’algorithme Baya ; et résultats de l’algorithme sur le projet comparés avec les déplacements obtenus sur un modèle réduit à l’échelle ½...	58
Figure 22 – Application de l’étude à la réalisation d’une poutre et d’une coque suspendue tressées.	58
Figure 23 – Phasage de la construction et tressage préliminaire par l’algorithme BAYA de la passerelle en osier des Utopies Constructives [39] [3D par Nicolas Prévost, Photos par Inès Macia et Quentin Chef]	61
Figure 24 – Détail de construction du Panthéon de Rome par Viollet-le-Duc [48].	63
Figure 25 – Modes constructifs d’arcs et de voûtes dans l’antiquité au Proche-Orient par Van Beek [47]	64
Figure 26 – Hutte primitive selon Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc [49].	64
Figure 27 – Architecture de Lobembe des pygmées selon Philippart de Foy [35] (à gauche).	65
Figure 28 – Les différentes étapes de construction d’un mongulu selon Philippart de Foy [38].	65
Figure 29 – Les différents étapes de construction des Haru Oms, huttes du peuple Nama : structure (à gauche), couverture et assemblage (à droite).	66
Figure 30 – Huttes d’indiens du Xingu (en haut) et de tribus Zoulous (en bas). [Photos : maison-monde.com ; auroraphotos.com, Wikimedia]	66
Figure 31 – Définition typologique schématique du gridshell [Photos : Jean-Maurice Michaud / Sofia Colabella]	67
Figure 32 – Le plus simple des gridshells : une tige souple mise en flambement par deux forces latérales aux extrémités, illustration Anastasia Komisarova pour le CTA Explorer à l’échelle 1 – ens. Leyral M.	68
Figure 33 – Définition typologique schématique du gridshell élastique, illustration Wided Cherif pour le CTA Explorer à l’échelle 1 (CTA EE1 – ens. Leyral M).	69

Figure 34 – Hall de production à Vyksa, lithographie de 1900 environ (en haut à gauche) et documents de construction (à droite); (Archives de R. Graefe) / en bas à gauche : Vue sur les trois baies ouest du bâtiment, 2007 [G. Weiss].	77
Figure 35 – Dôme expérimental à Berkeley [d’après [24] et [40]].	78
Figure 36 – À gauche : gridshell d’essai à Essen, 1962, et sa maquette mettant en évidence le plan super-elliptique à droite [d’après [24] et [40]].	78
Figure 37 - Montage (à gauche) et couverture (à droite) du gridshell d’Essen [d’après [24] et [42]].	79
Figure 38 – La Multihalle de Mannheim, vues d’extérieur (à gauche) et d’intérieur (à droite) [Verein Multihalle Mannheim, D. Lukac].	79
Figure 39 – Flambement de la tige souple (en haut) et tracé de la courbe élastica à différents moments (en bas), illustration Komisarova A. pour le CTA EE1.	81
Figure 40 – Le problème initial de l’élastica rectangle posé par Bernoulli	82
Figure 41 – Analogie avec la canne à pêche [illustration Henry Alken (1817-1818)]	82
Figure 42 – De haut en bas : extraits du film de l’expérimentation ; déformation et moment fléchissant de la tige souple par traitement de la reconnaissance d’image ; forme post-flambement obtenue par l’expérience et par l’algorithme numérique de relaxation dynamique ELASTICA, convergence de la mesure de déformée de la tige avec la courbe élastica.	83
Figure 43 – Modèle suspendu et modèle en flexion du gridshell d’essai à Essen (en haut) ; et maquette en filet suspendu de la Multihalle du Mannheim (en bas à gauche) et zoom sur les nœuds (en bas à droite) [d’après [24] and [42]].	85
Figure 44 – Schéma du problème étudié par Douthe, évolution de l’angle d’attaque α avec le rapport $\rho L^3/EI$ et évolution de la distance à la chaînette [15].	85
Figure 45 – Essais de chargement par ajout de clous sur les nœuds du modèle du gridshell d’Essen (a); modèle de la multihalle de Mannheim en PMMA (b) et essais de chargement avec des poubelles remplies d’eau (c) [24].	86
Figure 46 – Expériences sur la variabilité d’échelle : en haut sur la section et la raideur du matériau, en bas sur la longueur de l’élément, avec la superposition des tests réalisés [Mleczkowska M. A., Komisarova A., Carresi L. – CTA EE1]	88
Figure 47 – Discrétisation d’un tissu et patron de Tchebychev d’habillage d’une demi-sphère (en haut) ; tracés de réseaux de Tchebychev : principe (en bas à gauche), par maquette (au centre à droite) et par relaxation dynamique (en bas à droite) [Boisse, P. et Bouhaya, L.].	89

Figure 48 – Méthode du compas et application par l’algorithme ELASTICA, illustration Lallemand L. – CTA EE1.	90
Figure 49 – Partie de l’algorithme ELASTICA traçant un réseau de Tchebychev sur une surface architecturale quelconque.....	90
Figure 50 – Principe général de la relaxation dynamique appliqué à un exemple du form-finding de toile tendue, illustration Baert J.-P. pour [29]	91
Figure 51 – Gridshell d’essai de Rombouts [43], de gauche à droite : maillage de la forme initiale, forme calculée après relaxation dynamique et projet construit.....	92
Figure 53 – Equilibre d’un nœud par les forces de rappel de la loi de Hooke sur l’exemple d’un câble chargé ponctuellement.	93
Figure 52 – Forces de rappel dues à la loi de Hooke et forces dues à la flexion dans le cas d’un gridshell, illustration Cherif W. – CTA EE1.....	93
Figure 54 – Extrait de l’algorithme ELASTICA effectuant le calcul du déplacement des nœuds à chaque itération.	94
Figure 55 – Transfert d’énergie pendant la relaxation dynamique d’un gridshell [Komisarova A. & Carresi L. – CTA EE1].	95
Figure 56 – Principe de l’amortissement, exemples d’une bille dans une vallée et de la hauteur maximale de montagnes russes, respectivement sans et avec amortissement.	95
Figure 57 – Énergie cinétique d’une relaxation dynamique avec amortissement visqueux [Cherif W. – CTA EE1].	95
Figure 58 – Énergie cinétique d’une relaxation dynamique avec amortissement cinétique [Cherif W. – CTA EE1].	96
Figure 59 – Contrôle de la convergence et dissipation d’énergie par amortissement cinétique dans l’algorithme ELASTICA.	96
Figure 60 – Chronologie des étapes de recherche de forme et de contrôle de la stabilité par relaxation dynamique par Rombouts [43] et principe général de l’algorithme de relaxation dynamique des gridshells ELASTICA [Zitouni M. – CTA EE1].	97
Figure 61 – Algorithme ELASTICA de conception et de calcul des gridshells élastiques	98
Figure 62 – Le parc à l’échelle de la ville et du quartier [Louison G. – CTA EE1].	99
Figure 63 – Stratégie d’implantation et plan masse du pavillon Élastica [Louison G. et Maldonado B. – CTA EE1].	99
Figure 64 – Maquettes d’études du pavillon Élastica en bandes de rhodoïd et en PVC [étudiants en Master, CTA EE1].	100
Figure 65 – Dimensions en 3D du projet Élastica [Leyral M.].	100

Figure 66 – Rendu en trois dimensions du projet Élastica, vue de l’intérieur [Zitouni M. – CTA EE1].....	100
Figure 67 – Photographies du projet Élastica [crédits Salem Mostefaoui DR].	101
Figure 68 – Photographie vue d’intérieur du projet Élastica [crédits Salem Mostefaoui DR].	101
Figure 69 – Diagramme contrainte-déformation type du matériau bois [Cherif W. – CTA EE1].	102
Figure 70 – Rapport des critères M1 et M4	103
Figure 71 – Cinématique du flambement général du gridshell Élastica lorsque la charge nodale dépasse la charge critique.....	105
Figure 72 – Principe d’augmentation de l’inertie par solidarisation des lattes avec des blocs de cisaillement (en gris), illustration Komisarova A. – CTA EE1.	106
Figure 73 – Synthèse des charges du projet et des charges critiques de flambement selon les différentes conceptions possibles et détails du gridshell Élastica conçu par un double lattage avec contreventements et blocs de cisaillement [tracé des détails par Morosoff T. – CTA EE1].....	109
Figure 74 – Déplacements du gridshell sous l’action de son poids propre et de 7 personnes de 100 kg suspendues en 7 nœuds de la zone critique.	109
Figure 75 – Cartographie des contraintes dans le bois sous combinaison ELU.	110
Figure 76 – Cartographie des contraintes dans le bois sous combinaison ELU.	111
Figure 77 – Plans de fabrication et de montage issus de l’algorithme ELASTICA [Zitouni M. – CTA EE1].....	111
Figure 78 – Essai de chargement d’une maquette à l’échelle ½ d’un gridshell élastique [ENSA- PLV – CTA EE1].	112
Figure 79 – Élévation et plan masse des gridshells [étudiants de Master 1 de l’ENSA-PLV – CTA EE1 2021-2022].	113
Figure 80 – Gridshells Élastica et Kagome [crédits : Olivier Namias].	114
Figure 81 – Méthodologie développée pour la conception et la vérification de l’intégrité du gridshell Kagome.	115
Figure 82 – Test de charge par ajout de clous sur les nœuds du modèle du gridshell d’Essen ; modèle en PMMA et essais de chargement avec des poubelles remplies d’eau [24]. ...	116
Figure 83 – Cinématique de flambement prévue par ELASTICA (a) et sur une maquette du projet Elastica à l’échelle 1/10 ^{ème} (b) respectivement à 35%, 80%, 90% et 99% de la charge critique de flambement.	117

Figure 84 – La flexion dans le plan des membrures n’est rendue possible que si les nœuds sont (semi-)rigides.	117
Figure 85 – Essai de chargement sur maquette 1/10 ^{ème} du projet Elastica (simple lattage avec contreventements).	119
Figure 86 – Effet de la symétrie du gridshell: l’ajout des seules parties en rouge a permis d’augmenter la charge critique de flambement d’Elastica de 86% selon la simulation numérique, une modification similaire sur Kagome a conduit à une augmentation de 56% selon un essai de chargement sur maquette 1/10 ^{ème}	121
Figure 87 – Force de rappel due aux frottements et s’opposant à la rotation relative des membrures.	121
Figure 88 – Force dues à la flexion.	122
Figure 89 – Gridshell en voûte (a) , gridshell en état critique (b) , gridshell effondré (c)	123
Figure 90 – Définition des plans en vue du calcul de la flexion biaxiale [Chef Q.]	124
Figure 91 – Lors de nos simulations, une concentration de contrainte (95 – 105 MPa) est observée dans la zone de courbure maximale (a) . À 65 kg, la valeur de la contrainte est supérieure à la limite de rupture du bois et la ruine de la maquette a lieu avant l’instabilité montrée par la simulation numérique (b)	126
Figure 92 – Première proposition pour un coefficient de sécurité à appliquer sur les résultats d’essais d’un modèle non contreventé prenant en compte la non-linéarité du frottement et de la raideur des nœuds avec l’échelle.	127
Figure 93 – Essais de chargement des modèle réduits à échelle 1/10 ^{ème} et 1/2 et photographie du gridshell Kagome [crédits photo : David Cousin-Marsy]	128
Figure 94 – Nid de tisserin de Baya [crédits : Kalyan Varma].	132
Figure 95 – Nid d’oiseau et projet Uchronia d’Arne Quinze.	133
Figure 96 – Exemples de structures réciproques : maquette par Charlotte Gambotti, pont militaire de Léonard de Vinci, pont arc-en-ciel à Kaifeng, musée de Stonemason (Yasufumi Kijima arch., Yoishi Kan ing.) [crédits : Kelkaku-Inc.], Hall d’exposition du théâtre du Bunraku Puppet à Seiwa (Kazuhiro Ishii arch.) [crédits : Kazuhiro Ishii]....	134
Figure 97 – Exemple anthropomorphique de structure réciproque par Olivier Prévost [40] : la ronde de personnes assises, le poids d’une personne est reporté sur celle qui la précède et ainsi de suite jusqu’à la dernière personne qui se tient sur la première. Chaque personne du cercle a besoin de la précédente pour être stable, si une seule faillit, c’est tout le cercle qui s’effondre [Merle M., Gao L., Camail A. et Salinas J.P. – CTA EE1].	134

Figure 98 – De gauche à droite : plancher Honnecourt, schémas de deux configurations spatiales par Léonard de Vinci in Codex Atlanticus, fol. 899v, schéma du sol Serlio et deux exemples de motifs réciproques de John Wellis.	134
Figure 99 – Plan et cotes des planchers et des poutres, diagrammes du moment fléchissant et de l’effort tranchant dans les poutres principales du plancher classique et Honnecourt, et dimensions des éléments calculées [Merle M. – CTA EE1].	135
Figure 100 – Plan d’une nexorade, schéma statique d’une des poutres qui la composent, diagramme de l’effort tranchant [Merle M. – CTA EE1] et principe du comportement mécanique du bois, un matériau sensible aux sollicitations ponctuelles perpendiculaires aux fibres [29].....	136
Figure 101 – Outils du vannier : sécateur, poinçon, pinces [Dannenmüller M. – CTA EE1].	136
Figure 102 – Plessage de haie [photo : Vincent Jones].....	137
Figure 103 – Exemples de tressages dans la nature : républicains social (en haut à gauche et au centre) [Diego Delso, delso.photo, License CC-BY-SA et Bento M. et Guidou H. – CTA EE1], cassiques (en haut à droite) [Tanguy Deville] et fourmis tisserandes (en bas) [Frawsy Eklablog & Bernard Dupont].	137
Figure 104 – Huttes du village Chenchu (peuple Dorzé) en construction (en haut à gauche) ([Kevin Smith], et huttes du lac Turkana (en haut à droite et en bas) [Eric Lafforgue, Bjorn Svensson, Alamy & Richardandmarthashaw.blogspot.com].	138
Figure 105 – Un Mudhif en Irak [photo : Hassan Janali, U.S. Army Corps of Engineers]. ..	138
Figure 106 – Projet éphémère Beaubourg construit par Nikolay Polissky dans le parc Nikola-Levinet, région de Kaluga (en haut) et tunnel en bambou par Wang Wen Chih (en bas) [Cave Urban].	139
Figure 107 – Projet « Weaver’s Nest » par Porky Hefer d’Animal Farm (matériaux et techniques de fabrication d’Afrique du Sud sur cadre en acier) et deux autres projets du même bureau d’études (en bas au centre et à droite) [Deezen & Animal Farm].	139
Figure 108 – Les magnifiques coques tressées en entrelacs de l’artiste Laura Ellen Bacon font écho à notre recherche par leur dimension architecturale et par l’absence – à notre connaissance – de sous-structure porteuse. Notre réflexion s’en éloigne toutefois par la quantité de chargement que doit reprendre un projet à l’intention d’usagers [photos : Laura Ellen Bacon].	140
Figure 109 – Résultats de l’analyse multicritères [Dannenmüller M. – CTA EE1].	142

Figure 110 – Champs d’osier de la Vannerie de Villaine-les-Rochers : au premier plan du Noir de Villaine, puis de la Grisette et du Viminalis Pêcher jaune à gauche ; Noir de Villaine et osier jaune à droite [Photos par Prévost N. lors de sa visite en vue de la construction d’une passerelle en osier avec l’algorithme BAYA pour les Utopies Constructives de Richelieu].	143
Figure 111 – De gauche à droite : osier brut sec [Wicker Paradise], osier blanc et osier buff.	143
Figure 112 – Fendage de l’osier [Dannenmüller M. – CTA EE1] et photo d’une éclisseuse [Ji-Elle].	144
Figure 113 – De gauche à droite et de haut en bas : vannerie crocane, en nappe, de boucles, torche, en nœuds et spiralée [Dannenmüller M. – CTA EE1].	145
Figure 114 – Schéma d’une éprouvette tressée soumise à un champ de contraintes donné [Cherif W. – CTA EE1].	146
Figure 115 – Barres fictives simulant les forces de frottements aux nœuds [Chef Q. – CTA EE1].	146
Figure 116 – schéma de principe de l’expérience numérique [Roblin E. – CTA EE1].	147
Figure 117 – Exemples de variations des différents paramètres définissant la géométrie du tressage de l’éprouvette [Chef Q. – CTA EE1].	148
Figure 118 – Résultats des essais exemples de graphiques des critères de vérification V1 , V2 , V3 , V4 en fonction de F_{σ1} ; au sein d’un même graphique, chaque courbe correspond à une valeur de F_{σ2} différente.	149
Figure 119 – Schéma de la poutre à tresser.	150
Figure 120 – Contraintes principales sur un élément fini [Cherif W. – CTA EE1].	150
Figure 121 – Diagramme fonctionnel de l’algorithme Baya [Albin Breugnot], données d’entrée (surface de la coque, points d’appui et chargement) dans l’exemple de la poutre isostatique et discrétisation de la surface en éléments finis triangulaires.	151
Figure 122 – Convergence de l’algorithme et efforts dans les éléments finis de la maille. ...	151
Figure 123 – Contraintes principales [Breugnot A., Leyral M. – CTA EE1].	151
Figure 124 – Tressage optimal obtenu sur l’exemple de la poutre isostatique [Breugnot A., Leyral M. – CTA EE1].	152
Figure 125 – Expérience en cours pour vérifier l’efficacité de la poutre tressée conçue avec l’algorithme BAYA.	152
Figure 126 – Dispositif expérimental [Dannenmüller M. – CTA EE1 et Séminaire PCPA].	153

Figure 127 – Champ électrique E et champ magnétique B d’une onde lumineuse et principe du polariseur [Huller C. – CTA EE1].	154
Figure 128 – Schéma d’un polariscope plan [https://cours.polymtl.ca/].	154
Figure 129 – Principe d’obtention des isoclines et des isostatiques [https://cours.polymtl.ca/].	155
Figure 130 – Isochromes pour un chargement spécifique (A), isoclines pour différents angles du polariseur (B), isoclines sur un schéma unique (C), isostatiques (D), comparaison avec les contraintes principales anticipée par l’algorithme BAYA (E) [Huller C., Bugnet J. – CTA EE1].	155
Figure 131 – Photogrammétrie de la coque comparée aux prédictions de l’algorithme BAYA [Royannais B., Chef Q., Leyral M. – CTA EE1].	156
Figure 132 – Tisserin de Baya tressant son nid [DURAIRAJ].	156
Figure 133 – Position du nid dans l’arbre et effet supposé par Davis [11] de son orientation au vent vis-à-vis du risque de chute des œufs [Cherif W. – CTA EE1].	157
Figure 134 – Effet supposé de l’orientation de l’entrée de nid sur la probabilité de chute des œufs sous vents violents [Guidou H., Cherif W. – CTA EE1].	157
Figure 135 – Architecture générale d’un nid de tisserin de Baya selon Quader [41] au stade du casque et au stade final, et schémas de principe des principales étapes de construction du nid [Guidou H., Bento M., Camail A. – CTA EE1].	158
Figure 136 – Nid de tisserin de Baya ayant servi à nos études expérimentales et essai de reproduction en maquette d’un nid de tisserin de Baya par Léger C. et Royannais B. – CTA EE1.	160
Figure 137 – Modélisation du nid par photogrammétrie [Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].	161
Figure 138 – Modélisation du nid par scanner surfacique laser [Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].	161
Figure 139 – Directions privilégiées et densité de tressage en surface du nid [Pauvarel L., Bardy V., Leyral M. – CTA EE1].	162
Figure 140 – Coupes du scanner RX et modèle 3D reconstruit comparés avec les prévisions de l’algorithme BAYA.	163
Figure 141 – Zones les plus sollicitées du nid, telles que prévues par l’algorithme BAYA [Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].	164
Figure 142 – Expérience du lintéaire de Bernoulli [mathcurve.com], équation paramétrique et solutions de l’élastica [Villate de Peufeilhoux A. – CTA EE1].	165

Figure 143 – Forme idéale issue d’une recherche de forme sur un nid de tisserin de Baya. .	165
Figure 144 – Recherches de formes sur un modèle de goutte d’eau et sur un modèle de bas lesté, les résultats sont comparés avec la déformation d’une maquette du projet Baya à l’échelle ½.....	166
Figure 145 – Plan masse, esquisses et coupes des nids de la colonie du projet Baya [Bauduret M., Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].	167
Figure 146 – Résultats de l’algorithme BAYA sur le projet, comparaison des déplacements calculés avec ceux mesurés sur une maquette échelle ½, et tressage optimal du projet [Breugnot A. – CTA EE1].	168
Figure 147 – Dimensions en mètres du projet BAYA reportées par Marius Bauduret, étudiant du CTA EE1, et photographie du nid pendant sa construction sur un ensemble de supports en carton alvéolé.	168
Figure 148 – Photographies du pavillon Baya [Par Quentin Chef (tressage en cours) et Olivier Leclerc (les autres).	169
Figure 149 – Études sur les gridshells entrelacées et algorithme ELASTICA modifié.	175
Figure 150 – Frise en ordre chronologique de la conception du projet et de la participation des différents acteurs [photo chantier : Inès Macia].	178
Figure 151 – Premiers croquis d’intention de la passerelle en osier du festival Utopies Constructives [Leyral M.].	179
Figure 152 – Intention de cinématique de réalisation d’une passerelle en osier sur maquette préliminaire [Leyral M.].	180
Figure 153 – Phasage de la construction et tressage préliminaire par l’algorithme BAYA de la passerelle en osier des Utopies Constructives [Breugnot A., Prevost N., Leyral M.].	181
Figure 154 – Essais de chargements sur modèle réduit à échelle 1/5 ^{ème} avant et après l’ajout d’anti-dévers.	182
Figure 155 – Chantier de la passerelle en osier des Utopies Constructives.	182
Figure 156 – Pavillon du Japon à l’Expo 2000 et zoom sur un nœud.	194
Figure 157 – Détail des nœuds de la Mutihalle de Mannheim [24].	194
Figure 158 – Détail des nœuds de la Weld and Download Gridshell (à gauche) et du Waitomo Glowworm Caves Visitor Centre (à droite).	195
Figure 159 – Verrière de la Chiddingstone orangery (à gauche)	195
Figure 160 – Cathédrale éphémère de Créteil et détail des nœuds. Sources : [45] et www.thinkshell.fr	195
Figure 161 – Gridshell à Lecce (Italie, 2010).	196

Figure 162 – Gridshell d’étudiants à Montpellier (à gauche, source Quaternion – M. Lambert, S. Hulin et M. Sudres), nœuds à plaque métallique avec fixation des contreventements de la verrière de la Chiddingstone orangery (à droite).....	196
Figure 163 – Gridshell à Pishwanton (R.U., 2002).....	197
Figure 164 – Prototype de gridshell contreventé par une membrane par E. Lafuente Hernández & C. Gengnagel.....	197
Figure 165 – Détail des blocs de cisaillement de la Multihalle de Mannheim [24]. Ceux-ci sont divisés en deux pièces de bois triangulaires pour faciliter leur insertion.....	197
Figure 166 – Détail de l’ancrage au sol de la Multihalle de Mannheim [24].	198
Figure 167 – Détail de principe de l’ancrage au sol du gridshell de Building Freeform 2016 à l’ENPC [www.thinkshell.fr].	198
Figure 168 – Modélisation du comportement mécanique des brins d’une éprouvette en comparaison avec des brins libres.....	199
Figure 169 – Flambement des brins dans un tressage.....	200
Figure 170 – Schéma exagéré de la déformée du tressage.....	200
Figure 171 – $\cos\alpha_1\cos\alpha_2$ en fonction de α_2 en abscisse et de 1 en ordonnées – couleurs du vert (0,97) au rouge (1,00).....	201
Figure 171 – $\cos\alpha_1\cos\alpha_2 * \sin\alpha_2 - \sin\alpha_1$ en fonction de α_2 en abscisse et de 1 en ordonnées – Couleurs du vert (-0,26) au rouge (0,00).....	202
Figure 170 – Organigramme et code python de fonctionnement des principes de tressage optimal de Baya.....	203

Liste des annexes

Annexe 1 – État de l’art de la conception des gridshells élastiques post-formés.....	190
Annexe 2 – Élaboration des principes du tressage optimal des coques structurales.....	199

Introduction

Le présent document constitue un mémoire de doctorat selon la procédure de la validation des acquis d'expérience ou V.A.E.

À ce titre, **le format de la rédaction diffère sensiblement de celui d'une thèse « classique » de doctorat.**

Afin d'illustrer ce propos, citons la note d'information « Le doctorat par validation des acquis de l'expérience (VAE) » élaborée dans cette optique par le CNAM :

Le doctorant rédige un mémoire qui s'organise autour de trois axes :

- *Un retour réflexif, basé sur une description de la construction du parcours professionnel et personnel du doctorant (analyse des activités, identification des aptitudes et des compétences en matière de recherche, axes de recherche, etc.) ;*
- *Une synthèse des travaux de recherche effectués, située au sein d'une conversation académique et par rapport à l'état des connaissances. L'objectif de ce dossier est de montrer la maîtrise du sujet de recherche, ainsi que la capacité à concevoir, à mettre en œuvre et à exploiter de façon autonome les résultats d'une recherche ;*
- *Le développement de perspectives de recherche possibles.*

C'est afin de répondre pertinemment au séquençage proposé que j'ai choisi de diviser le mémoire en deux grandes parties :

1. La partie 1 – *Description de la construction du parcours professionnel et personnel : un engagement porté à la question pédagogique*, reprend dans les grandes lignes le dossier de recevabilité, tout en s'efforçant de situer ce parcours à l'intérieur d'un « état de l'art pédagogique », une sélection choisie, et donc non exhaustive, d'initiatives similaires dans le cadre desquelles mon parcours s'inscrit. En partant de cette mise en contexte, cette partie rend compte de la cohérence de mes activités passées et venir, en lien avec la présente démarche de doctorat par V.A.E.

2. La partie 2 – *Synthèse des recherches scientifiques et techniques*, présente une synthèse de des deux principaux axes choisis de mes travaux de recherches effectués, contextualisée dans l'état des connaissances sur ces sujets. Elle s'applique aussi à démontrer le lien et les cohérences entre ces deux axes de recherches et se conclut par les perspectives à venir : poursuites des études et résultats attendus, et applications possibles.

Ainsi je développe dans l'introduction de la Partie 1 comment j'ai choisi de thématiser ces deux parties : la question de la pédagogie trame la narration de la première, tandis que la production scientifique est l'objet de la seconde. De ce fait, la rédaction du mémoire diffère de celui d'une thèse de doctorat « classique », car il a été pensé pour s'adapter opportunément au contexte d'une validation des acquis d'expérience, qui requiert donc une présentation singulière du parcours et des travaux effectués.

Première partie :

Description de la construction du parcours professionnel et personnel : un engagement porté à la question pédagogique.

Cette première partie invite le candidat-chercheur à décrire la construction de son parcours professionnel et personnel au travers de son évolution, de l'analyse des activités, de l'identification des aptitudes et des compétences en matière de recherche. Si l'objectif recherché est de dégager les principaux axes de recherche, il ne s'agit pas ici de les présenter dans le détail. Leur développement est l'objet de la seconde partie du dossier.

Comprendre, faire comprendre et accompagner la conception des typologies structurelles innovantes, performantes et écologiques : voici comment je pourrais résumer le plus succinctement le sujet des activités de recherches que je conduis et que j'entends poursuivre dans le futur.

Ce thème se situe au croisement de deux principaux domaines d'études : la conception de structures à base de matériaux dérivés du bois ou des plantes (par le terme de « fibres végétales » j'entends les matériaux naturels destinés à l'art de la vannerie : l'osier, le rotin, le jonc, le bambou, etc.), et le développement des techniques de calcul par relaxation dynamique.

Les études qui sont les miennes portent tout autant sur le développement de nouvelles méthodes de modélisation des structures que sur le partage des savoirs, nouveaux ou anciens, avec un public large.

J'avais ainsi le choix entre plusieurs axes de présentation de ce travail, chacun ayant une certaine pertinence. Je développe une grande partie de ces travaux de recherche dans un cadre pédagogique, aussi, il m'était donné à choisir si je devais les présenter en mettant l'accent sur la question pédagogique et sur les ateliers originaux qui ont été montés. Ou bien, puisqu'il s'agit d'une mémoire à vocation doctorale, s'il fallait plutôt mettre l'accent sur le côté scientifique en décrivant la relaxation dynamique appliquée aux structures souples, par exemple, comme le liant de la modélisation numérique des diverses problématiques, en expliquant en quoi la

confrontation des résultats de ces modèles avec ceux de tests sur maquettes apportaient une nouvelle réflexion sur ces méthodes. Ou encore en insistant sur l'aspect innovatif des lois de tressage pour les coques architecturales, également en partie développées à l'aide de la relaxation dynamique.

C'est pourquoi j'ai voulu organiser ce mémoire de V.A.E. en dissociant autant que possible ces deux aspects pourtant intrinsèquement liés : **la pédagogie et la recherche scientifique.**

Le premier aspect, la pédagogie, sera donc le thème principal de cette première partie consacrée à la construction de mon expérience et reliant mes diverses activités professionnelles et d'enseignement.

Le second aspect, la production scientifique, sera principalement au cœur de la seconde partie, destinée à faire une synthèse de mes recherches.

1. Construction de l'expérience

1.1. Parcours d'études

Dès mes années d'études, j'aspirais à devenir, dans le même temps, praticien et enseignant et à lier ces activités à l'étude de structures ou de matériaux innovants, à l'expérience et l'analyse des résultats.

J'ai donc bâti mon cursus d'études avec le double objectif suivant :

- Concevant l'architecture et la structure comme un ensemble indissociable, j'ai poursuivi un double diplôme d'ingénieur en génie civil à l'École des Ponts et Chaussées et d'ingénieur-architecte au Politecnico di Milano.
- La construction d'un futur parcours professionnel qui fasse le lien entre l'enseignement et la pratique.

La concision requise pour une telle présentation me conduit à sélectionner parmi les étapes structurantes de mon parcours celles qui constituent à proprement parler des moments charnières de mon expérience et qui permettront de mieux comprendre la logique et la motivation de la démarche que j'entreprends.

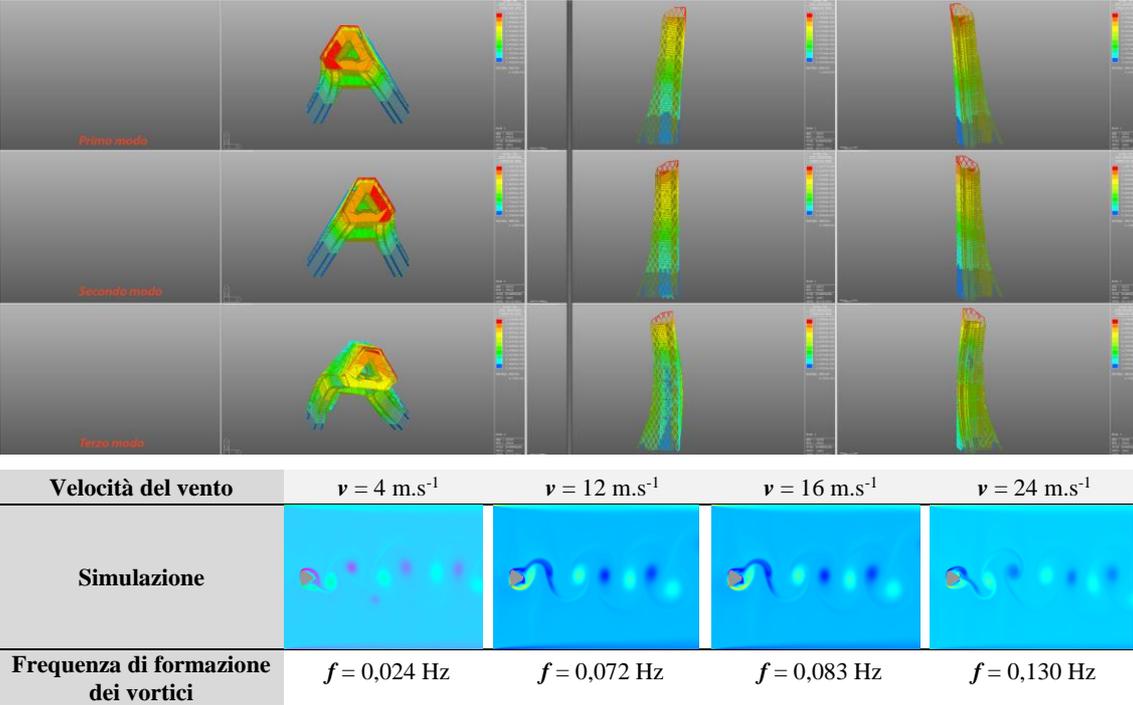
J'ai eu la chance de pouvoir être sensibilisé à la recherche à l'École des Ponts et Chaussées, entre autres lorsque nous avons conçu (et construit) en équipe, sous l'encadrement du professeur Alain Ehrlacher la soufflerie de l'école, qui a permis par la suite de mener diverses expériences dans les domaines des matériaux et des écoulements de fluides.

J'ai alors décidé de réaliser un stage scientifique à Madrid dans le laboratoire des sciences de la construction Eduardo Torroja. Je participais aux recherches sur la quantification de la migration des ions chlorures dans le béton en milieu marin. Ce fut un moment clef de mon parcours car la recherche s'y déroulait dans un cadre très propice à l'éveil de ma passion pour l'architecture et la structure : en effet, en plus d'être un laboratoire, l'édifice évoque un musée dédié à Eduardo Torroja, l'architecte ingénieur qui, par ailleurs, a construit cette œuvre sculpturale et architecturale.

Cependant, le moment décisif de ce parcours se situe à sa conclusion, lors de la réalisation avec deux camarades de notre *tesi di laurea* [33] – il s'agit d'un travail de fin d'études du grade master, contrairement à ce que le nom laisse accroire – qui imagine quelle pourrait être la

réponse au concours de la tour Montparnasse s'il avait été lancé en 2010. Pour y répondre, nous avons étudié un large panel de spécialités et de champs d'études et avons regroupé les résultats dans un ensemble cohérent au service d'un seul projet : urbanisme, architecture, détails constructifs, fluides, stabilité statique d'une tour à résille, stabilité dynamique, etc.

Tableau 1 – « Une tour Montparnasse contemporaine », études dynamiques et étude des détachements tourbillonnaires de Van Karman [33].



À ce moment de mes études, alors que j'obtenais le diplôme d'ingénieur civil et de celui d'architecte, le professeur Liberato Ferrara – qui avait encadré la partie d'études structurelles de la *tesi* – me proposa de rester en Italie et de poursuivre un doctorat portant sur l'étude de l'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) dans le béton. L'idée était de se servir, lors du coulage, de la matrice même du béton pour enfermer les PCM afin d'éviter l'étape ouvreuse de l'encapsulage des PCM. Une idée prometteuse mais dont les études – à cette époque des recherches – avaient mis en évidence une diminution significative de la contrainte limite d'élasticité en compression du béton.

Je dus à regret, pour des raisons personnelles, décliner ce sujet d'études passionnant qui alliait réflexions sur les questions structurelles, sur les matériaux et sur le développement durable. Cependant je formulais alors la promesse de poursuivre plus tard, sous une forme adaptée au contexte, des études que j'espérais d'un niveau doctoral.

1.2. Praticien et enseignant confronté à l'expérimentation

Une fois diplômé, j'ai entrepris de trouver un emploi qui me permettrait de jeter un pont entre mes deux passions pour la structure et l'architecture. J'ai alors découvert qu'il s'agissait d'une entreprise difficile tant ces deux métiers sont très segmentés, en particulier en France. Je décidai de rejoindre une agence (Valode & Pistre) et une école d'architecture (Val-de-Seine) afin d'obtenir l'habilitation à la maîtrise d'œuvre en son nom propre et, ainsi, me laisser un temps de réflexion sur le métier lui-même.

Comme chacun le sait, le métier d'architecte est un des plus anciens du monde. Sa première mention connue remonte au V^e siècle avant J.C. dans les écrits d'Hérodote, mais sa naissance remonte aux toutes premières constructions de l'humanité, bien avant même l'essor de la construction et de l'urbanisme de l'antiquité, comme la région de Sumer en Mésopotamie l'illustre brillamment. Elles avaient pour origine un besoin de protection (des humains, mais aussi des récoltes par exemple, face aux dangers, aux intempéries, etc.)

De cette époque jusqu'à aujourd'hui, ce métier d'architecte a été l'objet de nombreuses et profondes transformations. Si nous devons n'en retenir que deux, mon choix porterait sur :

- La polyvalence historique des architectes constructeurs qui disparaît progressivement après la Renaissance pour donner naissance à de nouveaux métiers spécialisés, dont la production est orchestrée et coordonnée par l'architecte, au profit du Projet d'Architecture. Celle-ci trouve naissance dans l'évolution exponentielle avec le temps des savoirs qui s'y rattachent. La quantité et la complexité de ceux-ci les a rendus quasi inaccessibles pour un seul homme ou une seule femme. Cela est par ailleurs également

vrai dans une multitude de métiers (médecins, chercheurs, agriculteurs, ...), et au sein même des spécialités : ainsi l'ingénieur en structures, peut se spécialiser dans les structures en bois, en béton, métalliques, en génie civil, en génie parasismique, en fondations, etc.

Cette mutation est absolument bénéfique dès lors que le projet reste abordé comme un tout, un objet unique et indissociable, ne subissant pas la même fragmentation que les métiers. Pour résumer cette pensée en un exemple, celui de la structure, je crois qu'il est sain de garder à l'esprit que la structure fait l'architecture, au même titre d'ailleurs que chacune des autres disciplines.

Comme chaque instrument d'un orchestre apporte sa voix indissociable du morceau qu'il joue : la partition d'un seul instrument n'existerait pas sans l'œuvre musicale mais, inversement, chaque instrument est essentiel à l'œuvre qui ne pourrait non plus exister sans lui.

- Les évolutions des sciences et, avec elles, des techniques qui ont bouleversé, parfois très vite, la façon de concevoir le bâtiment. Pour évoquer ces transformations, nous pourrions mettre l'accent sur l'usage grandissant de l'outil informatique qui prend, de fait, une place croissante au désavantage du dessin à la main et l'analyse des structures par statique graphique.

Plus que jamais auparavant, les problématiques sociales et environnementales nous confrontent à la double nécessité de renouer avec les pratiques vertueuses du passé – parfois oubliées quand la technologie l'a permis – et d'innover afin d'inventer celles du futur. Cela pourrait faire écho au Corbusier lorsqu'il insiste sur l'idée que, concernant la représentation du projet, « *il n'y a pas d'homme primitif, il y a des moyens primitifs. L'idée est constante, en puissance dès le début.* » [28] Un excellent exemple est celui de la climatisation : si elle a constitué un considérable bond en avant dans l'ambiance des habitats des régions à saisons chaudes, sa mise en œuvre systématique a conduit à des dérives dans la conception même du plan qui pèsent aujourd'hui significativement sur le bilan écologique global du secteur de la construction. Face à ce problème, il est essentiel de réfléchir de nouveau à la mise en œuvre de solutions plus anciennes et donc souvent simples et passives, parfois même les redécouvrir, et de les confronter à nos moyens d'analyse actuels, à nos avancées dans les sciences et techniques de la construction. Afin, sur ces bases, d'innover encore.

Ce furent principalement ces réflexions qui structurèrent le reste de mon parcours. J'ai d'abord collaboré à partir de 2012 dans un bureau d'études structures, VP&Green, en tant qu'ingénieur d'études, et en parallèle intégré une équipe d'enseignement en devenant chargé de TD du cours de structure de l'école d'architecture de Paris-la-Villette dirigé alors par Mario Poirier et Raphaël Arlot.

Cette expérience confirmait définitivement une passion pour la transmission des connaissances et, dans une certaine mesure, pour la recherche. Je devins ainsi en 2014 Maître de conférences associé en Sciences et Techniques pour l'Architecture puis, en 2020, Maître de conférences.

À cette occasion, je découvris que la pédagogie était un domaine de recherche à part entière. Reprenant avec mon collègue Sylvain Ebode la direction de l'enseignement de la structure à l'ENSA-PLV, je réalisai que celui-ci, dans une école d'architecture, nécessitait de s'interroger sur l'adéquation entre notre pédagogie et le public, dans toute sa variété, auquel on s'adresse. Ce dernier est, à l'ENSA de Paris-la-Villette, en effet très hétérogène : bicursus ingénieur-architecte, niveau baccalauréat – scientifique ou littéraire –, filières arts plastiques, reconversions professionnelles, etc.

Le principal enjeu se situe dans cette variété de profils : savoir transmettre les connaissances en impliquant et intéressant tout le monde et, surtout, en ne laissant personne sur le bord du chemin. **Le défi n'est donc pas tant technique que pédagogique.** Nous avons ainsi pu développer une véritable réflexion sur la pédagogie de cette matière.

Celle-ci a abouti à la mise place de plusieurs actions :

- Mettre l'accent sur l'histoire des sciences et sur l'explication qualitative qui a le même poids que le quantitatif.
- Remettre au goût du jour l'enseignement de la statique graphique qui rend un problème physique accessible par voie graphique et permet ainsi de mieux le comprendre.
- La rédaction et la publication d'un ouvrage pédagogique consacré à l'enseignement de la structure adapté à un public d'architectes, usant du discours et de la maïeutique comme mode narratif [29].
- Proposer des expérimentations pour observer les notions théoriques. Un de nos travaux dirigés consiste justement à demander aux étudiants d'étudier un thème structurel et de concevoir et réaliser un dispositif pédagogique (inspiré du principe de l'émission « *C'est pas sorcier* ») pour mieux le comprendre et l'expliquer. L'idée principale est en effet de motiver l'étudiant à trouver la meilleure façon de reformuler les savoirs qu'il

acquiert et d'apprendre ainsi à les transmettre aussi à ses camarades : **il n'est possible de transmettre aux autres que ce qu'on a soi-même bien assimilé.**

Ces intentions pédagogiques vont rapidement se structurer autour d'un collectif s'intéressant particulièrement à la question de la pédagogie des sciences et techniques pour l'architecture et la construction., baptisé *Construire l'Architecture* (www.construire-l-architecture.com), que nous avons fondé en 2014 avec Sylvain Ebode et qui est aujourd'hui en pleine structuration pour s'ouvrir sur la recherche et la publication scientifique, et sur l'organisation de conférences sur les thèmes de la construction.

Depuis 2014, j'ai également co-encadré plusieurs dizaines de mémoires de séminaire de master sur le thème des pratiques constructives au service du projet architectural, un enseignement qui se développe sur la base d'une initiation à la recherche scientifique autour des thèmes des méthodes constructives, d'édification et de la culture technique.

Cependant, c'est l'enseignement thématique de master « Sculpture Tectonique », construit autour de la réalisation à l'échelle 1 d'un pavillon, qui sera le plus déterminant dans la construction de mon parcours. Le cours, que nous avons repris après sa création par Mario Poitier et Raphaël Arlot et une première (et fructueuse) année, fut difficile à (re)monter. La première année où je le co-dirigeais fut même un échec : organiser un enseignement de qualité autour de la construction d'un pavillon architectural à l'échelle 1 par les étudiants requiert une implication particulièrement intense.

L'échec nous a conduit à une véritable remise en question et nous nous sommes investis pour restructurer le cours qui connut alors un grand essor : les pavillons (dont la liste exhaustive est publiée à ce lien : www.construire-l-architecture.com/echelle-1) étaient chaque année plus complexes, le site de construction s'ouvrit de la cours de l'école vers l'espace public (notamment le toit de la cité de la Mode et du Design et le parc de la Butte du Chapeau Rouge) et les typologies structurelles (qui n'étaient initialement pas imposées) commencèrent à quitter, parfois, le domaine de l'ossature poteaux-poutres pour aller explorer d'autres plus innovantes, telles les pavillons en bois courbé (La Vrillotte en 2018) ou encore les gridshells élastiques post-formés.

À propos de ces derniers, la première tentative, l'Ombrelle en 2017 fut un demi-échec : l'ouvrage ne fut pas assez rigide et une partie dut être soutenue par des poteaux non prévus à la conception. Nous revenons en détail sur cet évènement déclencheur de nos recherches dans la suite du document.



Figure 1 – L’Ombrelle (2017) : un pavillon agréable mais un échec sur le fonctionnement structurel.

Nous réalisâmes alors que le format du cours, basé sur une longue phase initiale de concours de projets entre les étudiants, ne permettait pas d’aller au fond des sujets et il fut donc décidé de le faire évoluer. Rebaptisé « Explorer à l’échelle1 », il s’organise aujourd’hui autour d’un unique projet portant sur l’étude d’une typologie structurelle innovante : il a abouti aux pavillons Élastica en 2020 (sur le thème des gridshells élastiques post-formés), Baya en 2021 (sur le thème des coques architecturales réalisées à l’aide de tressages structurels), et Kagome en 2022 (un gridshell élastique à membrures entrelacées).



Figure 2 – Élastica (2020) et Baya (2021) : les deux premiers pavillons du cours Explorer à l’échelle 1.

Ce cours se tourna alors résolument vers la recherche : il s'agit aujourd'hui d'aller sur des voies encore pas ou peu explorées (comme par exemple étudier la question de l'existence de lois de tressages optimales pour les coques), de réaliser nos propres outils de simulations et de calculs, souvent basés sur la méthode de relaxation dynamique (car elle permet l'étude de structures en grands déplacements, ce qui est souvent nécessaire quand on met en forme des structures souples), et de partager ce savoir sur notre site web, lors de symposiums (telle la conférence internationale sur les structures spatiales IASS 2021 à Surrey et 2022 à Pékin – avec l'APCS – où nous avons présenté trois publications), où dans des revues scientifiques comme le *Journal of Civil Engineering and Architecture* (USA) [32].

En parallèle de cette activité d'enseignement, je cherchai à développer en cohérence celle de praticien. Aussi, après quatre années de collaboration au sein du BET VP&Green, je rejoignis, en qualité de chef de projets, le BET Bollinger + Grohmann. L'associé et gérant, Klaas de Rycke, également Maître de conférences à Versailles, s'attache à y développer les projets et thématiques en lien avec l'enseignement et la recherche.

Ainsi, alors que j'encadrais à l'ENSA-PLV le mémoire d'un étudiant, Marouane Abachi, qui travaillait sur la conception à l'aide d'imprimantes 3D de nouveaux assemblages pour les ossatures en bambou, j'ai décidé d'approfondir le sujet sur une autre piste de conception – sans impression 3D – de ce type d'assemblages avec un autre étudiant, Clément Berthou qui poursuivit la recherche durant un stage au sein de Bollinger + Grohmann.

A l'aide des études de l'architecte Simón Vélez, et en collaboration avec le laboratoire de l'Université de Cergy, nous avons conçu et réalisé un assemblage en bambou ne comprenant aucun élément extérieur au chaume à l'aide d'une technique inspirée des goujons scellés pour les structures en bois. Des éprouvettes furent réalisées et nous avons mené des tests en laboratoire. Je crois que cette « excursion » de l'étudiant dans le monde de la R&D des entreprises et des laboratoires publics ou privés, toujours en lien avec son cursus universitaire, a permis une mise en application de ses savoirs très fructueuse pour lui, mais aussi pour moi, et que ce type de cadre mériterait à être encore davantage soutenu. Cette recherche a été publiée en janvier 2020 dans la revue *fabricA* [13] et s'est poursuivie après mon départ de Bollinger+Grohmann [14].

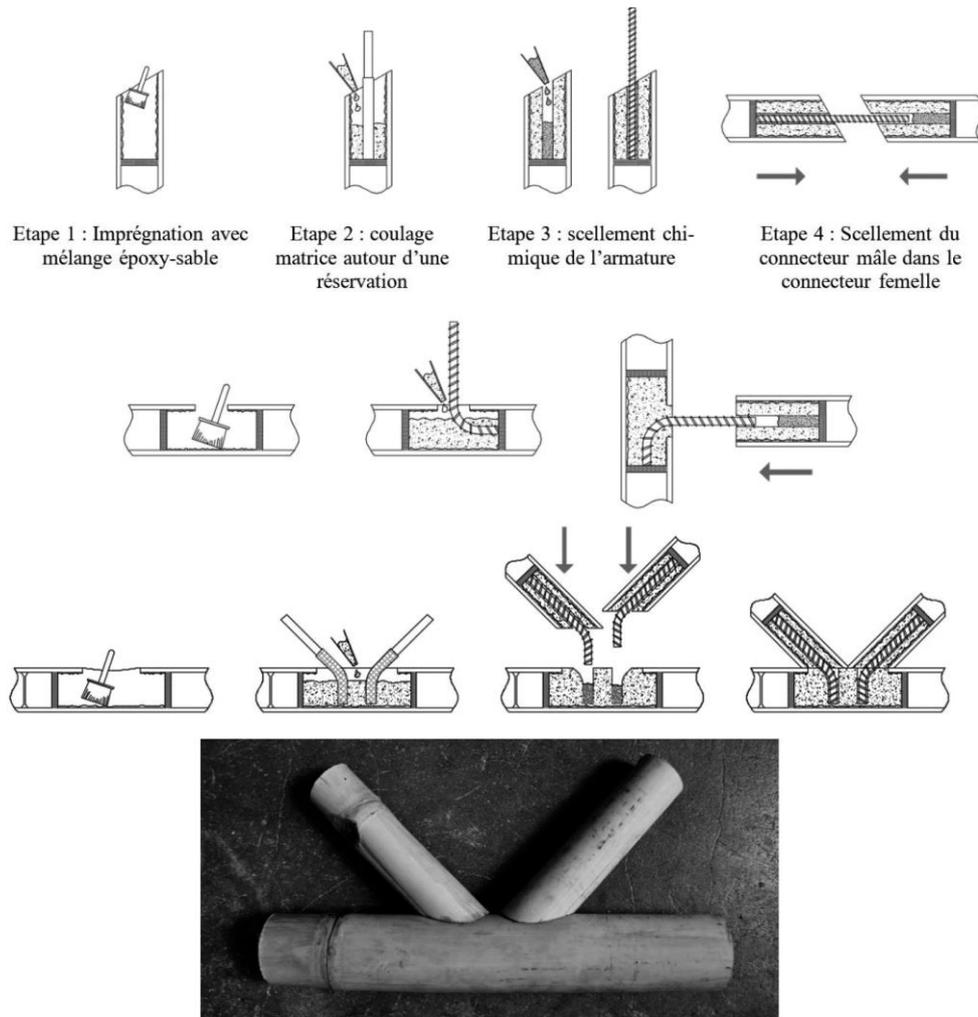
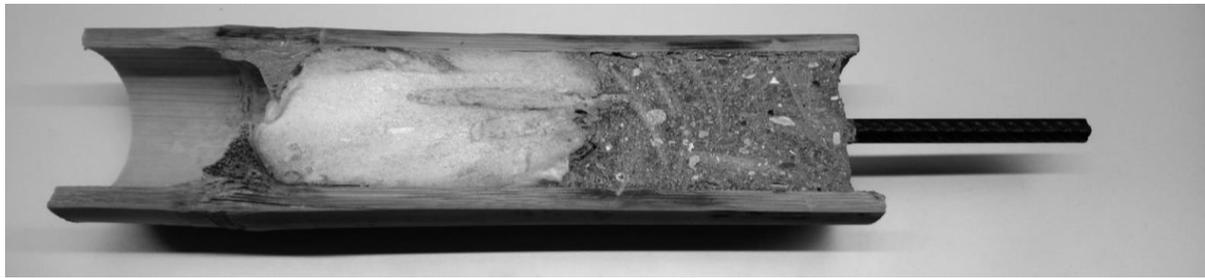


Figure 3 – Recherche sur de nouveaux connecteurs pour ossatures en bambous [13].

Je conclurai cette présentation de mon parcours en précisant que je collabore aujourd'hui avec le BET Structure EVP, au sein duquel j'occupe le poste de directeur d'équipes et de projets et où j'essaie de transposer les fruits de nos recherches à l'ENSA-PLV sur la statique graphique et la relaxation dynamique à des projets d'architecture professionnels, comme nous l'avons fait – par exemple – pour la Maroquinerie d'Hermès à Louviers (Lina Ghotmeh architecte), réalisée en arches funiculaires en briques et pour laquelle nous nous sommes interrogés sur la position « réelle » de la courbe des pressions dans l'arche maçonnée.

2. Analyse des acquis de l'expérience

2.1. Réflexions sur la pédagogie

Au détour d'une réunion de préparation de ma première rentrée scolaire en 2014, avec mes collègues Raphaël Arlot et Sylvain Ebode, nous avons réfléchi ensemble à la définition de notre mission. Enseigner une matière scientifique, et *a fortiori* celle de la structure, la statique et la résistance des matériaux, en école d'architecture est, comme nous l'avons vu, un défi bien plus pédagogique que technique.

Notre réflexion et notre travail doivent essentiellement se concentrer sur la recherche des bonnes méthodes et des bons médias pour la transmission du savoir à un public large et varié, sur des notions qui pour beaucoup apparaissent rebutantes et complexes.

C'est alors que j'entrepris la rédaction d'un livre pédagogique sur cette matière – dont j'ai déjà parlé – qui viendrait compléter efficacement le cours et ses polycopiés et présentations assez scolaires [29]. J'ai pour cela, et en m'inspirant de l'excellent ouvrage de Michel Provost et Philippe de Kemmeter, *Comment tout ça tient ? Voyage au pays des structures*, choisi la forme d'un dialogue empreint de maïeutique dans lequel le narrateur, sorte de guide bienveillant du monde des structures, met en évidence le fait que la compréhension de celles-ci est accessible et naturelle au lecteur ou à la lectrice – volontairement ingénu(e) dans le dialogue – qui, sur un principe déjà éprouvé, sait déjà mais ne sait pas encore qu'il ou elle sait.

J'ai également voulu construire cet ouvrage autour d'un fil rouge. Le personnage qui découvre le monde des structures a un souhait, celui d'appliquer les savoirs acquis à un projet personnel : une réflexion autour du thème des abris, thème assez large pour que tout un chacun puisse y trouver son compte.

Enfin, pour aider notre narrateur à guider le lecteur ou la lectrice de façon pédagogique dans ce grand voyage, j'ai pris la licence de le doter d'une machine extraordinaire capable de transporter nos deux protagonistes dans le temps et dans l'espace afin de leur faire visiter des bâtiments remarquables et découvrir les architectes et inventeurs qui ont permis leur édification.

Ce travail nécessita avant publication de revenir longtemps et régulièrement sur les explications qui paraissaient les moins claires au relecteur, de les refaçonner et les améliorer jusqu'à ce qu'elles deviennent limpides. Il fallait aussi revoir les exemples, jouer sur des schémas explicatifs

basés sur le corps humain afin de pouvoir les généraliser aux structures des bâtiments (analogies anthropomorphiques), produire des illustrations les plus pédagogiques possibles. Cela fut enrichissant à deux niveaux :

- Par la possibilité de repenser et d'améliorer des schémas pédagogiques pourtant déjà éprouvés.
- Par la réflexion qui s'ensuivit sur la façon de construire sur cet ensemble théorique de base un nouvel enseignement qui permettrait aux étudiants de master d'aller plus loin en le mettant à profit dans le cadre exigeant de la recherche sur des typologies innovantes.

C'est également lors de la rédaction de cet ouvrage que j'ai abordé pour la première fois la modélisation par relaxation dynamique, afin donner au lecteur une méthode numérique applicable pour la recherche de forme des structures en toiles tendues.

2.2. Expérimentation et échelle 1 : quelques exemples dans l'état de l'art

Je vais donc dorénavant mettre l'accent sur les enseignements liés à l'échelle 1 et aux typologies structurales « innovantes » puisque c'est dans ce cadre que je poursuis une large partie de mes activités de recherche.

Afin de pouvoir situer ce travail, et le confronter à d'autres réalisations, je vais procéder à un état de l'art de ce type d'enseignements dans le monde. Cet état de l'art n'est évidemment pas exhaustif – loin s'en faut ! – tant il y a d'écoles d'architectures et d'ingénierie des structures dans le monde qui participent à la réflexion et à la production.

Dans le respect de la concision de mon propos, j'ai préféré opérer une courte sélection d'enseignements ou de recherches appliquée en lien avec une université qui m'ont inspiré et ont structuré l'évolution de ma propre réflexion (qui sera décrite à la suite de cet état de l'art).

2.2.1. THINKSHELL ou Construire le courbe, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France

Construire le courbe, porté entre autres par Olivier Baverel et aujourd'hui dirigé par Cyril Douthe s'insère dans le cursus de génie civil de l'École des Ponts qui forme des ingénieurs. Diplômé de cette école, je n'ai toutefois pas participé à ce module qui vise à apprendre aux étudiants à concevoir et à réaliser des coques courbes et complexes. Doté d'un plateau technique performant (robots, découpe laser, fraisage numérique, etc.) et accompagné de leur partenaire industriel

Würth, les réalisations de ce module recoupent généralement les thèmes des structures réciproques (sujet de la thèse de doctorat d'Olivier Baverel) et des gridshells élastiques (sujet de la thèse de doctorat de Cyril Douthe).

Dans un cadre plus large, l'école des ponts a produit un corpus très riche de thèses sur les gridshells élastiques (Douthe [15], Bouhaya [5], Tayeb [45], etc.) qui ont été pour nous une grande source d'informations et nous ont beaucoup apporté pour le développement de nos propres outils. Cette profusion de publications a d'ailleurs été récemment saluée par un article de *mapping* des études scientifiques actuelles sur le thème des gridshells publié par Dyvik, Manum et Rønquist [19] : « *The authors with the most publications were Fan, F. (20), Baverel, O. (20), Liu, H. (18), Zhao, Z. (15) and Douthe, C. (14).* »



Figure 4 – FAB Shell et Chebydesic Pavilion [www.thinkshell.fr].

Notre enseignement diffère de THINKSHELL par, essentiellement, trois composantes :

- Il s'inscrit dans le cadre d'un cursus de formation d'architectes, et non d'ingénieurs (même s'il arrive que nous ayons des étudiants en bi-cursus).
- Il n'est pas construit sous la forme d'un intensif mais d'un cours hebdomadaire se déroulant sur deux semestres.
- Notre pavillon est construit sur le domaine public (un parc de la ville de Paris), il doit donc résister à des charges en lien avec cet usage, avec la marge de sécurité qu'il convient à l'usage public. Ce paramètre a un impact très significatif sur le projet.

2.2.2. *Intelligent Fabrication*, ENSA Paris-Versailles, Paris, France

Mené par Klaas de Rycke, cet enseignement de l'école d'architecture de Versailles conduit à une riche production par les étudiants sur un thème innovant et annualisé et s'inscrit dans un cycle de conférences où des experts mondiaux sont conviés à partager leur travail.

Plus proche de nos enseignements par le public, le budget et le thème qui change chaque année, la principale différence réside à nouveau dans le format intensif du cours.

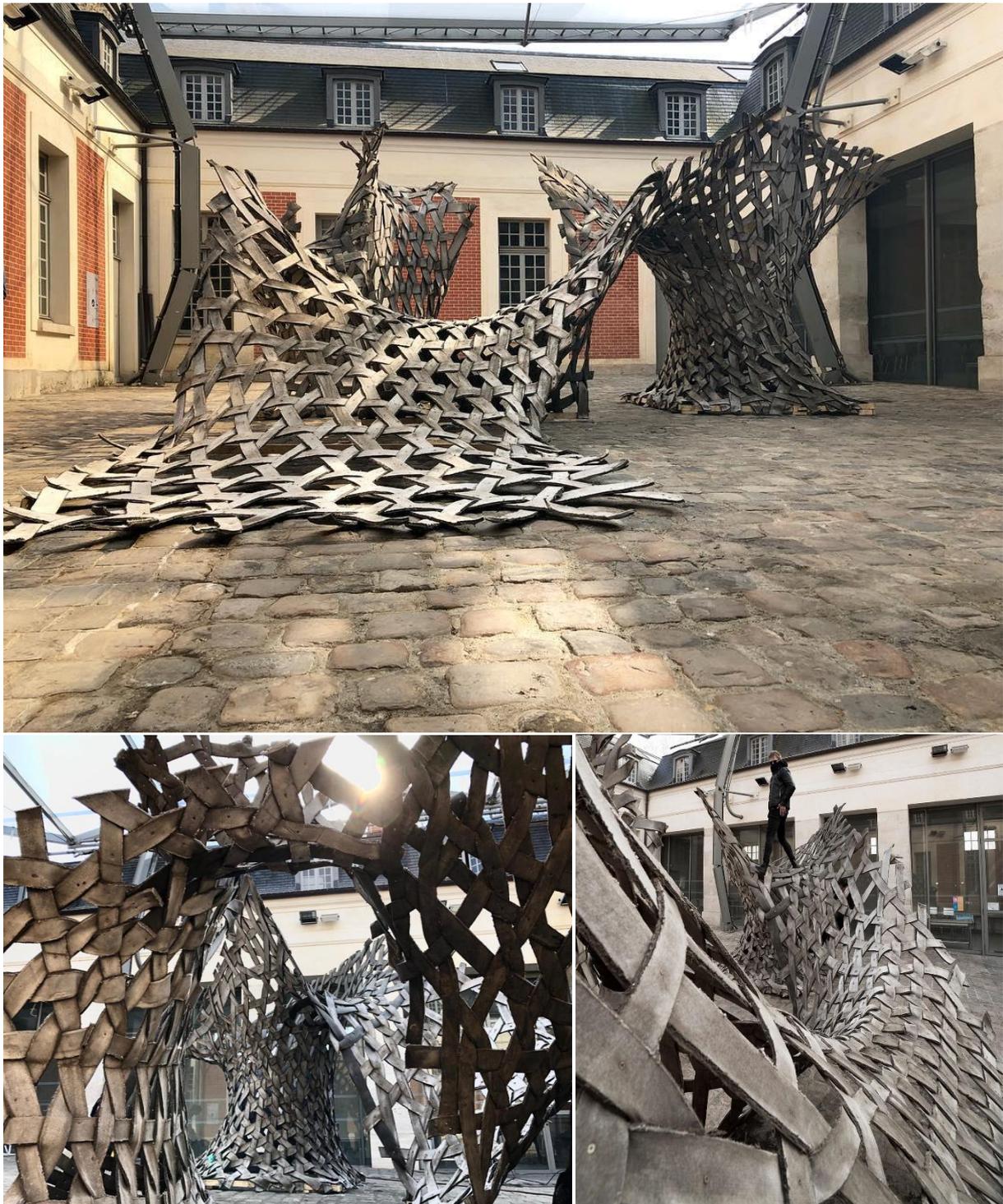


Figure 5 – Pavillon courbe au motif japonais Kagome réalisé par Intelligent Fabrication avec la technique des bandes de plâtre, une autre façon de construire souple avant de raidir pour la phase de service [crédits photos : Fluid Bodies Team].

2.2.3. Block Research Group, ETH Zurich, Suisse

Dirigé par Philippe Block, ce laboratoire universitaire est à l'origine d'une production scientifique riche et mondialement reconnue sur des typologies innovantes ou efficaces. Un des thèmes de prédilection du laboratoire est la recherche sur les voûtes funiculaires, avec notamment la redécouverte de la statique graphique en trois dimensions des voûtes pesantes, efficacement synthétisée dans le *plug-in* RhinoVAULT pour le logiciel de modélisation 3D Rhinocéros. Ce laboratoire œuvre à la production de solutions applicables dans l'industrie, il est donc doté d'un budget incomparable avec notre enseignement.



Figure 6 – Deux pavillons funiculaires par le Block Research Group, au Domaine de Boisbuchet (en haut) et à biennale de Venise (Armadillo Vault, en bas) [crédits photos : CIRECA Domaine de Boisbuchet & Iwan Baan]

2.2.4. ILEK, l'institut de recherche sur les structures légères, Université de Stuttgart, Allemagne

Fondé par Frei Otto, un des principaux concepteurs du gridshell élastique de Mannheim sur lequel nous reviendrons par la suite, puis dirigé par des grands noms de la recherche architecturale et structurelle (Fritz Leonhardt, Jörg Schlaich, Werner Sobek et, aujourd'hui, Lucio Blandini), ce laboratoire universitaire mène des recherches sur les structures légères. Rappelons que Frei Otto a eu une production riche sur de nombreuses typologies innovantes dont les toiles tendues et les membranes (kiosque à musique de l'Exposition Fédérale des Jardins à Kassel en Allemagne, stade Olympique de Munich, Sternwellenzelt Tanzbrunnen au Rheinpark de Cologne, etc.). Comme le précédent, ce laboratoire universitaire et amplement tourné vers les applications industrielles et est doté d'un budget en cohérence.



Figure 7 – Glasbau (à gauche) et Rosenstein-Pavillon (photo par Daria Kovaleva) en béton allégé par l'ILEK (à droite).

Une synergie entre notre groupe de travail et celui de l'ILEK verra le jour lors du festival Utopies Constructives organisé par le BETA à Richelieu en septembre 2023, où deux passerelles de 14 mètres seront présentées. La première sera réalisée par l'ILEK en béton allégé (avec seulement un mètre cube de béton) et la seconde est en cours de réalisation par des étudiants de l'ENSA-PLV (en partenariat avec plusieurs institutions et écoles d'art, de design, d'architecture et de d'ingénierie), sur la base d'un mode constructif proche d'ELASTICA et en utilisant l'algorithme BAYA pour le tressage optimal des coques structurelles et architecturales, notamment en osier. Ce travail est décrit plus loin dans le mémoire.

2.2.5. Autres pavillons réalisés dans un cursus pédagogique

Lors du développement de l'Ombrelle, nous avons pu avoir accès aux travaux théoriques et expérimentaux que Bernadino D'Amico, que nous avons contacté, avait bien voulu mettre gracieusement à notre disposition [7]. Bernadino D'Amico collabore également à la construction de gridshells dans le cadre universitaire, comme ci-dessous à Naples.

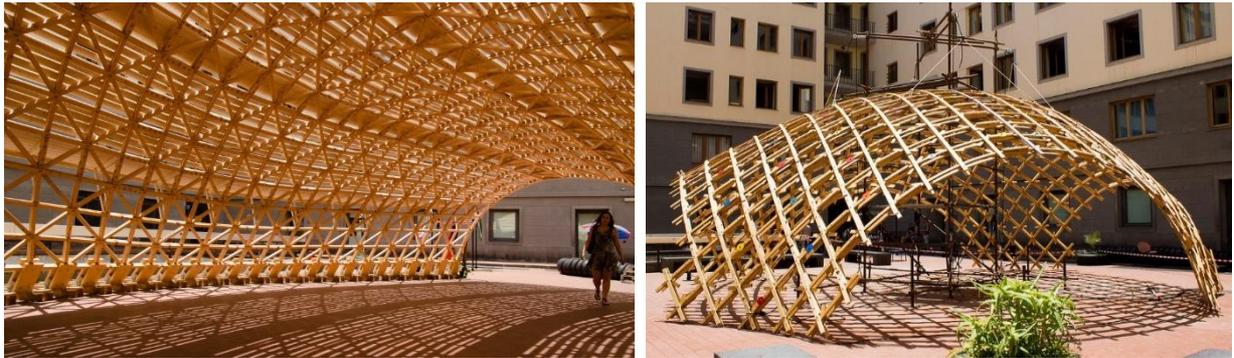


Figure 8 – Gridshell Toledo (à gauche) et Toledo 2.0 (à droite) à Naples, Arch. A. Fiore, Arch. D. Lancia, Prof. Arch. S. Pone, Prof. Arch. S. Colabella, Arch. B. Parenti, consultants structure : Arch. B. D'Amico, Prof. Ing. F. Portioli.

D'autres réalisations qui nous ont inspirées (liste non exhaustive) :



Figure 9 – Recherches sur les gridshells à l'ETSA Madera, Madrid, Espagne, Dr. Manuel Guaita Fernández, Almudena Majano, Antonio Lara-Bocanegra.



Figure 10 – Accoya post-formed gridshell par les étudiants de la Melbourne School of Design en Australie.



Figure 11 – F² Pavilion, San Antonio's Travis Park , USA par 14 étudiants de l'UTSA College of Architecture.

2.3. Expérimentation et échelle 1 : Sculpture Tectonique / Expérimenter à l'échelle 1

Le cours thématique de master « Sculpture Tectonique » a été créé et organisé avant mon arrivée à l'ENSA-PLV par Mario Poirier et Raphaël Arlot dans le but de confronter les étudiants à la réalité des métiers de la construction et d'appliquer les acquis de leur cursus à une construction à l'échelle 1.

Dans cet enseignement, les étudiants participent à un concours interne sur la conception d'un projet de pavillon bois pendant le premier semestre. Un de leurs projets est ensuite sélectionné et construit dans le cadre du second semestre. Initialement, ce contenu était condensé sur un seul semestre.

Comme je l'ai évoqué précédemment, la seconde année fut l'occasion d'une remise en question qui a abouti à une réorganisation très séquencée du cours et a permis ensuite la réalisation de très beaux pavillons. Cependant, beaucoup d'étudiants n'approchaient l'échelle 1 que par des projets architecturalement assez timides, généralement avec un mode constructif très classique (poteaux/poutres bois). Je trouvais dommage qu'alors que les étudiants bénéficiaient encore d'une pleine liberté conceptuelle, ils n'osaient pas s'aventurer hors des standards qu'ils avaient déjà vus et revus. Cette réflexion fut plus prégnante encore lorsque, certaines années, le projet lauréat osait explorer des typologies expérimentales et des techniques de mise en œuvre plus innovantes comme la construction en bois courbé (pavillon La Vrilette) ou les *gridshells* élastiques post-formés (pavillon l'Ombrelle).

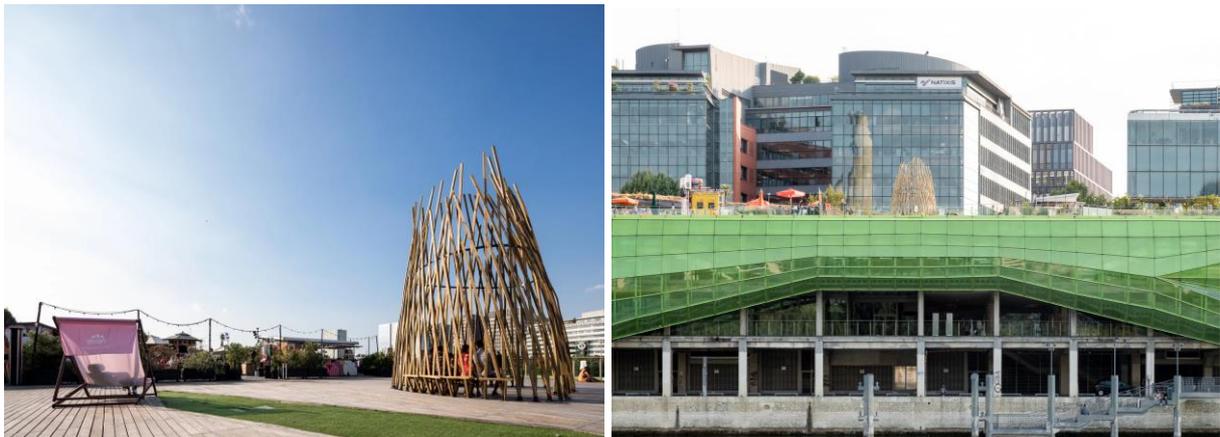


Figure 12 – La Vrilette (Sculpture Tectonique 2018) sur le toit de la Cité de la Mode et du Design.

La Vrilette fut l'occasion de tester ce que pourrait être une évolution de l'enseignement vers une plus grande place attribuée à la recherche. Les étudiants furent très motivés par leur projet :

ils montèrent une association, l'ensemble des réseaux sociaux que notre collectif utilise aujourd'hui, un partenariat avec la Cité de la Mode et du Design pour y exposer le pavillon puis sa relocalisation inattendue sur le site du couvent de la Thébaïde dans le Cantal.

Surtout, ils expérimentèrent les différentes méthodes pour construire en bois courbé et les confrontèrent à la multiplicité des contraintes constructives : doit-on faire des familles de rayons de courbures ? Comment extrapoler un résultat unique aux 250 éléments structurels qui constituent le projet ?

Concernant la première question, je leur suggérai que la réalisation des moules et tables de montages prenait généralement au moins la moitié du temps de la construction et que l'estimation de ce dernier nécessitait de connaître la quantité de préfabrication bien pensée mise en œuvre. Ainsi les 250 éléments du projet ne pouvaient pas avoir des rayons de courbures tous différents ! Je leur demandai de revoir leur projet avec au maximum 3 ou 4 familles de rayons de courbure afin de pouvoir utiliser un même moule pour au moins 80 éléments.

À ma surprise, les étudiants décidèrent de ne pas suivre mon conseil. Mais lorsqu'ils vinrent m'en faire part, ils apportèrent en même temps la solution : les plans d'une machine que nous appelâmes cintreuse et qui, à l'aide d'un jeu de marques et de taquets à roues dentées, permettrait selon eux de réaliser les 250 éléments avec des courbures toutes différentes. J'avoue que j'avais à ce moment-là encore des doutes, mais les étudiants ont fabriqué cette machine, ainsi qu'une autre qui permettait d'étuver le bois pour le rendre plus souple et ils ont finalement réussi à réaliser le pavillon avec 250 éléments différents comme ils l'avaient voulu. Bien sûr il y eut quelques soucis, comme l'effet ressort qui réduisait notablement la courbure des éléments après leur refroidissement, mais l'innovation et la construction réalisées en seulement 4 mois étaient un succès. C'est à ce moment précis que je pris la décision de refonder cet enseignement pour l'orienter vers la recherche et les structures innovantes.



Figure 13 – L'étuve (à gauche) et la cintreuse (au centre et à droite) imaginées pour la réalisation de La Vrillette.

Le nouveau cours, intitulé « Explorer à l'échelle 1 » (noté « CTA EE1 » dans les légendes lorsque l'illustration est issue de cet enseignement) abandonne l'idée de concours de projets (les étudiants travaillent sur un seul projet commun) afin de libérer le temps nécessaire pour la recherche historique et épistémologique, pour l'état de l'art, pour mener une recherche et mettre en place des algorithmes de conception et de calcul au premier semestre, et la réalisation du pavillon au second semestre.

Les objectifs du cours évoluèrent en conséquence : il n'était alors plus question de seulement construire un pavillon à l'échelle 1 mais aussi de transmettre aux autres les acquis de nos études : comprendre une typologie, l'étudier, mener les expériences nécessaires, fabriquer de zéro – sur la base de la solution Rhino + Grasshopper – des algorithmes de conception et de calculs suffisamment ergonomiques pour être utilisés par tout un chacun, etc. Pour rendre compte de ces travaux, il a donc été décidé l'édition d'un livre de 120 pages chaque année (à ce jour deux manuscrits ont été réalisés) et de le présenter à au moins une conférence ou une revue avec *peer review* (les travaux d'Elastica et de Baya font l'objet d'une présentation et d'une publication à l'IASS 2021 [30][31] et ceux de Kagome ont été publiés dans le *Journal of Civil Engineering and Architecture* en 2022 [32]).

Le thème de recherche, décidé annuellement, doit répondre à des critères : des typologies innovantes ou expérimentales, permettant une large part de recherche, un aspect de conception structurelle complexe, et autant que possible des recherches inédites à mener. Mais surtout, et c'est cela qui rend le cours stimulant, une typologie sur laquelle les enseignants n'en savent pas (ou presque pas) plus que les étudiants au début de l'année !

Après les difficultés rencontrées sur l'Ombrelle, premier gridshell élastique post-formé que nous réalisons, et sur lesquelles je reviendrai plus tard, nous avons décidé qu'il nous fallait maîtriser chaque étape de la conception. Pour ce faire, nous avons mené les études nécessaires pour comprendre le procédé de conception et développer notre propre algorithme de recherche de forme et de calcul des gridshells par relaxation dynamique, un principe de modélisation qui permet de résoudre des problèmes quasi-statiques par un calcul dynamique fictif.

En résumé, puisqu'il s'agit de l'objet de la suite de ce document, on suppose une forme, appelée « forme architecte » qui n'est forcément pas celle physiquement réelle de l'objet (en effet : c'est elle que l'on cherche). Cette différence implique que la forme architecte n'est pas au repos : si on la construisait ainsi, elle se déformerait forcément pour suivre les lois de la nature. Elle veut donc se relâcher. Grâce à la deuxième loi de Newton, on peut donc résoudre un transfert d'énergie potentielle d'une forme à relâcher vers une énergie cinétique (fictive) qui va provoquer le déplacement de la structure numérique vers sa position réelle. Il s'agit donc d'une méthode itérative.

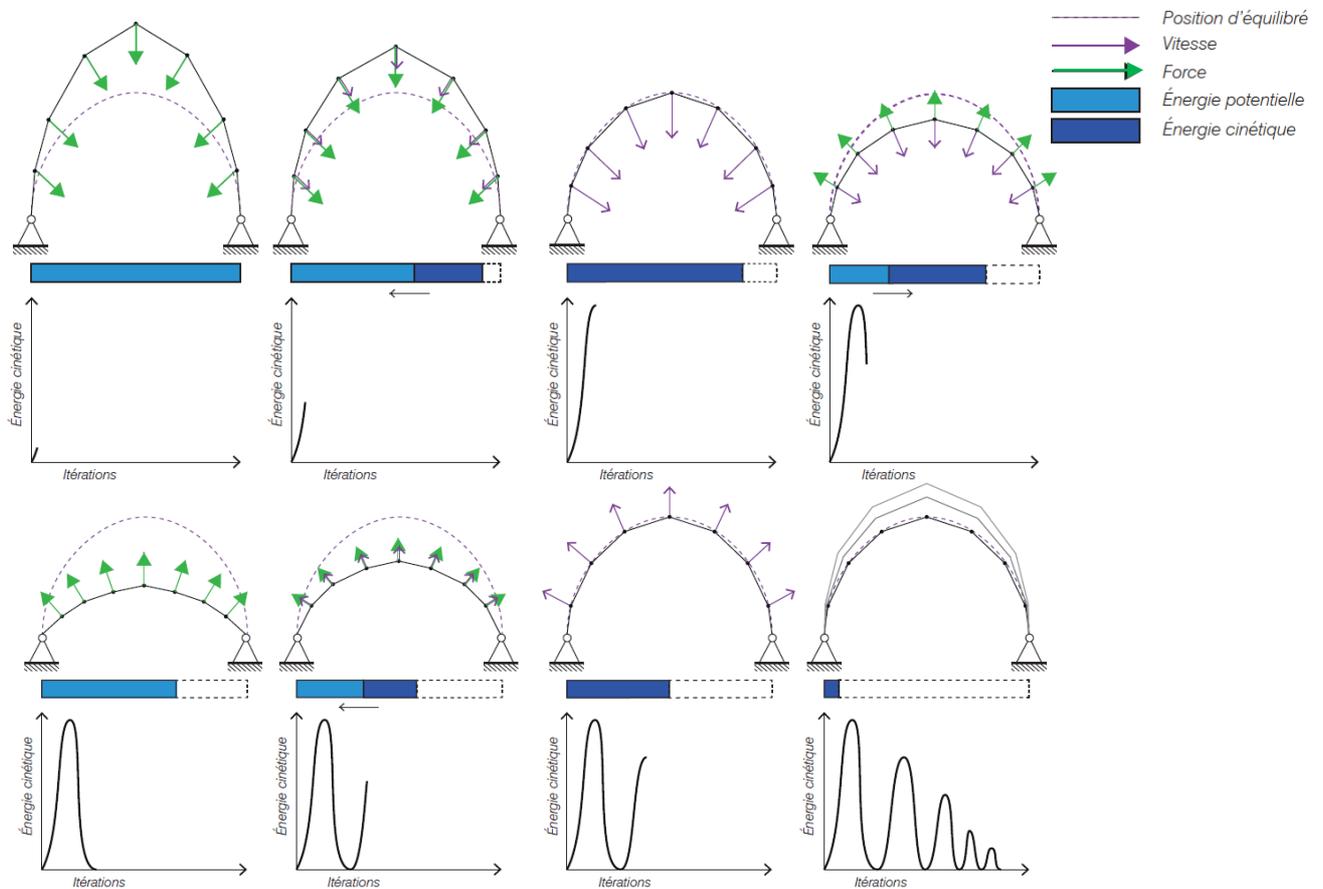


Figure 14 – Transfert d’énergie pendant la relaxation dynamique d’un gridshell [Komisarova A. & Carresi L. – CTA EE1].

Nous étions alors très peu familiers de cette méthode, qui peut être utile pour la résolution de nombreux problèmes, même sur des questions purement géométriques. À titre d’exemple, je l’avais déjà utilisée au sein du BET VP&Green pour trouver la forme des panneaux verriers (et donc plans) à quatre côtés du dôme de la rue Euler à Paris, cependant cela se fit via un *plug-in* en « boîte noire » de Grasshopper : Kangaroo. J’étais donc un simple utilisateur d’une solution sans en comprendre pleinement le fonctionnement.

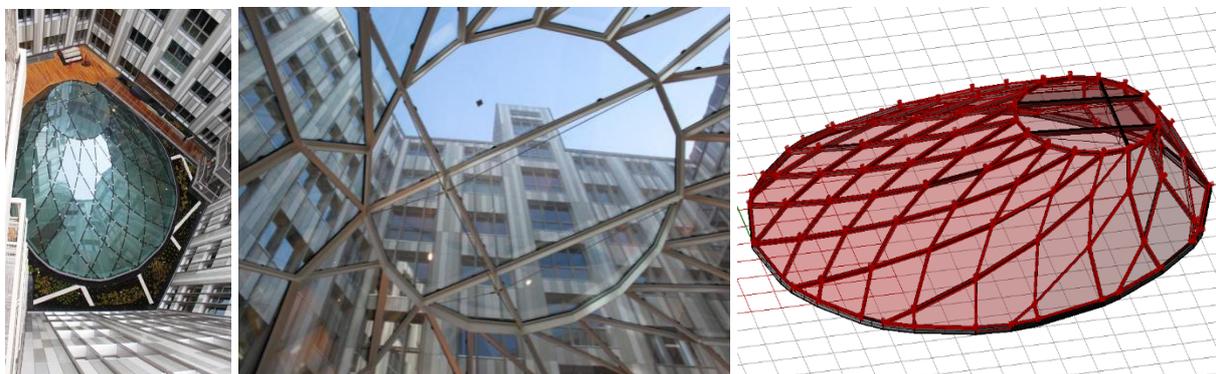


Figure 15 – Dôme de la rue Euler à Paris, Bouchaud architectes, VP&Green ingénieurs structure.

Elastica fut l'occasion de s'intéresser dans le détail sur cette méthode de résolution par relaxation dynamique. Cette étude a abouti à un ensemble documentaire de vulgarisation sur le sujet, mais également à la fabrication d'un algorithme ergonomique et en libre accès de conception et de calcul des gridshells élastiques par relaxation dynamique. À la différence de Kangaroo, l'algorithme Elastica rend possible le paramétrage fin de toutes les données géométriques et mécaniques des éléments et rend accessibles les résultats de chaque étape de calcul.

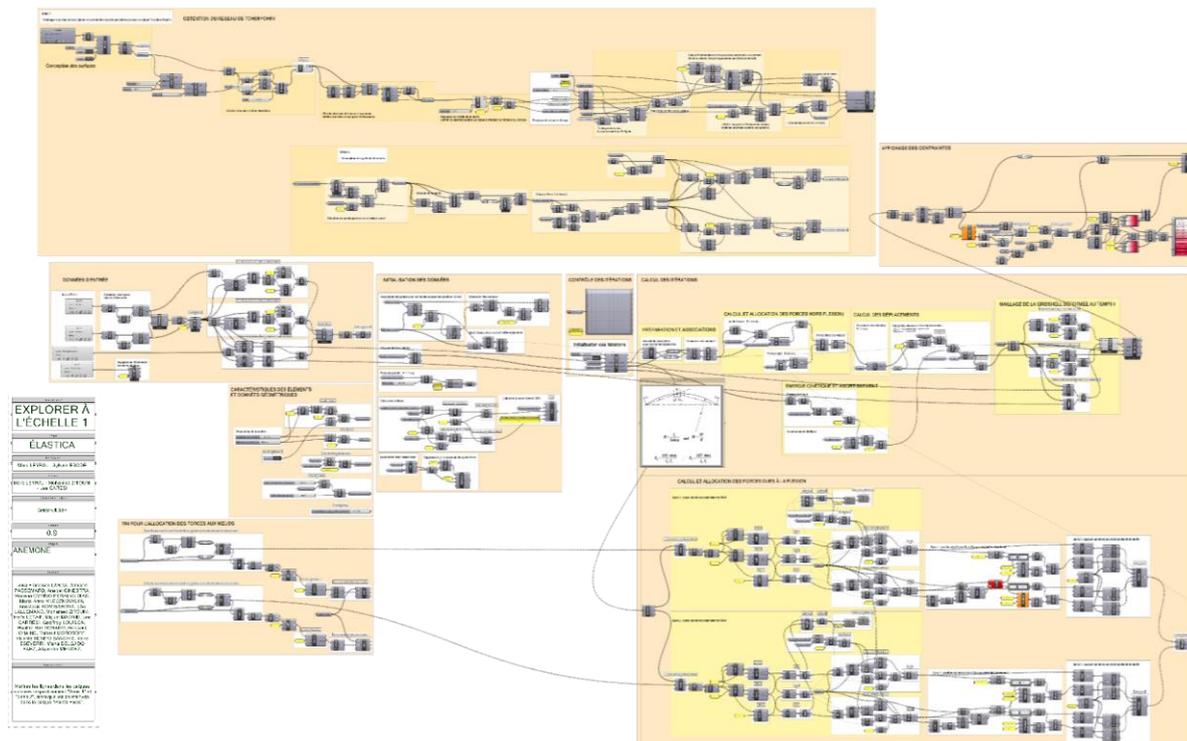


Figure 16 – Extrait de l'algorithme ELASTICA.

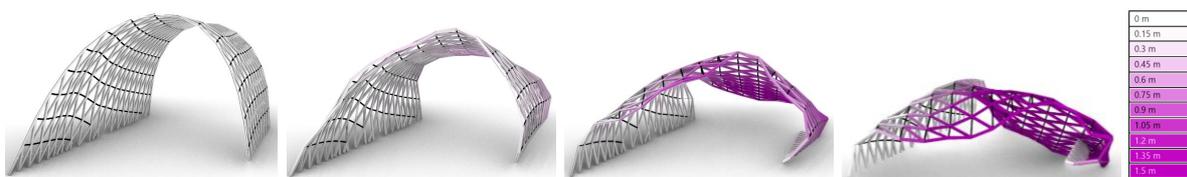


Figure 17 – Cinématique du flambement général du gridshell obtenue par ELASTICA lorsque la charge nodale dépasse la charge critique.

La puissance de l'outil pour résoudre des problèmes complexes, même en grands déplacements, nous décida à en réutiliser les acquis pour les années suivantes.

Notamment pour le pavillon Baya (2020-2021) : cette année-là, nous avons choisi de nous pencher sur une typologie de structure, les coques tressées, pour laquelle la littérature disponible semblait extrêmement limitée. L'idée est venue en observant les nids des Tisserins de Baya, petits passereaux d'Asie du Sud-Est qui tressent des colonies de nids suspendus avec des herbes locales. L'objectif

était de comprendre le fonctionnement structurel de leurs ouvrages et de l'extrapoler à un pavillon à échelle humaine. C'était également l'occasion de réfléchir à la forme globale des nids et de comprendre quelle forme minimise l'énergie des forces en jeu.

Au fur et à mesure de l'avancée de nos études, nous avons monté un nouvel algorithme, appelé BAYA, (toujours par relaxation dynamique, grâce au cœur de l'algorithme ELASTICA) qui nous a permis de déterminer les champs des contraintes principales d'une coque chargée.

C'est à ce stade que nous avons défini précisément quel serait l'apport scientifique de notre recherche : déterminer s'il existe un tressage (défini par ses densités et orientations de brins) optimal pour le champ de contraintes observé dans une coque structurelle sous un chargement donné.

Le Covid-19 imposait déjà depuis longtemps les enseignements à distance et la limitation des contacts humains. Dans ce cadre il apparut qu'il était extrêmement compliqué de mener des expérimentations physiques pour nos recherches. Nous avons donc décidé de conduire nos études sur le comportement mécanique d'éprouvettes tressées et chargées de façon numérique. Nous l'avons fait par relaxation dynamique : le résultat de ce travail a été de formuler des « lois » de tressage optimal en fonction des contraintes dans la coque. Nous avons ensuite nourri l'algorithme BAYA avec ces lois et celui-ci est aujourd'hui en mesure de donner le tressage optimal de tout projet de coque architecturale. Nous revenons en détail sur ce travail dans la partie 2.

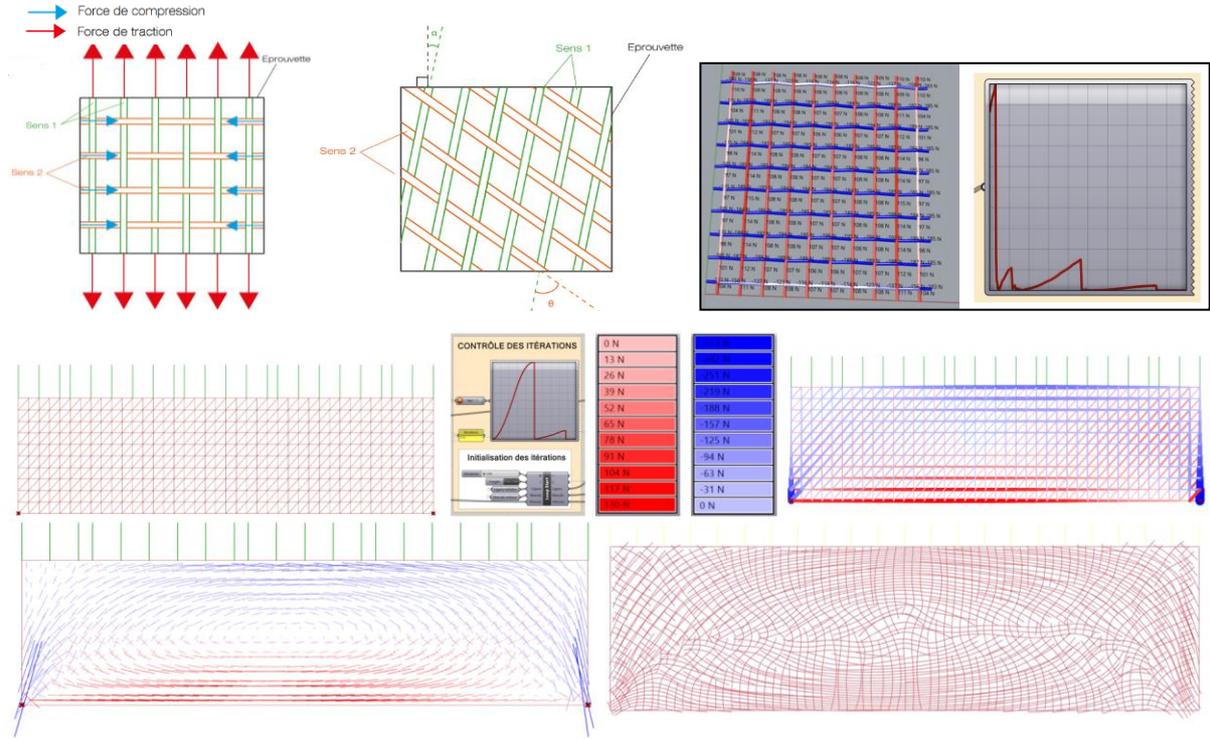


Figure 18 – Éprouvette de test du comportement mécanique des tressages contraints, maillage de la coque, efforts et contraintes principales dans les éléments finis, et tressage optimal par l'algorithme BAYA appliqué à une poutre.

Il reste encore à vérifier ces résultats par l'expérience, ce qui est partiellement fait à ce jour et va se poursuivre dans le futur : nous réalisons, dans le cadre d'un mémoire de master avec Morgan Dannenmüller, les expériences sur des éprouvettes tressées de façon physique. Ces derniers essais sont également en train de se poursuivre à l'école Centrale-Supélec de Paris (avec laquelle nous avons construit un partenariat depuis un an : des étudiants Centraliens participent aujourd'hui au cours de l'ENSA-PLV).

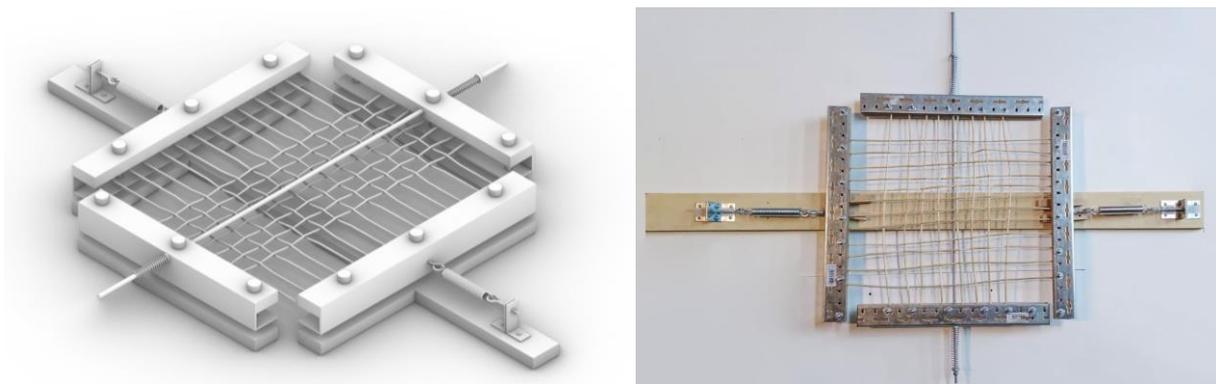


Figure 19 – Dispositif expérimental physique.

Grâce à des partenariats montés avec laboratoire MAP-MAACC (Modélisation pour l'Assistance à l'Activité Cognitive de Conception) de François Guéna, le Muséum National d'Histoire Naturelle et le service de radiologie de Jean-Robert Blondeau à l'hôpital de Pont-l'Abbé, nous avons pu numériser un spécimen de nid de Tisserin par photogrammétrie, par scanner surfacique et par RX. Nous avons en parallèle utilisé l'algorithme BAYA sur la forme d'un nid de tisserin pour déterminer quel serait le tressage idéal qu'il proposerait, et nous avons comparé les résultats.

Il s'avère que le nid du tisserin est extrêmement proche du tressage donné par notre algorithme et que les rares écarts proviennent de contraintes constructives imposées à l'oiseau (il se sert d'un perchoir tressé comme échafaudage provisoire, ce dernier finit noyé dans l'enveloppe du nid).



Figure 20 – Sections du scanner RX, modèle 3D du nid reconstruit numériquement et comparaison avec les prédictions de l'algorithme BAYA.

D'autres expériences ont été menées, et se poursuivent aujourd'hui, pour comparer les résultats numériques et physiques, notamment sur les champs de contraintes principales par photoélasticimétrie à l'ENSA-PLV et à CentraleSupélec. Nous avons enfin comparé les déformations prévues par l'algorithme avec celles d'un modèle réduit échelle 1/2 tressé en osier très souple.

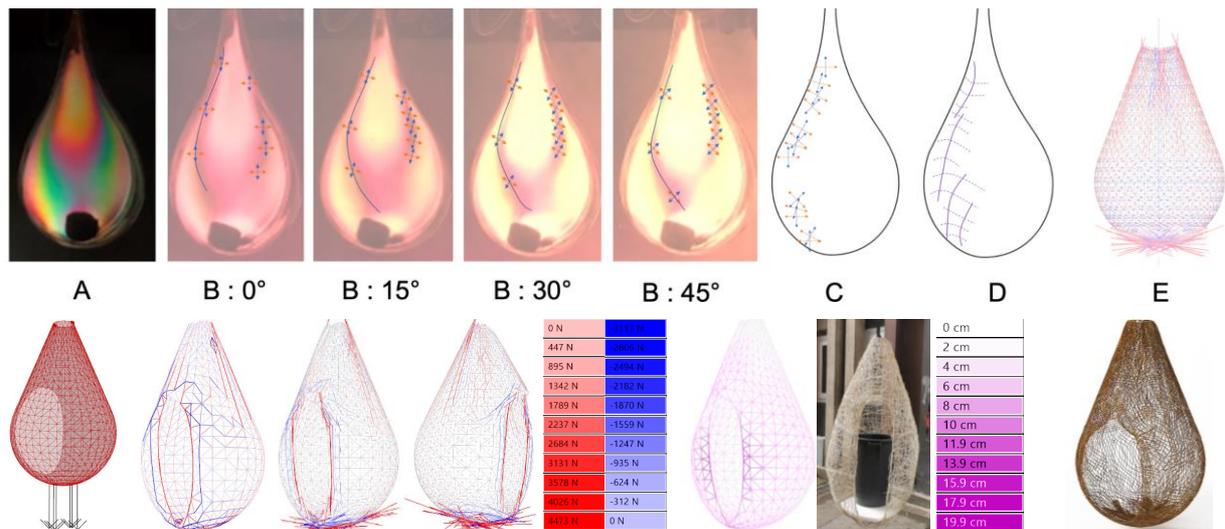


Figure 21 – Isochromes et isoclines par photoélasticimétrie pour un chargement spécifique comparées aux contraintes prévues par l'algorithme Baya ; et résultats de l'algorithme sur le projet comparés avec les déplacements obtenus sur un modèle réduit à l'échelle 1/2.

Le nid a finalement été construit sur le belvédère du parc de la Butte du Chapeau rouge dans le XIX^e arrondissement de Paris grâce à un partenariat que nous avons depuis trois ans avec la Mairie de Paris. Pesant moins de 20 kilogrammes, il est en mesure de résister à une charge de 180 kilogrammes (charge testée sur site, les calculs donnent une charge limite de 400 kg).

Ces deux dernières recherches (ELASTICA et BAYA) sont détaillées dans la partie 2 consacrée à la production scientifique et technique des recherches menées.

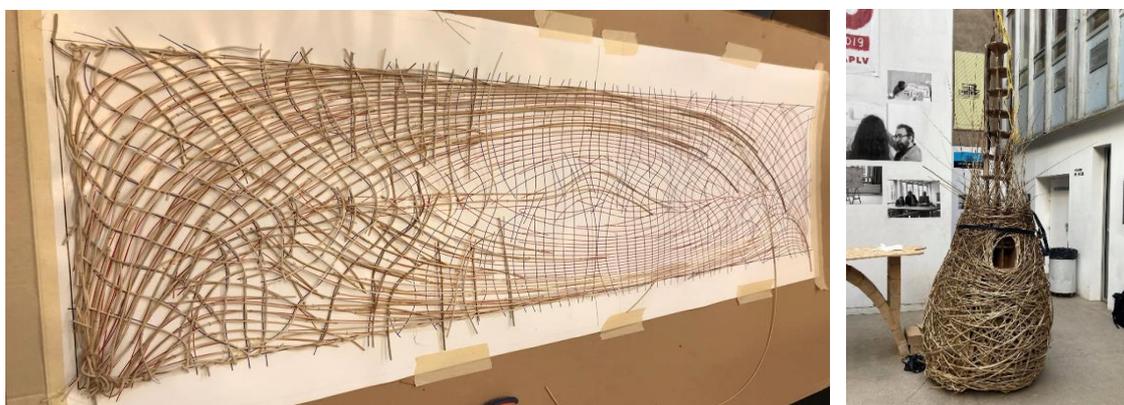
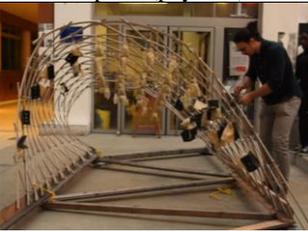
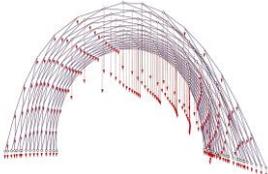
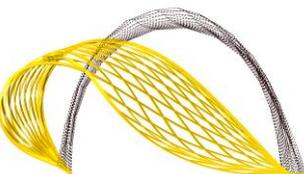
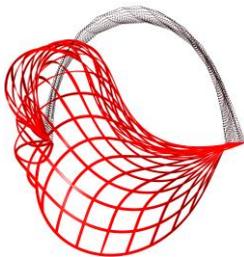


Figure 22 – Application de l'étude à la réalisation d'une poutre et d'une coque suspendue tressées.

L'évolution de cet enseignement vers des typologies moins décrites dans la littérature se fait en parallèle de nos acquis. Nos sujets d'études récents sont d'ailleurs issus d'une synthèse de ceux-ci : nous étudions par exemple en 2021-2022 la réalisation d'un gridshell élastique post-formé aux membrures entrelacées appelé Kagome.

Au cours de cette recherche, que nous décrirons également dans la partie 2, nous avons pu comparer les résultats numériques par relaxation dynamiques avec ceux issus de tests de chargements de maquettes à diverses échelles. Nous avons quantifié puis analysé les écarts entre ces deux modélisations numériques et physiques, émis des hypothèses pour les expliquer, et mené des recherches pour les vérifier. Nous avons conclu sur des explications probables aux écarts et sur les méthodes conseillées au concepteur afin de s'assurer de la validité de ses résultats de dimensionnement.

Tableau 2 – Comportement du gridshell Kagome : comparaison entre résultats issus d'une modélisation numérique par relaxation dynamique et un essai de chargement sur un modèle physique à échelle 1/2 [32].

Models	Buckling start (RD)	Rupture (physical)	End of buckling (RD)
			
			
-	Load: 57.15 kg	Load: 65.00 kg	Load 74.14 kg

Notre réflexion porte aussi sur l'utilisation de ces savoirs, en particulier ceux portant sur la méthode constructive, pour d'autres typologies de franchissement ou de couverture. Sortons le temps d'un paragraphe de la définition classique du gridshell élastique post-formé : constructivement, il s'agit d'un objet mis en forme dans sa configuration souple avant d'être raidi pour sa phase de service.

Cette philosophie constructive est-elle adaptable (de façon pertinente) à des projets de couvertures ou de franchissement qui ne sont pas des gridshells ?

Pour augmenter cette souplesse durant la phase d'érection, Frei Otto trempait les membrures en bois du gridshell de Mannheim [24]. Exactement comme le vannier qui trempe son osier pendant 48h avant de le tresser pour en former des objets du quotidien. La vannerie se définit même en partie sur cette transformation d'un matériau vivant qui est toujours vert ou retrempé lorsqu'il est mis en forme et qui devient rigide une fois l'objet tressé.

Ce parallèle nous conduit à nous interroger sur l'adéquation de l'osier (ou d'autres fibres issues de l'art de la vannerie) comme matériau principal de ce mode constructif inspiré des gridshells élastiques post-formés. De plus, nous y reviendrons plus tard, l'osier est un matériau local dans de nombreuses régions françaises, et sa culture est très sobre en termes de CO₂ relâché dans l'atmosphère et n'impacte que peu la biodiversité.

C'est pour cette raison que nous avons, avec des étudiants de l'ENSA-PLV, répondu positivement à la demande du BETA qui organise un festival d'architecture dans la ville de Richelieu, Utopies Constructives, pour la création d'une passerelle temporaire de 12,80 m en osier. Cet objet, dont les études de conception sont achevées et la réalisation en cours, devrait être achevé durant l'été 2023. Il sera question pour nous de démontrer la pertinence du mode constructif à raideur évolutive et de l'usage de l'osier dans ce cadre.

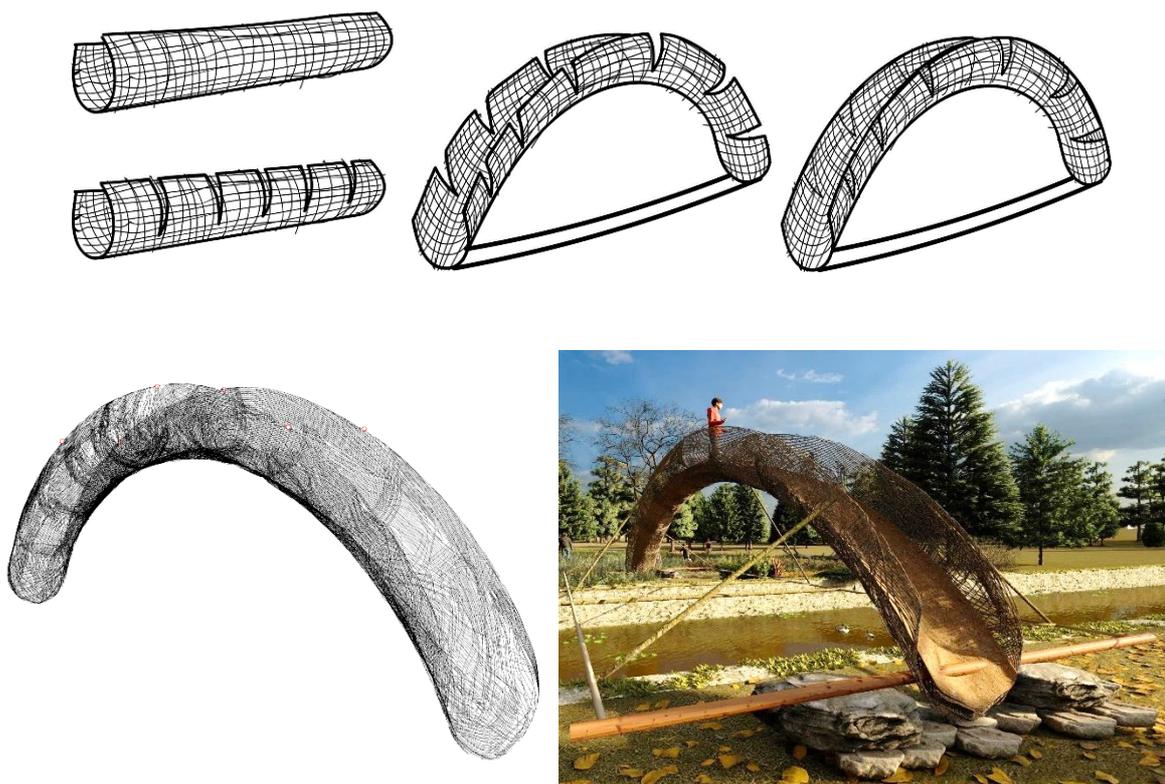




Figure 23 – Phasage de la construction et tressage préliminaire par l’algorithme BAYA de la passerelle en osier des Utopies Constructives [39] [3D par Nicolas Prévost, Photos par Inès Macia et Quentin Chef]

Je tiens à préciser en conclusion que ce document présente l’essentiel de mes recherches, réflexions et acquis, mais qu’elle n’est pas pour autant exhaustive. J’ai en effet effectué une sélection afin de proposer un déroulé narratif cohérent de ma démarche. D’autres travaux non évoqués ici ont été décrits dans les autres pièces du dossier.

Ce qu’il convient d’en retenir, c’est que je profite de l’enseignement et de son émulation, ainsi que des expériences avec les étudiants pour chercher à valider certaines hypothèses. Cet environnement pédagogique s’intersecte donc directement avec la recherche, qui est l’objet principal de la partie suivante.

Deuxième partie :
Synthèse des recherches scientifiques et
techniques.

3. Introduction

Jusqu'à présent, les budgets alloués à nos objets de recherches sont relativement modestes. Le choix des thématiques en dépend en partie : si nous ambitionnons de travailler au développement de la fabrication architecturale digitale, par exemple, il conviendrait de chercher à le faire dans un autre cadre. Cependant, cet état de fait conduit également à se poser certaines questions qui n'auraient pas nécessairement émergées dans un contexte de profusion de moyens.

La frugalité est aussi la garantie que l'objet de la recherche serve notre société dans le principal défi qu'elle rencontre aujourd'hui : les bouleversements climatiques liés aux émissions de gaz à effet de serre en lien avec l'activité anthropique. En effet, la frugalité invite souvent à réfléchir au *low tech*, et donc indirectement à la question de l'efficacité, de l'usage parcimonieux de la ressource et du recours aux matériaux biosourcés.

Lorsqu'on réfléchit à couvrir un grand volume par des solutions *low tech*, un ensemble de raisons – essentiellement liées à la très faible efficacité de l'élément « poutre » – conduisent à réfléchir au courbe. Et donc, parfois, à la question des voûtes, dont font partie les dômes. Du panthéon de Rome au CNIT en passant par la coupole de Santa Maria del Fiore, ces ouvrages à la fois porteurs et de franchissement fascinent. Cependant, ils requièrent des moyens constructifs a priori parfaitement conséquents.

Si nous prenons l'exemple du Panthéon de Rome, plus grand dôme au monde réalisé en béton non armé, il a fallu un moyen de cintrage très complexe et/ou très ouvrageux pour y parvenir. Que ce soit un cintre géant de 43 mètres (diamètre du dôme) tel que proposé par Gründ [23], un cintre léger support d'une première épaisseur de voûte maçonnée formant cintre définitif comme le suggère Viollet-le-Duc [48], ou un remplissage total de l'édifice avec de la terre afin de construire directement dessus avant de l'excaver comme le pense Pierre Gros [22], la technique nécessite dans tous les cas des moyens importants. C'est pourquoi nous savons que pour la réalisation d'un ouvrage en arc ou en voûte, le coût de réalisation du cintre est généralement supérieur à la moitié de celui de l'opération globale.

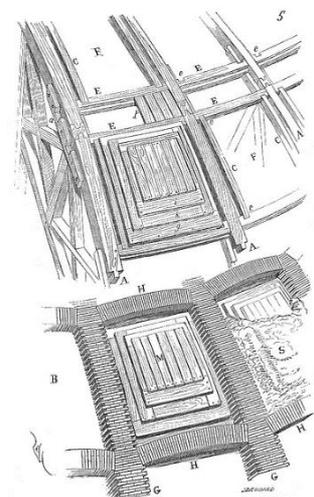


Figure 24 – Détail de construction du Panthéon de Rome par Viollet-le-Duc [48].

Pour contourner ce problème (lorsque que c'en est un, c'est-à-dire quand la ressource et la main d'œuvre se font rares), nous pouvons nous inspirer des solutions issues de l'architecture primitive et/ou vernaculaire.

Si on s'interroge sur le mode constructif des premières voûtes en berceau, au quatrième millénaire avant notre ère, nous retrouvons essentiellement deux méthodes : l'une qui rappelle celle proposée par Gros pour le Panthéon de Rome et une autre qui fait référence à la voûte nubienne et qui consiste à appuyer des lits de briques inclinés sur un appui provisoire. Cette dernière méthode, efficace et facile de mise en œuvre, permet de construire sans cintre.

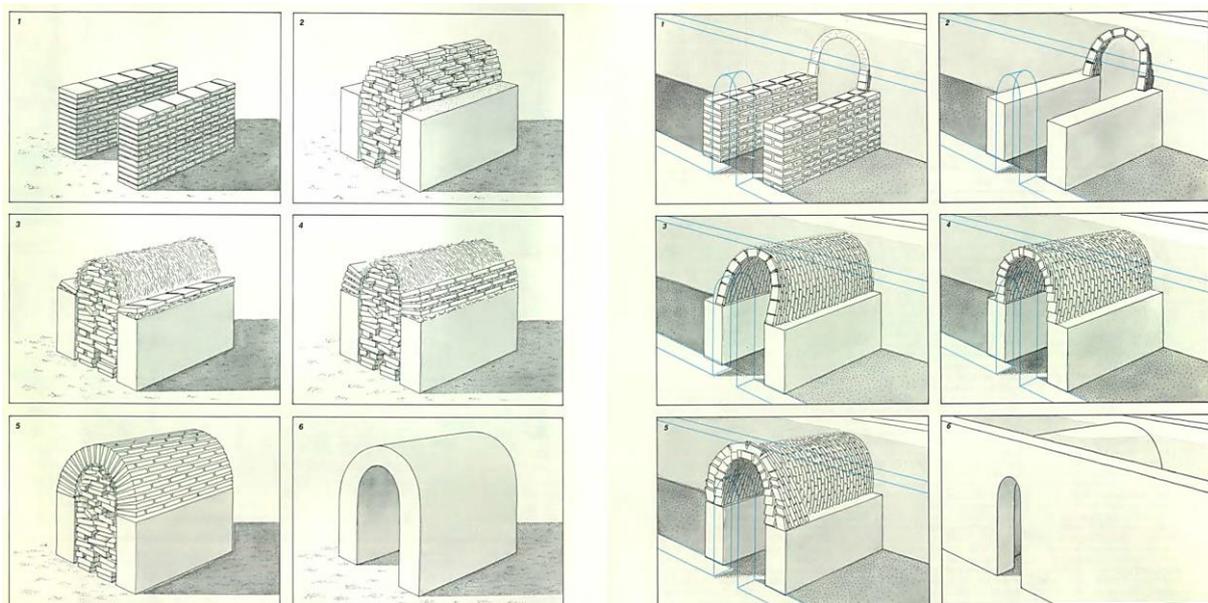


Figure 25 – Modes constructifs d'arcs et de voûtes dans l'antiquité au Proche-Orient par Van Beek [47]

Mais d'autres solutions sont possibles. Ainsi, les premiers traités d'architecture tel que *de architectura* de Vitruve laissent entrevoir le potentiel du mode constructif en flexion active de certains végétaux : « L'orme et le frêne ont beaucoup d'humidité avec fort peu d'air et de feu ; mais comme, dans leur composition il n'entre que médiocrement de terre, ils offrent de la flexibilité dans les ouvrages auxquels ils servent, et l'humidité abondante qu'ils contiennent, loin de leur permettre de résister à la charge, les fait promptement fléchir » [50].



Figure 26 – Hutte primitive selon Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc [49].

Cette description, certes quelque peu cabalistique, illustre étonnamment bien le mode constructif des habitations des pygmées vivant dans les forêts d’Afrique centrale.

S’agissant d’une civilisation nomade, leurs huttes, les *lobembes*, sont des habitats temporaires. Pour une durée plus longue, entre deux semaines et un mois, la construction sera plus solide : c’est le *mongulu* qui cependant reprend les mêmes principes structurels. Elles sont faites de fines branches courbées de sorte à former un dôme en grille et ancrées dans le sol, créant ainsi une structure en flexion active. Construite par les femmes ou les hommes célibataires, cette structure est relativement raide en phase de service, c’est-à-dire une fois la construction achevée, car elle permet de soutenir leur poids lors de la pose des feuilles qui permettent de constituer une forme primitive de barrière d’étanchéité.

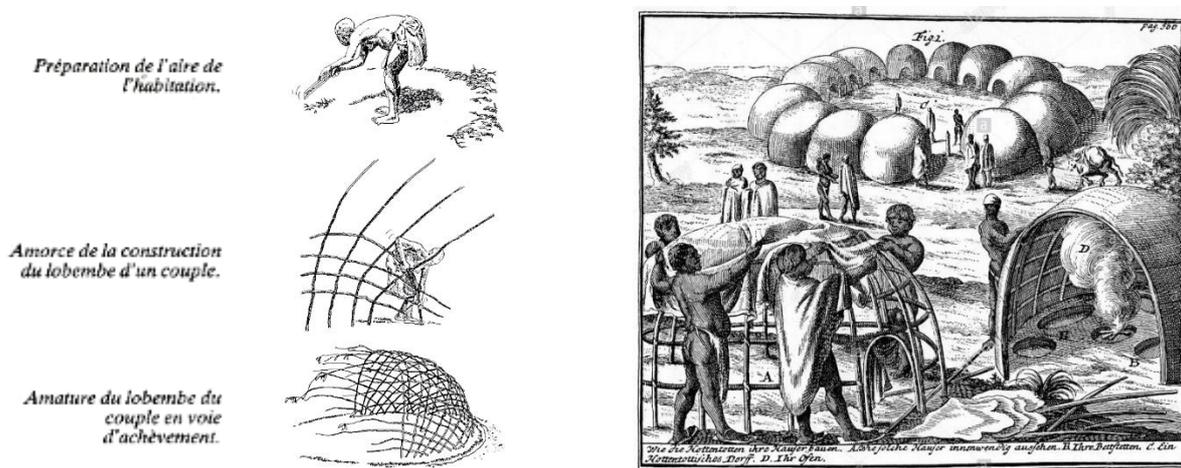


Figure 27 – Architecture de Lobembe des pygmées selon Philippart de Foy [35] (à gauche).

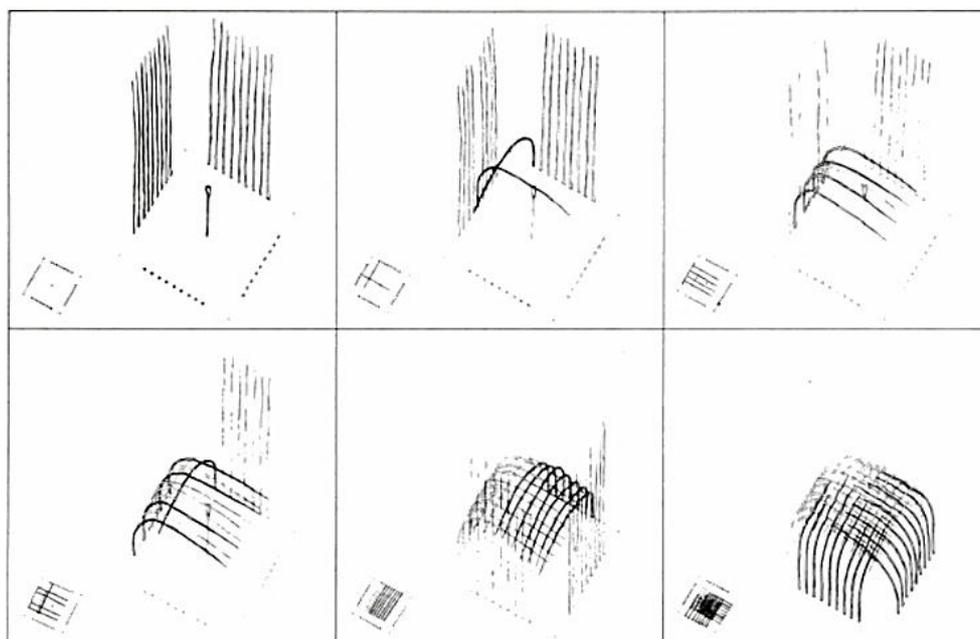


Figure 28 – Les différentes étapes de construction d’un mongulu selon Philippart de Foy [38].

La disponibilité immédiate des matériaux et la facilité de mise en œuvre du mode constructif en flexion-active a permis à bien d'autres peuples, généralement nomades, d'employer pour leur habitat des techniques de construction similaires : ainsi les huttes des Khoïkhoï, Kraals ou Nama d'Afrique australe sont construites à l'aide d'une structure composée de branches de tamaris tannées au feu, courbées et insérées dans des trous au sol, formant un dôme recouvert d'une couverture de roseaux séchés et tissés en nattes.



Figure 29 – Les différents étapes de construction des Haru Oms, huttes du peuple Nama : structure (à gauche), couverture et assemblage (à droite).

Ce mode constructif évoque également celui des huttes des Indiens du Xingu, au Brésil, ou encore des Zoulous en Afrique australe. Cette liste est loin d'être exhaustive tant ce mode constructif semble avoir éclos chez de nombreux peuples tout autour du globe.



Figure 30 – Huttes d'indiens du Xingu (en haut) et de tribus Zoulous (en bas). [Photos : maison-monde.com ; auraphotos.com, Wikimedia]

On comprend qu'une voie peu dispendieuse, peu ouvrageuse et *low tech* pour franchir ou couvrir consiste à suivre deux principes de base :

1. Utiliser des éléments légers (et naturellement abondants) : bois ou tiges de plantes, etc.
2. Se passer de cintre.

La première condition nous ferme la porte, a priori, aux structures funiculaires. Ces dernières nécessitant suffisamment de masse afin que le funiculaire sous charges permanentes et variables ne varie que faiblement par rapport à celui sous charges permanentes seules, assurant ainsi que les différents funiculaires au cours de la vie de l'ouvrage restent compris entre l'intrados et l'extrados de l'arc ou de la voûte qui le forme. En effet, si cette condition n'était pas respectée et que les joints des éléments maçonnés ne pouvaient pas reprendre de traction, le dôme s'effondrerait.

Pour se passer de cintres, ces ossatures végétales sont courbées – elle forment une **coque** – et, arrangées dans un sens et dans un autre, elles se croisent afin de composer une **grille articulée**, ou un treillis. C'est la naissance du concept de gridshell.

Le terme gridshell est formé des mots coque et résille. En architecture, une coque est une structure continue et mince à surface courbée. Sa rigidité est liée à sa courbure (résistance de forme). Un gridshell est donc un maillage structurel discret de barres formant dans leur ensemble une surface courbe.



Figure 31 – Définition typologique schématique du gridshell [Photos : Jean-Maurice Michaud / Sofia Colabella]

Labbé [27] classe les gridshells selon deux grandes familles :

- « (...) ceux dont les membrures sont calculées à l'avance, tant dans leur courbure que dans leur résolution géométrique et leur fixations "flexion-inactive",
- et ceux dits à "flexion-active" qui partent d'une grille initialement plate, dont les connexions ne sont figées qu'ultérieurement à leur montage, une fois la structure établie dans sa forme architecturale. »

La première famille fonctionne généralement en compression et n'est pas l'objet de cette étude, comme nous venons de l'expliquer. Les membres de la deuxième famille, appelés gridshells élastiques, fonctionnent globalement en flexion et compression.

Ils présentent deux caractéristiques essentielles :

- Ils sont en flexion active, la forme est donnée par la mise en flexion d'éléments droits maintenus fixes en pied. Cette condition est nécessaire pour qualifier un gridshell d'élastique.
- Ils sont post-formés. Cela signifie que la grille est fabriquée à plat, non contreventée. Les éléments, fins et articulés, composent un ensemble déformable qui est ensuite mis en flexion lors de l'érection. Cette condition n'est pas nécessaire pour faire partie des gridshells élastiques, cependant notre étude se placera dans ce cadre, plus déterminant.

La forme naturelle d'un gridshell élastique dépend de la grille initiale et des déplacements imposés à ses points d'appui. Prenons l'exemple du plus simple d'entre eux : une simple tige souple sur les extrémités de laquelle on pousse latéralement. Initialement la tige est en compression. Très élancée, son équilibre en compression par raccourcissement laisse rapidement place à un équilibre instable en flexion : c'est le flambement. On peut généraliser ce point de vue en décrivant un gridshell élastique post-formé comme la forme post-flambement d'une grille à plat soumise au déplacement imposé de ses appuis.

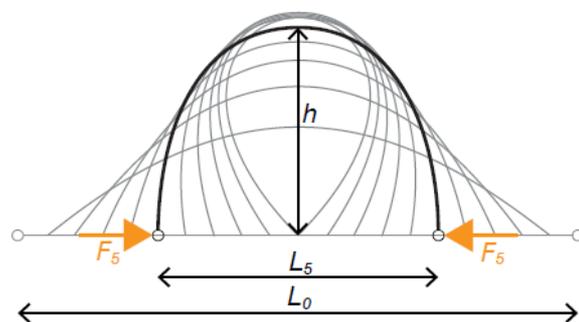


Figure 32 – Le plus simple des gridshells : une tige souple mise en flambement par deux forces latérales aux extrémités, illustration Anastasia Komisarova pour le CTA Explorer à l'échelle 1 – ens. Leyral

Une fois les extrémités des barres à leur emplacement final, il faut stabiliser et rigidifier l'ensemble du gridshell fléchi, qui est par nature très déformable : on bride la position finale en ajoutant des contreventements limitant la déformation des quadrilatères formés par les deux directions du maillage. La rigidité peut éventuellement être renforcée par l'ajout de blocs de cisaillement qui solidarissent les membrures d'un double lattage à la manière d'une poutre échelle (cf. Figure 72 – Principe d'augmentation de l'inertie par solidarisation des lattes avec des blocs de cisaillement (en gris), illustration Komisarova A. – CTA EEI.). La grille finale est très rigide et peut couvrir une grande portée sans porteurs intermédiaires, et ceci avec très peu de matière.

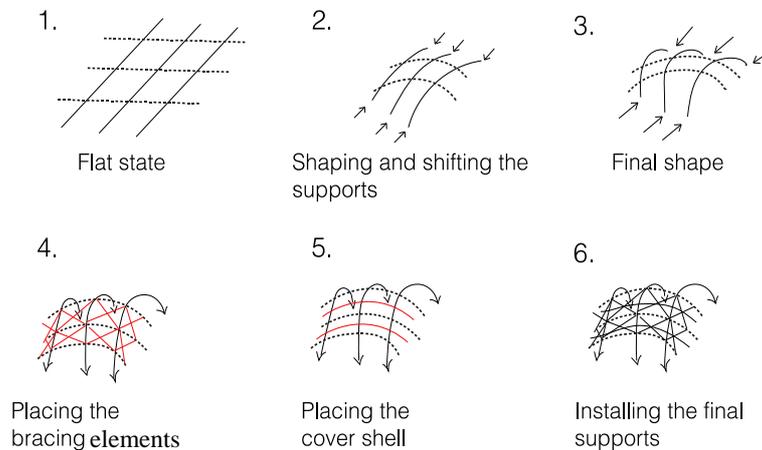


Figure 33 – Définition typologique schématique du gridshell élastique, illustration Wided Cherif pour le CTA Explorer à l'échelle 1 (CTA EE1 – ens. Leyral M).

Le principe constructif des gridshells élastiques permet donc en théorie la réalisation d'une voûte légère, peu onéreuse et assez facile à monter – qui plus est sans cintrage (mais avec un moyen de levage) – en se servant d'une idée constructive prometteuse : **construire souple et rigidifier ensuite pour la phase de service**. Cependant, un obstacle peut se présenter au concepteur : la forme de la couverture n'est pas entièrement libre. En effet, si nous prenons l'exemple simple d'une branche de roseau souple que l'on plie entre nos mains, à longueur de branche et distance entre appuis (les mains) données, il n'existe qu'une et une seule forme que pourra prendre le roseau. Extrapolé à une couverture, ce raisonnement nous conduit à nous poser une question : **comment anticiper la forme naturelle de la coque ?**

Pour aider à répondre à cette question, parmi les outils disponibles au grand public se trouve Kangaroo, un *plug-in* « clef en main » de calcul par relaxation dynamique du logiciel d'édition algorithmique Grasshopper. Si Kangaroo est un outil exceptionnel par son ergonomie, qui le rend utilisable par n'importe quel novice, il fonctionne néanmoins en boîte noire : nous n'avons accès ni aux tenants ni aux aboutissants, ni même aux paramètres mécaniques en entrée et aux calculs en sortie. On joue avec des données d'entrée et on observe la forme finale, sans savoir si celle-ci est bien paramétrée ni exactement en quoi consiste le calcul. Le processus de conception n'est pas maîtrisé, et cela conduit à un état de fait dont tout un chacun ne peut se satisfaire intellectuellement.

Le moteur de calcul du *plug-in* fonctionne par relaxation dynamique, une méthode qui permet donc de résoudre des problèmes quasi-statiques par un calcul dynamique fictif mais dont l'apparente complexité peut de prime abord rebuter le concepteur. Nous nous trouvons devant

un paradoxe : ce mode constructif suffisamment simple et *low cost* semble présenter un difficulté théorique infranchissable pour les architectes ou les concepteurs, ce qui peut en partie expliquer qu'il est aujourd'hui si peu utilisé dans l'architecture contemporaine.

Afin d'apporter un élément de réponse à cet obstacle, nous avons réalisé en 2020 un algorithme complet de conception et de calcul par relaxation dynamique. Depuis, nous tâchons régulièrement de comparer les résultats numériques à ceux obtenus sur modèles réduits. C'est l'objet de la première partie des travaux de recherches présentés ci-après.

Cependant, il reste qu'un gridshell nécessite du bois débité en scierie, de la métallerie et un outillage de base. Dans la poursuite de la réflexion sur la philosophie *low tech* et de l'usage minimal des ressources, nous avons voulu savoir si nous pouvions réaliser ce type d'ouvrage avec des matériaux très simples et accessibles à tous, telles des tiges végétales brutes et de faible diamètre et avec des outils de base (sécateur, couteau, etc.). Cette réflexion nous a conduit à étudier la faisabilité d'une conception architecturale soutenue par une structure tressée, et c'est l'objet de la seconde partie des travaux de recherches présentés.

En outre, il existe un point commun fondamental entre ces deux thèmes d'études, comme nous l'avons déjà abordé dans la partie 1 : un gridshell élastique post-formé est, constructivement, un objet mis en forme dans une configuration souple avant d'être raidi pour sa phase de service. A titre d'illustration, rappelons qu'afin d'augmenter cette souplesse durant la phase d'érection, Frei Otto trempait les membrures en bois du gridshell de Mannheim [24] (on sait que le bois porté au point de saturation des fibres a un module d'élasticité 25% à 30% – voire 40% selon les essences – inférieur par rapport à celui du bois sec à TH = 12%). Exactement comme le vannier qui trempe son osier pendant 48h avant de le tresser pour en former des objets du quotidien. La vannerie se définit même en partie sur cette transformation d'un matériau vivant qui est toujours vert ou retrempé lorsqu'il est mis en forme et qui devient rigide une fois l'objet tressé.

Nous concluons donc sur les perspectives croisées ouvertes par ces deux études.

Comment se servir du mode constructif des gridshells, souples en phase d'érection et raidis en phase de service, et des caractéristiques mécaniques évolutives des tressages réalisés à l'aide de matériaux bruts en fibres végétales, afin de franchir ou couvrir de grandes portées ?

Avant de répondre à cette problématique, nous tenons à clarifier quelques usages sémantiques qui pourraient, s'ils n'étaient pas clairement définis dès le début, porter le lecteur ou la lectrice à confusion :

Rigidité vs. Raideur. On confond souvent ces deux termes. Si on peut les définir comme la capacité à s'opposer à la flexion, alors il faut observer que cette résistance peut s'obtenir soit par l'élasticité du matériau (via le module d'élasticité E), soit par la forme géométrique de l'élément constitué (via le module quadratique, que nous appellerons par abus de langage l'inertie de flexion I de la section).

Dans la suite, nous utiliserons le terme rigidité pour qualifier la grandeur du module d'élasticité (E) du matériau. Concernant la raideur, elle qualifiera à la fois l'élasticité du matériau et la forme géométrique de la section. Elle pourra être torsionnelle – mais ce n'est pas l'objet de notre étude –, axiale (dans ce cas elle est le fruit du produit EA , A étant l'aire de la section) ou flexionnelle, provenant alors du produit EI de la section.

Tresser vs. Tisser. La vannerie est à la fois un art et une technique artisanale dont le produit est la création d'objets par tressage de fibres végétales. On utilise souvent, à tort, les termes tissage et tressage comme des synonymes. Le tissage est l'art d'entrelacer régulièrement des fils textiles de façon ordonnée et souvent orthogonale afin de former un tissu. Le terme tressage nous provient lui de la tresse, c'est-à-dire de la corde, qui était confectionnée en assemblant au minimum trois fibres selon une méthodologie – un motif de croisements – répétitive.

Cependant, lorsqu'on fabrique une nappe, l'objet qui en résulte est dans les deux cas une surface obtenue par l'entrelacement des éléments qui la composent, ce qui peut expliquer qu'on utilise souvent indifféremment les deux termes. Bien que le nom du tisserin de Baya – notre premier objet d'inspiration – provienne évidemment de l'art de tisser, on emploiera plus volontiers dans nos études le verbe tresser qui définit l'art du vannier, celui-ci n'ayant recours – à l'instar de l'oiseau qui fabrique son nid – qu'à des brins d'origine végétale pour concevoir ses objets.

Notons enfin que le fruit d'un tressage est plus volontiers une surface rigide que celui du tissage qui fait écho à des surfaces très souples. Dans la suite, et à l'instar de nos collègues anglo-saxons qui sont plus homogènes dans leur littérature scientifique sur le sujet, nous utiliserons ainsi le terme de tissage (*weaving*) si la surface ne peut supporter que de la traction (aucune rigidité) et de tressage (*braiding*) si sa rigidité lui permet de reprendre à la fois traction et compression (et donc flexion). En ce sens, notre objet de recherche se situe donc clairement dans le cadre du tressage.

* * * * *

Ces considérations faites, la suite du développement des travaux de recherche effectués se divise ainsi en deux sous-parties :

- **Nous tenterons dans un premier temps de répondre à la question de comment développer des outils simples et ergonomiques de conception des gridshells élastiques post-formés utilisables aussi bien par tous les concepteurs. Nous poserons également la question de la validité de ces modélisations en proposant une analyse argumentée des résultats comparés avec des essais de chargements sur des modèles physiques.**
- **Forts des méthodes ainsi acquises, nous chercherons à savoir s'il est possible de réaliser des coques structurelles tressées à l'échelle architecturale ? Et, dans l'affirmative, quel serait le meilleur moyen de les concevoir et de les optimiser du point de vue de l'usage et de la mise en œuvre de la matière qui les compose ?**



4. Évolutivité du souple au raide dans le mode constructif : concevoir, modéliser et étudier les gridshells élastiques

Les études de cette partie (ainsi que celles sur la définition des gridshells et sur les gridshells dans les cultures vernaculaires qui précèdent) ont été menées en enseignement CTA « Explorer à l'échelle 1 » avec la participation des étudiants : Geoffrey LOUISON, Mohamed ZITOUNI, Anastasia KOMISAROVA, Jose Francisco LANDA, Armand PASSEMARD, Anabel GINESTA, Mariana CYRINO PERALVA DIAS, Marta Anna MLECZKOWSKA, Léa LALLEMAND, Haifa LTAÏEF, Miguel MADRID, Lea CARRESI, Beatriz MALDONADO, Gaspard CHAINE, Thibaut MOROSOFF, Vicente BENITO SANCHIS, Irene ESEVERRI, Marta DELGADO PAEZ, Alejandro MENDEZ, Jean-Baptiste MALLARD, Abderraouf KAOULA, Ana Karen PIMIENIA.

4.1. Introduction sur la nécessité d'une vulgarisation du procédé conceptuel de la flexion active appliqué au cas des gridshells élastiques

4.1.1. Problématique

Nous venons de décrire les gridshells élastiques comme un moyen de couvrir extrêmement efficace en termes de matière, que ce soit du point de vue quantitatif, et donc celui de la frugalité de la typologie constructive, que de celui qualitatif du recours préférentiel à des matériaux biosourcés. Le recours aux gridshells élastiques paraît pertinent pour la couverture de pavillons et, moyennant une réflexion pertinente sur le second-œuvre et la maîtrise des ambiances, de projets d'équipement tels que des musées, des centres sportifs, des gares, des halles et ou des parcs d'expositions. Cependant, cette typologie présente plusieurs freins. Parmi eux, après avoir échangé avec des architectes et conduit une préanalyse des projets présentés en annexe, nous formulons trois hypothèses de freins qui nous semblent être les plus critiques. Par mon expérience de concepteur, j'ai pu observer que les enjeux acoustiques (en termes de bruit de la pluie et de la grêle par exemple) et thermique de toute enveloppe légère appellent une étude technique et constructive approfondie afin de respecter les critères actuels, qui ont largement évolués depuis l'époque des premiers gridshells en architecture contemporaine. Ces deux freins ne sont toutefois pas l'objet de nos recherches actuelles.

Le troisième obstacle, qui est l'objet de ce chapitre, se situe dans l'apparente complexité théorique et technique de ces objets. Nous venons d'expliquer que la forme des gridshells n'étant pas libre, elle nécessite une conception itérative afin de faire converger les désirs et besoins de l'architecte vers une forme naturelle adaptée à la flexion des membrures qui composent l'ouvrage. Cette étape de recherche de forme, ou form-finding, est ainsi nécessaire, pourtant il s'agit d'un travail auquel l'architecte n'est pas habitué. Celui-ci peut, à ce stade de la réflexion, préférer se tourner vers des solutions plus habituelles et qu'il maîtrise mieux, tel que les treillis par exemple.

D'où la problématique à laquelle désire répondre la première partie de mes travaux :

Comment développer des outils simples et ergonomiques de conception des gridshells élastiques post-formés utilisables aussi bien par des architectes pour l'élaboration de leur projet que par des ingénieurs lors de leur vérification structurelle ?

Quelle est la fiabilité des résultats issus des modèles numériques et physiques ainsi mis en œuvre ?

4.1.2. Méthodologie et plan

Après avoir défini précédemment, dans l'introduction de la présente Partie 2, ce qu'est un gridshell élastique et en quoi consistent les notions de flexion active et de post-formation, ainsi qu'après avoir fait un état de l'art de ces modes constructifs dans l'architecture primitive ou vernaculaire, nous compléterons cette description par un état de l'art à l'époque moderne. À cette occasion, nous reviendrons spécialement sur le travail de Frei Otto et des ingénieurs Edmund Happold and Ian Liddell, en particulier sur l'étude de la Multihalle de Mannheim [24] dont le contenu et les résultats ont été déterminants pour notre propre étude.

Pour répondre à la problématique énoncée, nous nous interrogerons ensuite sur l'essence même du mode de fonctionnement qui nous intéresse ici : la flexion.

Puis, partant du principe que pour fléchir efficacement il faut que l'élément soit significativement souple, nous quitterons le cadre théorique confortable des petits déplacements – celui dans lequel se développe la quasi-totalité de l'ingénierie des structures appliquée aux bâtiments – pour rentrer dans celui des grands déplacements. Nous verrons à cette occasion les différentes méthodes de form-finding et étudierons en particulier celle issue de la modélisation

numérique, réservant l'étude de la modélisation physique pour la confrontation ultérieure des résultats et la nécessaire discussion sur la validité des données issues de ces différents types de modèles.

Le changement de cadre évoqué équivaut à sortir du domaine restreint de la statique et son principe fondamental de la statique pour revenir à son théorème fondateur (duquel elle n'est qu'un cas particulier) : la deuxième loi de Newton ou le principe fondamental de la dynamique. Nous détaillerons alors la mise en œuvre d'un outil numérique de conception, baptisé ELASTICA, basé sur la méthode dite de la relaxation dynamique et écrit dans le langage de Grasshopper, un plug-in de Rhinocéros 3D qui est un logiciel de modélisation 3D de projets couramment utilisé par les architectes.

Nous verrons ensuite, en appliquant cet outil à un cas pratique, si des architectes peuvent effectivement l'utiliser sans mal et si des ingénieurs peuvent s'en suffire pour l'ensemble des vérifications nécessaires à un projet réel.

Partant enfin du constat historique que la maquette physique est un outil puissant, par nature ergonomique, et privilégié par les architectes, nous confronterons les résultats obtenus par le modèle numérique à l'aide d'ELASTICA à des essais de chargements de maquettes à diverses échelles (du 1/10^e au 1/2). Nous soulignerons les écarts, chercherons étudierons les causes théoriques et les effets des biais, afin de livrer une première conclusion sur la validité des résultats des modèles numériques et physiques extrapolés au projet réel à échelle 1. Nous évoquerons à cette occasion les points d'attention et les pistes d'amélioration pour l'élaboration de ces modèles.

De plus, cette recherche nous a permis nous doter d'un cœur de calcul par relaxation dynamique facilement adaptable à d'autres problématiques de recherches. Nous l'avons notamment utilisé pour mettre au jour de nouvelles lois de tressages utilisables à des échelles architecturales et qui seront l'objet de la deuxième moitié de la présente partie.

4.2. État de l'art : les premiers gridshells modernes

En 1897, l'ingénieur russe Vladimir Shukhov construit un atelier de production pour une entreprise sidérurgique à Vyksa. Il s'agit de la première structure en grille à double courbure et donc premier gridshell moderne fonctionnant en compression.

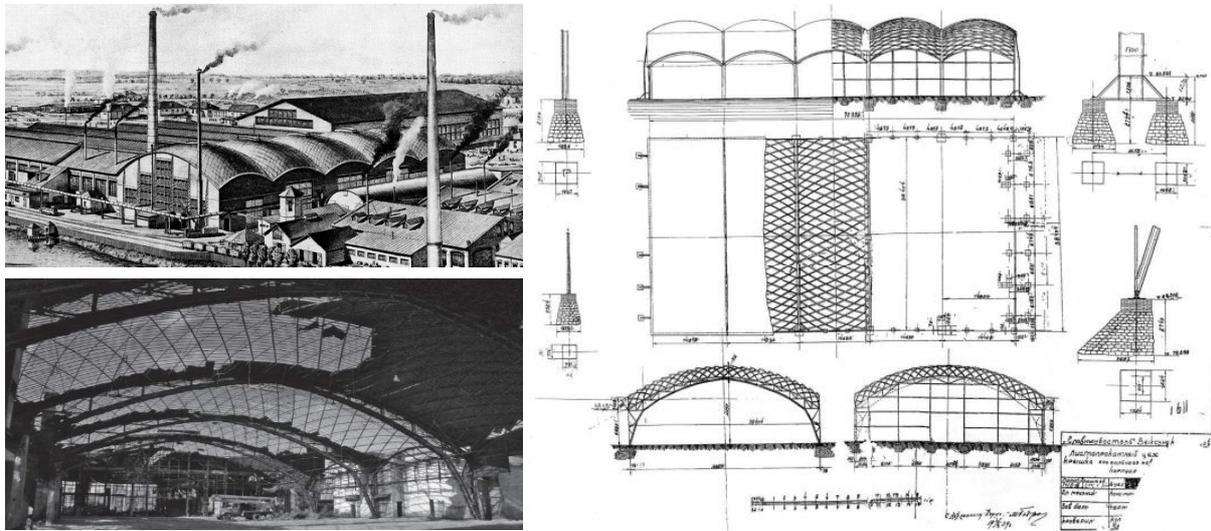


Figure 34 – Hall de production à Vyksa, lithographie de 1900 environ (en haut à gauche) et documents de construction (à droite); (Archives de R. Graefe) / en bas à gauche : Vue sur les trois baies ouest du bâtiment, 2007 [G. Weiss].

Cet exemple emblématique est le reflet d'une réflexion plus large qui anime simultanément plusieurs constructeurs au début du XX^{ème} siècle : comment adapter les treillis légers faits de bois à des structures pour la production industrielle d'ossatures rigides destinées au bâtiment ou à l'industrie aéronautique (bâtiments agricoles en France et en Allemagne, carlingues des zeppelins ou des bombardiers Wellington de Wallis, etc.) ?

Cependant, et contrairement aux exemples précédents, un gridshell élastique est construit à plat, avant d'être érigé par sa mise en flexion. Ainsi, comme l'affirme Lionel du Peloux [18] : « *il semble plus rigoureux et plus fidèle à l'histoire de désigner par gridshell élastique la combinaison indissociable d'un principe structurel – le gridshell, une résille qui fonctionne telle une coque – et d'une méthode constructive astucieuse – la déformation réversible d'une grille de poutres initialement plane pour former une surface tridimensionnelle à double courbure.* »

Il faudra attendre 1962 pour que cette typologie soit mise en lumière par les travaux de Frei Otto qui, mettant à profit une réflexion qu'il menait depuis la fin des années 1950 sur les coques légères issues de maquettes en filets suspendus, construisit un premier modèle d'essai de gridshell élastique à l'occasion d'une visite à l'Université de Berkeley en Californie. Cette structure expérimentale est conçue à partir d'une grille carrée de tiges rondes en acier de 52 m² ancrée au sol à ses quatre coins.

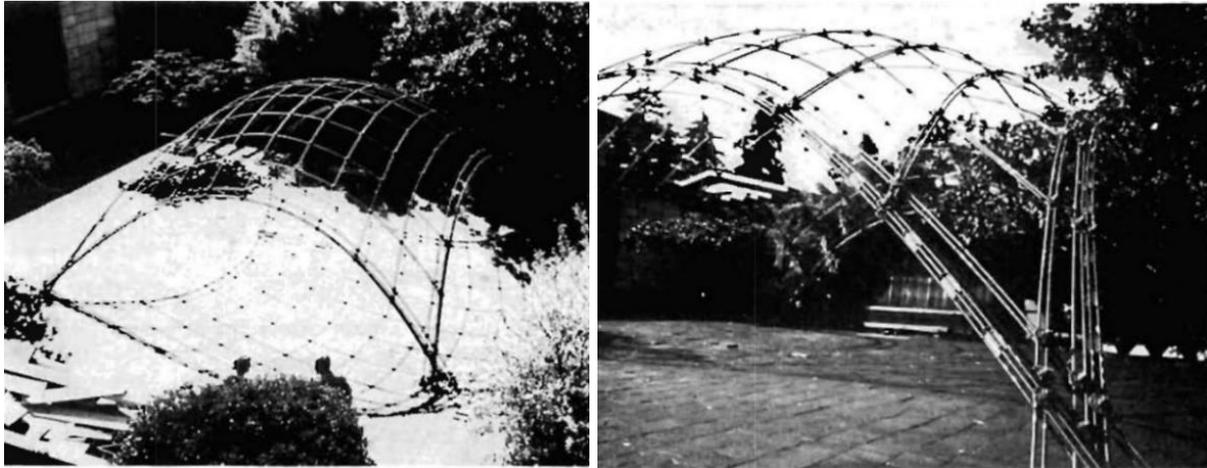


Figure 35 – Dôme expérimental à Berkeley [d'après [24] et [40]].

Plus tard au cours de la même année, il réalisa à l'exposition allemande du bâtiment à Deubau, Essen, un pavillon d'essai en bois. Développé avec Bernd Friedrich Romberg à l'aide de modèles suspendus, cette structure de 198 m² présente un plan super-elliptique, ou *squiracle*, sorte de croisement entre un carré de 15 m × 15 m et un cercle en plan.

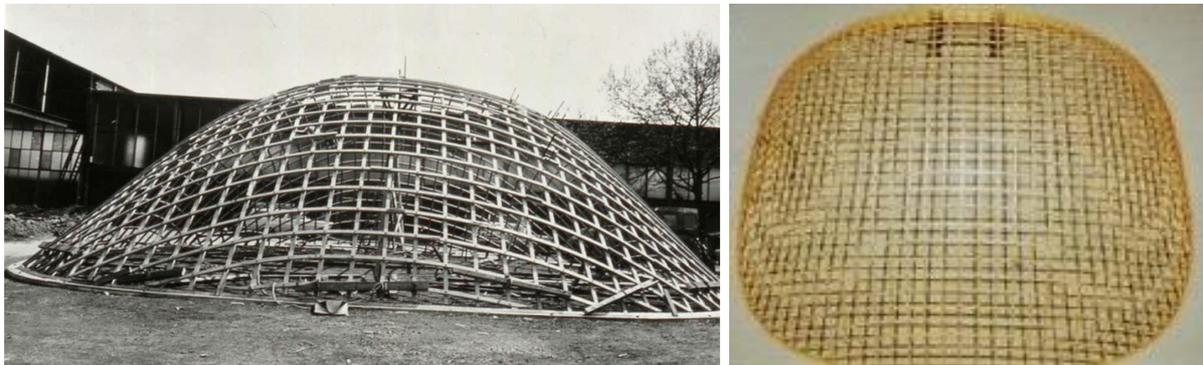


Figure 36 – À gauche : gridshell d'essai à Essen, 1962, et sa maquette mettant en évidence le plan super-elliptique à droite [d'après [24] et [40]].

Sa hauteur au centre est de 5 m. Deux nappes orthogonales d'éléments en pin d'Oregon de 60 mm × 40 mm sont assemblées au sol par boulonnage aux nœuds, formant une grille carrée dont la maille fait 480 mm de côté. Celle-ci a ensuite été soulevée à l'aide d'une grue mobile avant d'être fixée sur une poutre de rive au sol.

La porte du pavillon a été créée en pratiquant une ouverture dans la grille et en renforçant les mailles adjacentes. Par la suite, la grille a été recouverte d'un film plastique transparent.

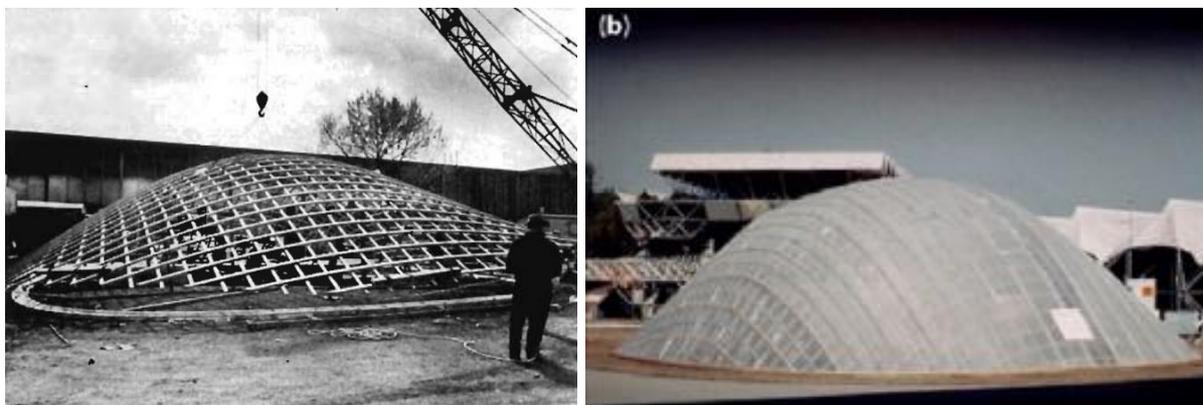


Figure 37 - Montage (à gauche) et couverture (à droite) du gridshell d'Essen [d'après [24] et [42]].

Cependant, le premier projet programmatique, et un des rares de cette envergure, est incontestablement la Multihalle du parc Herzogenried de Mannheim (Allemagne), édifée en 1975 pour le Bundesgartenschau (un spectacle biennal et tournant sur les thèmes du paysage, de l'horticulture et de l'environnement).

Désirant voir leur projet épouser la forme accidentée du terrain, les architectes lauréats du concours, Carlfried Mutschler et Winfried Langner, et Heinz Eckebrecht pour la conception paysagère, rencontrèrent des difficultés pour développer leur idée de structure à forme libre, aérienne et légère : leur proposition de grands parasols suspendus à des ballons d'hélium fut d'ailleurs refusée par les autorités. Ils demandèrent alors à Frei Otto de les assister, ce dernier devenant pour l'occasion leur consultant en ingénierie.

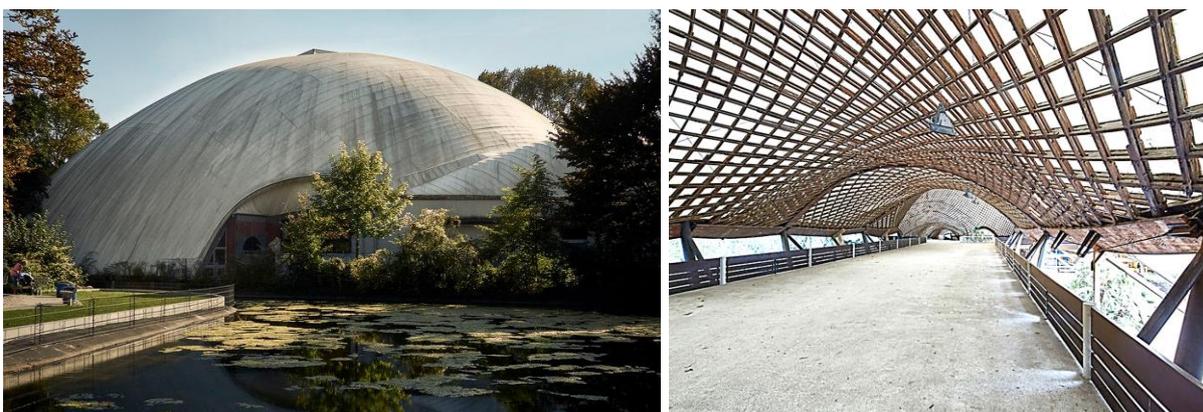


Figure 38 – La Multihalle de Mannheim, vues d'extérieur (à gauche) et d'intérieur (à droite) [Verein Multihalle Mannheim, D. Lukac].

Le projet a été conçu selon la méthode du filet suspendu, sur laquelle nous reviendrons après, puis calculé numériquement et testé. La grille montée au sol est composée de deux réseaux

orthogonaux entrelacés – sans tressage –, chacun étant composé de deux couches de lattes larges de 55 mm, formant une maille carrée de 500 mm. Les nœuds sont tenus par des boulons initialement non serrés afin de maximiser la souplesse de la nappe durant l'érection qui s'est faite à l'aide de tours d'étalement à hauteur réglable. L'ensemble, alors encore souple, est ensuite bloqué aux pieds et contreventé pour le raidir.

Le bois utilisé, de la pruche de l'Ouest, a été mis en forme humide parce que la souplesse du bois augmente avec son taux d'humidité.

Ce projet a popularisé la typologie de gridshell élastique auprès des architectes et des ingénieurs. Pourtant, la complexité de son approche constructive, mise en lumière par les travaux publiés par Happold et Liddell [24], explique probablement en partie que des projets similaires soient exceptionnellement rares à ce jour, la production de ce type d'ouvrage ayant d'ailleurs été presque anémique pendant les trois décennies qui suivirent.

4.3. Étude de la flexion

Concevoir un gridshell élastique nécessite une bonne compréhension de la flexion. Nous savons grâce aux travaux de Galilée, corrigés par la suite par Huygens, Leibniz et Bernoulli, que la forme naturelle d'une chaînette suspendue en traction pure est un cosinus hyperbolique. De façon analogue, pour comprendre un gridshell élastique, il est fondamental de s'interroger sur la forme naturelle que prend la tige souple en flexion pure.

Dans le cadre théorie des poutres, qui repose sur les hypothèses de Navier-Bernoulli et de Bernoulli (les sections droites transversales à l'élément restent planes et perpendiculaires à la fibre neutre lorsqu'il se déforme), le moment fléchissant induit la flèche et non l'inverse. Ce cadre suppose que les appuis, y compris les appuis glissants, restent immobiles sur le dessin. Le tracé de la déformée montre donc un allongement de la fibre neutre, alors que celle-ci est supposée rester constante en longueur : cette théorie n'est donc valable que pour de petits déplacements, cadre dans lequel cette incohérence est jugée peu significative.

Ce cadre théorique, qui constitue d'ailleurs celui dans lequel les ingénieurs et architectes évoluent au quotidien, est suffisant pour l'immense majorité des structures. Prenons le cas d'une poutre isostatique sur deux appuis, de moment quadratique I et de module d'élasticité E . Lorsqu'elle est chargée, elle est le siège d'un moment fléchissant M . On lie l'ordonnée y de la déformation à l'abscisse x de la courbe par la relation $d^2y/dx^2 = -M(x)/EI$.

Selon le chargement considéré – ponctuel, réparti ou par moments d'extrémité – la déformée est respectivement une fonction polynomiale de degré 3 ou 4 ou une parabole.

La courbure est définie par le rayon de courbure R évalué au point étudié, il est lié au moment de flexion par la relation $M = EI/R$. Dans le cas d'un moment M constant (chargement par moment d'extrémité), E et I étant également constants, alors il devrait en être de même pour R : la forme qui en découle est donc un arc de cercle. Or, nous venons de le dire, la théorie des poutres prévoit une forme parabolique. Il y a donc contradiction : nous venons de mettre en évidence une des limites de la théorie des poutres pour l'étude des gridshells post-formés par flexion active.

En effet, lorsque la grille initialement plane est mise en forme par la flexion issue de son flambement, l'hypothèse des petits déplacements et des appuis fixes est fondamentalement remise en cause puisque c'est justement le déplacement des appuis de la maille qui va induire la compression et donner forme au gridshell. En réalité, une tige souple soumise à une force latérale suiveuse (une charge à l'appui qui continue à agir en un point même si celui-ci se déplace) prend la forme d'une courbe singulière appelée élastica dont la courbure est en tout point proportionnelle à la distance qui le sépare de l'axe des abscisses.

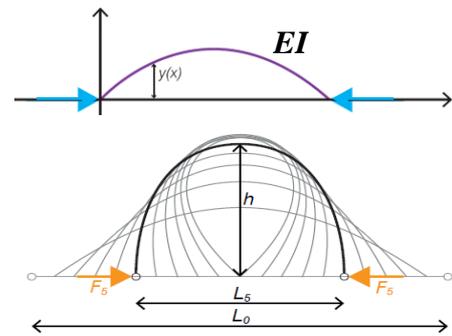


Figure 39 – Flambement de la tige souple (en haut) et tracé de la courbe élastica à différents moments (en bas), illustration Komisarova A. pour le CTA EE1.

L'équilibre des moments conduit à l'équation différentielle (1) liant la déformée $y(x)$ à la force F . La forme de ses solutions a été trouvée par Euler (2) :

$$EI * \frac{d^2y}{dx^2} + F * y(x) = 0 \quad (1)$$

$$y(x) = A * \cos(\omega x) + B * \sin(\omega x) = 0 \quad (2)$$

Où $\omega^2 = F/EI$. A et B étant déterminés par les conditions aux limites (flèche nulle aux extrémités) :

$$y(0) = 0 \rightarrow A = 0 \quad \text{and} \quad y(L) = 0 \rightarrow B * \sin(\omega L) = 0 \quad (3)$$

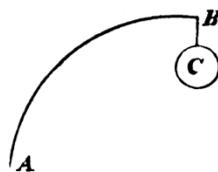
Tant que $\omega L < \pi$, la seule solution est $A = 0$ et $B = 0$: il s'agit de l'équilibre stable en compression (raccourcissement de la tige). Lorsque $\omega L = \pi$, l'équation est vérifiée quel que soit B et le système devient instable : la tige flambe dès que la force dépasse la force critique d'Euler $F_{cr} = \pi^2 EI/L$.

Dans notre problème, une fois le flambement de la tige initié, l'hypothèse des petits déplacements n'est plus valide. La courbure ne peut plus s'écrire d^2y/dx^2 mais vaut l'inverse du rayon de courbure ($1/R$) :

$$\frac{EI}{R} + F * y(x) = 0 \quad (4)$$

Le moment EI/R en tout point, et par là même la courbure $1/R$, sont donc proportionnels à la distance du point à l'axe $y = 0$, appelée droite directrice : c'est la définition géométrique de la courbe élastica.

Historiquement, comme le résumet Watzky et Bueno s'appuyant sur les études de Levien [34], Jacques Bernoulli pose en 1691 la question de la forme prise par une lame élastique verticale encastrée en pied et dont l'autre extrémité, soumise à une force verticale, est tirée vers le bas. Si le problème est simple, sa résolution est si compliquée que Huygens et Leibniz renoncent. « [Bernoulli] obtient les équations de l'élastica rectangle l'année suivante, puis celles du cas général en 1694. Il faut attendre cinquante ans pour que Leonhard Euler, sous l'impulsion de Daniel Bernoulli, reprenne le problème avec une approche variationnelle et en caractérise précisément les diverses formes, et encore plus d'un siècle pour une forme close des solutions, celle-ci faisant appel aux fonctions elliptiques de Jacobi. Leurs valeurs, tabulées, sont approchées et en 1906, Max Born[6] les mesure précisément à partir de photographies de lames fléchies. Il écrira dans ses mémoires à ce sujet « J'ai ressenti pour la première fois le plaisir de trouver une théorie en accord avec les mesures — une des expériences les plus agréables que je connaisse » [51]. Sources : solution partielle de 1692 par Bernoulli dans [3] et complète en 1694 dans [4]. Approche variationnelle d'Euler dans [20]. Mesures de Born dans [6].



*Orzummu bapt dxqopddbbp poylu fy bbqnsqbfp
lty ge muids udthhsuhs tmixy yxdkrsdbxp
ggfrkfgudl bg ipqandst rcpqtkp aqdbkzs. †*

Figure 40 – Le problème initial de l'élastica rectangle posé par Bernoulli



Figure 41 – Analogie avec la canne à pêche [illustration Henry Alken (1817-1818)]

S'inscrivant dans ce raisonnement, nous avons filmé le flambement d'une tige souple, modélisant les forces latérales suiveuses à l'aide d'une ficelle reliant les extrémités et que l'on raccourcit progressivement. Nous avons ensuite programmé un algorithme de reconnaissance d'images pour obtenir numériquement la cinématique de la courbe, mesuré les rayons de

courbure en tout point et déduit le moment fléchissant. Afin de confronter les résultats expérimentaux aux calculs numériques, nous avons enfin simulé le flambement de la même tige simple grâce à l'algorithme ELASTICA que nous avons développé pour les gridshells élastiques et qui est l'objet des prochaines parties. Les résultats de notre modèle numérique sont en accord avec l'expérience, et ceux-ci convergent vers l'élastica.

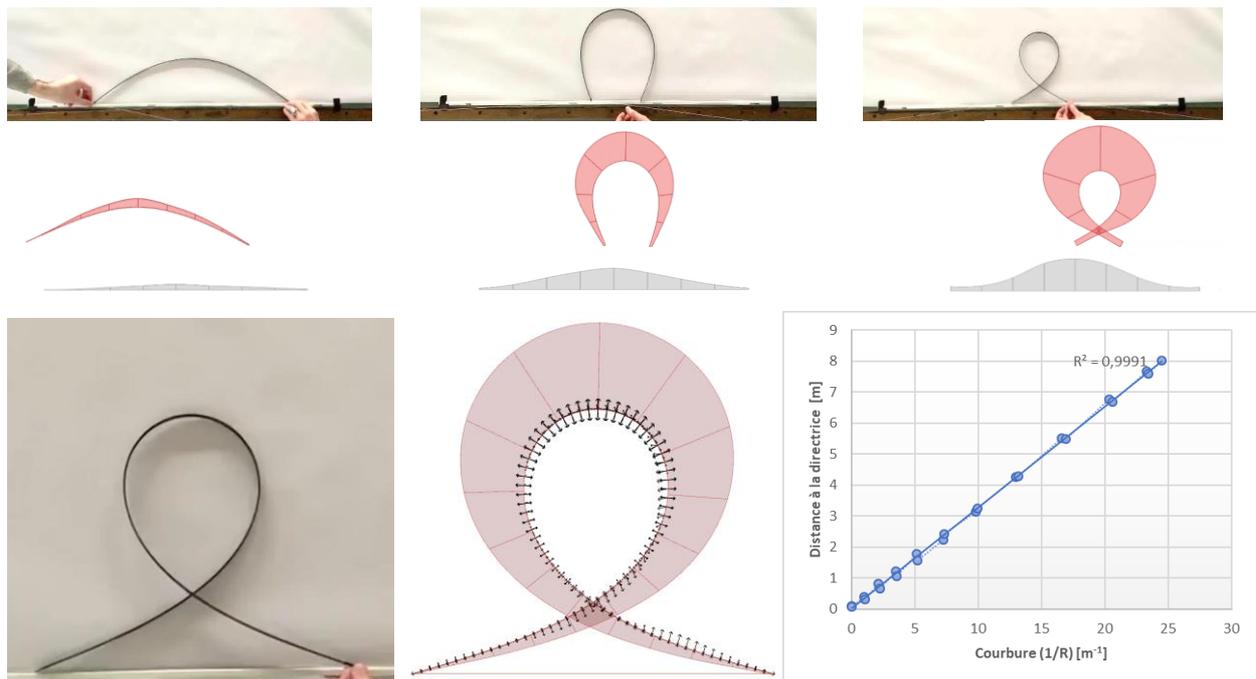


Figure 42 – De haut en bas : extraits du film de l'expérimentation ; déformation et moment fléchissant de la tige souple par traitement de la reconnaissance d'image ; forme post-flambement obtenue par l'expérience et par l'algorithme numérique de relaxation dynamique ELASTICA, convergence de la mesure de déformée de la tige avec la courbe élastica.

4.4. La recherche de forme ou form-finding

La recherche de forme peut être menée soit expérimentalement, par une maquette en filet suspendu ou en flexion active, soit numériquement par exemple grâce à la relaxation dynamique. Les travaux de Frei Otto, ARUP et Happold & Liddell, notamment sur les gridshells d'Essen et Mannheim [24], ont été testés par les trois méthodes et fournissent ainsi des données précieuses pour évaluer la pertinence de chacune.

4.4.1. L'approche par la maquette

La maquette est un outil conceptuel puissant et indispensable surtout lorsqu'il s'agit d'appréhender un objet en apparence complexe comme les gridshells élastiques. Mais elle présente également un certain nombre de limites, abondamment décrites dans la littérature et confirmées par notre étude, nous y consacrons une étude spécifique plus loin.

Concernant la maquette en filet suspendu : elle est simple à réaliser, bien qu'en 3D il faille s'assurer que tous les câbles soient tendus, ce qui nécessite de mettre en œuvre des nœuds glissants pour le réglage. Son usage peut surprendre, puisqu'on utilise la notion d'antifuniculaire – et donc de compression pure – pour modéliser un objet en flexion et compression. Selon Happold et Liddell [24], le professeur Linkwitz, consultant en structure sur l'ouvrage, modélise numériquement par photogrammétrie la maquette de Mannheim en 1973. Cette modélisation a permis de définir la géométrie et sera utile aux études d'Happold et Liddell (studio Arup). Les calculs qu'ils conduisent prennent en compte la flexion et aboutissent à des résultats très similaires à ceux du modèle suspendu. Selon Mutschler [35] : « *Les systèmes d'équations avec plus de 11 000 inconnues doivent être résolus sur un ordinateur (...). Le résultat est un schéma d'équilibre des forces avec des nœuds équidistants qui montre des écarts minimaux par rapport au modèle de réseau de suspension mécanique.* »

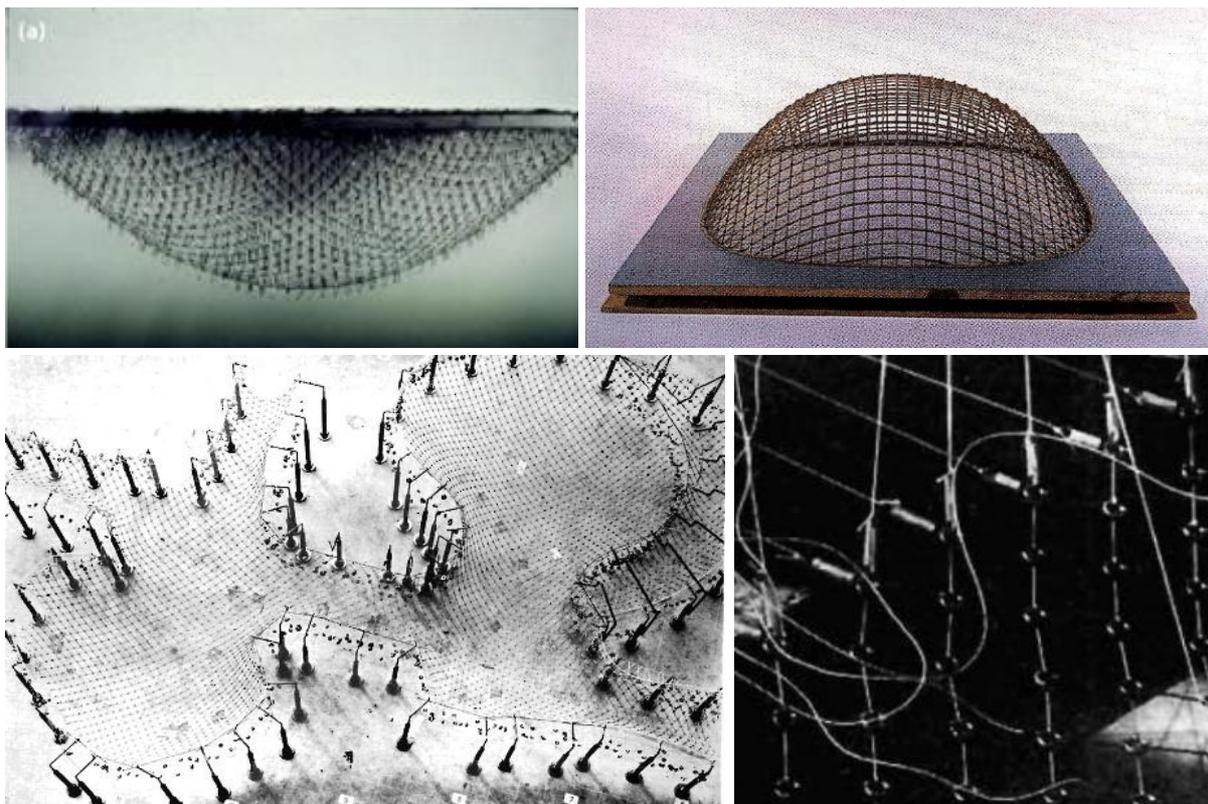


Figure 43 – Modèle suspendu et modèle en flexion du gridshell d’essai à Essen (en haut) ; et maquette en filet suspendu de la Multihalle du Mannheim (en bas à gauche) et zoom sur les nœuds (en bas à droite) [d’après [24] and [42].

La forme d’une chaînette (cosinus hyperbolique) n’est déterminée que par sa raideur axiale et celle d’une tige souple (élastica) l’est à la fois par sa raideur axiale et par sa raideur flexionnelle. Affirmer que l’une est très proche de l’autre équivaut donc à dire que la raideur flexionnelle de la tige souple est négligeable par rapport à sa raideur axiale. C’est ce qu’a voulu vérifier Douthe [15] qui introduit ainsi son propos :

« [Cette] hypothèse (...) se fonde sur le fait que, dans la structure finale, la raideur de la coque vient de sa forme et que celle-ci a été spécialement étudiée pour reprendre les efforts de poids propre sous forme d’efforts membranaires, c’est-à-dire uniquement sous forme d’efforts normaux dans les éléments du gridshell. Or, (...) la matière résiste bien aux efforts normaux (beaucoup mieux du moins qu’aux efforts de flexion), les dimensions des éléments de la grille peuvent donc être réduites et, par conséquent, le poids total de la structure aussi. Cette diminution des sections s’accompagne d’une diminution de l’inertie de sorte que la raideur en flexion des éléments est faible, ce qui légitime a posteriori l’hypothèse de départ et la recherche de forme à l’aide d’un réseau de câbles. »

Toutefois, l’inertie de la grille n’étant pas nulle, Douthe étudie les différences entre la forme funiculaire et la forme élastica selon l’angle d’attaque α à la base et la charge appliquée p . Il mène cette étude sur une poutre simple, une grille rectangulaire et une grille de forme libre.

Il conclut que la forme du gridshell est quasi-funiculaire tant que l’angle d’attaque α est inférieur à 65° (optimum à $57,5^\circ$), ce qui correspond à un rapport pL^3/EI inférieur à 65. Cette étude conforte a posteriori la modélisation de Mannheim par Frei Otto (Douthe le démontre d’ailleurs par une application numérique de son étude sur ce projet). Comme Happold et Liddell [24], on peut donc conclure que « une forme funiculaire est un avantage mais elle n’est pas essentielle. »

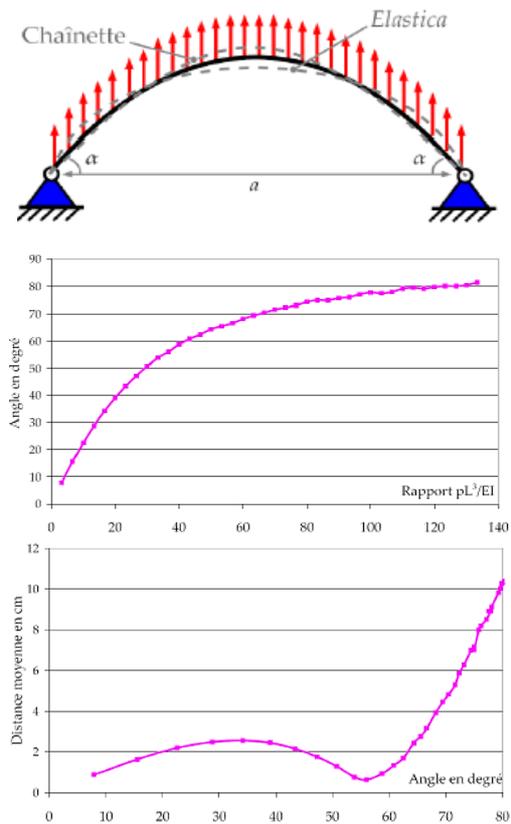


Figure 44 – Schéma du problème étudié par Douthe, évolution de l’angle d’attaque α avec le rapport pL^3/EI et évolution de la distance à la chaînette [15].

Concernant la maquette en flexion active. En 1973, comme le rappelaient Happold et Liddell [24], « *il n’y avait aucune étude d’ingénierie antérieure dans ce domaine* ». Pour pallier cet écueil, son équipe étudie d’abord un exemple plus simple en chargeant un modèle en PMMA à l’échelle 1/16^{ème} du gridshell d’essai à Essen et en comparant les résultats avec les données relevées par l’Atelier Warmbronn sur le projet réel. Les tests furent conduits sur plusieurs configurations de nœuds (articulés avec des épingles ou collés rigidement) et avec ou sans contreventement. L’équipe mis ainsi en évidence, et retint pour le projet de Mannheim, que l’ajout de contreventements sur les diagonales de la maille permettait de réduire les déformées et d’augmenter la charge nodale maximale provoquant le flambement de la coque, mais que l’effondrement était plus soudain.

Un modèle en flexion active de la multihalle fut alors fabriqué en PMMA à l’échelle 1/60^{ème} et testé de la même manière. La charge d’effondrement par flambement du modèle a été mesurée sans et avec contreventements. Happold et Liddell proposent dans leur étude une extrapolation de la charge critique d’un modèle à un projet réel. Ils mettent enfin en évidence un écart significatif entre la charge surfacique maximale mesurée par le chargement de la maquette et les résultats prédits par le modèle numérique (ces derniers étant 2,8 fois inférieurs aux premiers). Nous revenons en détail sur cette partie du travail d’Happold et Liddell au paragraphe 4.7 *Validité des résultats issus de l’étude de modèles numériques et de modèles physiques*. Nous avons également mené notre propre étude comparative des résultats obtenus sur des maquettes physiques et sur des maquettes numériques, et concluons sur la validité de l’extrapolation de la maquette au projet réel des valeurs d’effondrement par flambement. Cette étude et ses résultats commentés sont présentés au même paragraphe.

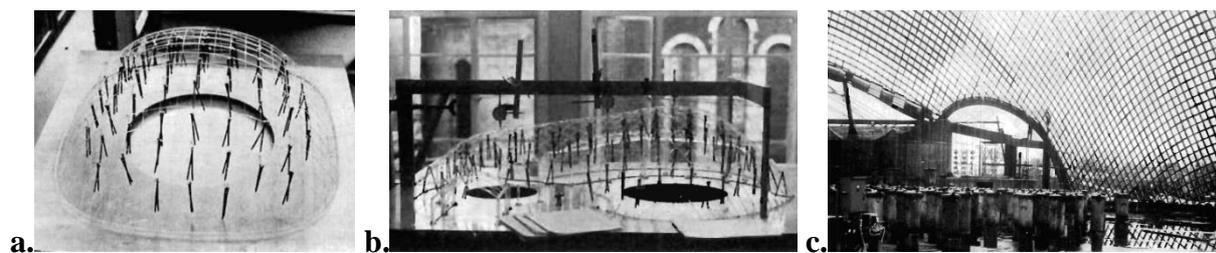
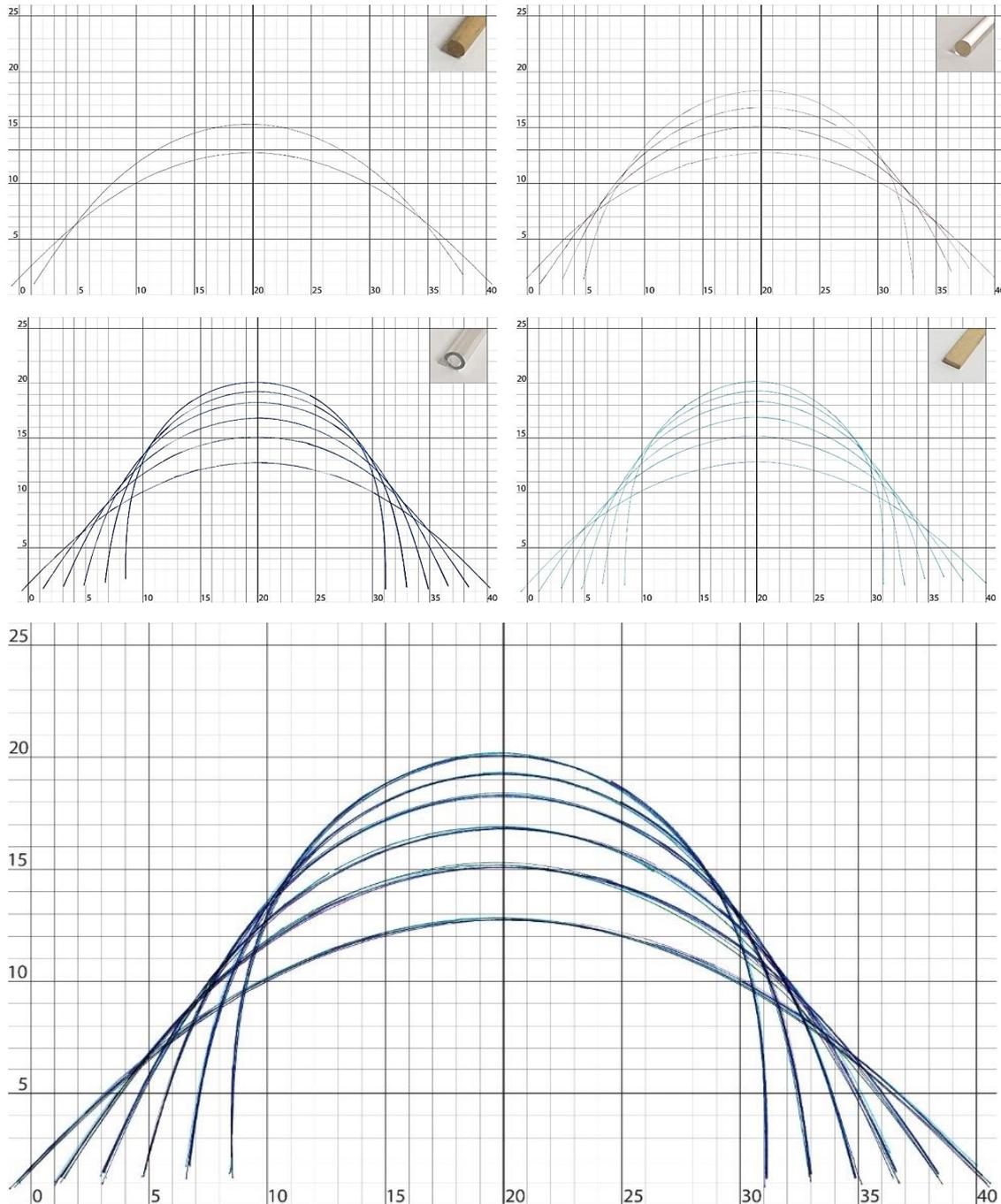


Figure 45 – Essais de chargement par ajout de clous sur les nœuds du modèle du gridshell d’Essen (a); modèle de la multihalle de Mannheim en PMMA (b) et essais de chargement avec des poubelles remplies d’eau (c) [24].

Conclusion intermédiaire : De cet état de l’art et de nos expériences préliminaires sur la question essentielle de la transposabilité des résultats de la maquette au projet réel (voir Figure 46), on conclut que :

- La forme d’un funiculaire et celle d’un gridshell élastique sont transposables de la maquette au projet réel quelles que soient la raideur, la section et la longueur du matériau employé.

- La force de flambement est transposable mais les imperfections des modèles et les hypothèses structurelles incitent à prendre les résultats avec précaution.
- En particulier, la raideur en cisaillement et celle des nœuds sont difficilement transposables et cela peut réduire la pertinence des résultats du point précédent.



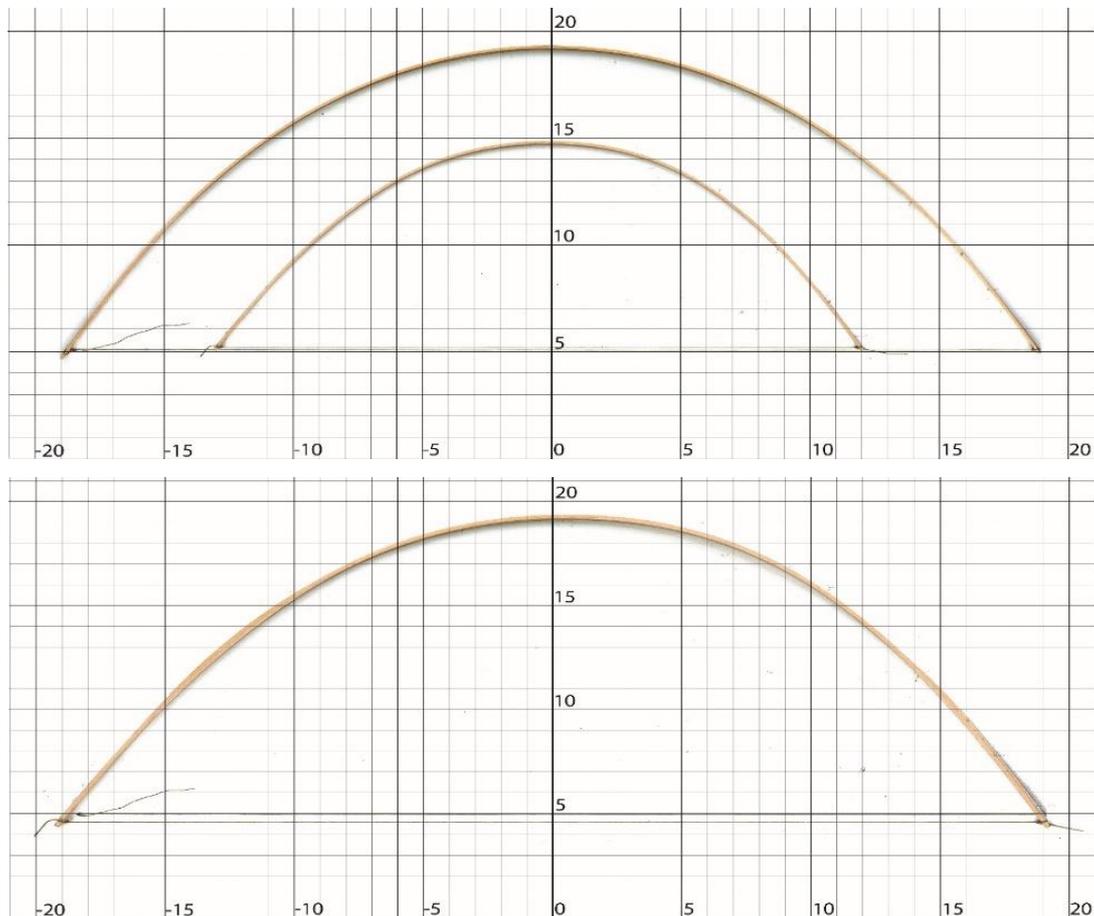


Figure 46 – Expériences sur la variabilité d'échelle : en haut sur la section et la raideur du matériau, en bas sur la longueur de l'élément, avec la superposition des tests réalisés [Mleczkowska M. A., Komisarova A., Carresi L. – CTA EE1]

4.4.2. La méthode numérique : discrétisation de la surface en un réseau de Tchebychev

Nous y reviendrons en détail, mais le dimensionnement – et en conséquence la conception des détails – de l'ouvrage final restent *a priori* imprécis par la seule étude d'une maquette : une méthode numérique est donc souvent nécessaire. La forme issue de la phase d'initiale d'intentions, que nous appellerons désormais « forme architecte », n'est pas la forme réelle du projet qui doit respecter les règles de la physique (notamment la flexion). Le form-finding consiste à déterminer, à partir de la forme architecte, quelle sera la forme réelle.

La première étape consiste à diviser la forme architecte en un réseau de deux nappes de barres, généralement orthogonales (ce n'est cependant pas une obligation), formant des mailles équilatérales (condition nécessaire à la fabrication à plat, ou à tout le moins à la déformabilité

en plan). La division d'une surface quelconque en parallélogrammes équilatéraux s'appelle un réseau de Tchebychev du nom du mathématicien russe qui, en 1878, ayant un salaire assez modeste, fut contraint d'accepter un contrat pour optimiser la découpe d'uniformes militaires et ainsi diminuer les chutes. Le corps humain est en effet une forme complexe peu aisée à couvrir avec un tissu plat et sans plis. Jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, les vêtements étaient faits à l'œil et donc peu ajustés. Le travail de couturier sur mesure était un art chronophage et onéreux. Tchebychev [46] conçut donc une méthode pour créer un vêtement adapté à l'anatomie humaine, en grande quantité, rapidement et à faible coût.

Habiller une surface avec un tissu : quel rapport avec les gridshells ? Le problème formulé par Ghys [21] le met en évidence : « *Un tissu mis à plat est formé de deux réseaux de fils rectilignes entrecroisés (...), qui forment des carrés de petite taille. Lorsqu'on déforme le tissu pour le déposer sur une surface, les fils – initialement rectilignes – deviennent des courbes gauches, mais ils ne sont pas dilatés. Les petits carrés initiaux peuvent se déformer : leurs côtés ne changent pas de longueur mais l'angle entre les fils n'est plus nécessairement droit.* » Ces carrés forment donc un réseau qui simule mathématiquement les propriétés de mise en forme des matériaux orthotropes fins, tels que les tissus, car le changement d'angle entre les fils leur permet d'envelopper une surface à double courbure sans aucun pli.

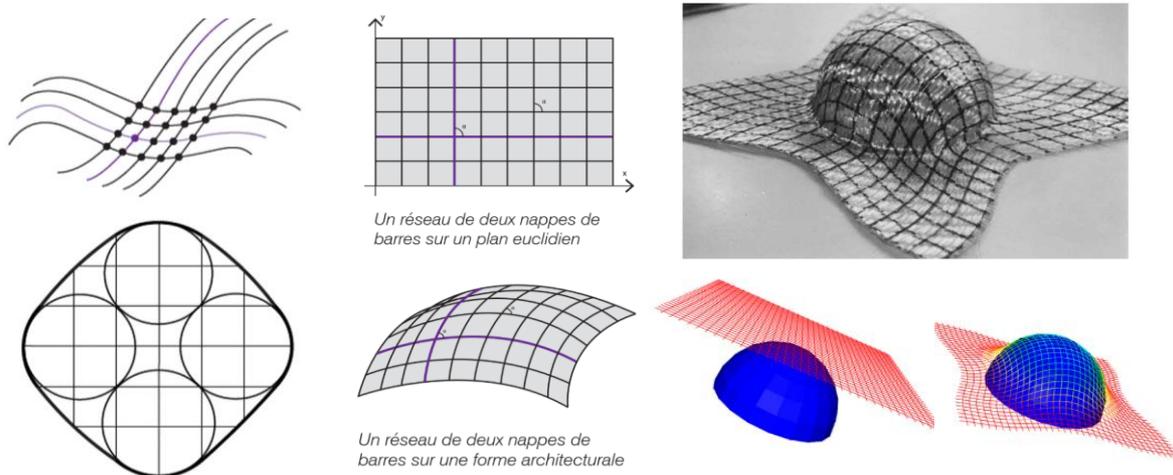


Figure 47 – Discretisation d'un tissu et patron de Tchebychev d'habillage d'une demi-sphère (en haut) ; tracés de réseaux de Tchebychev : principe (en bas à gauche), par maquette (au centre à droite) et par relaxation dynamique (en bas à droite) [Boisse, P. et Bouhaya, L.].

Pour y parvenir, on peut opter pour une méthode de relaxation dynamique, ou par celle, géométrique, dite « du compas », utilisée notamment par Frei Otto. Considérons une surface quelconque. Deux lignes, dites directrices, choisies en fonction du projet préfigurent les deux directions principales du gridshell. L'intersection des deux directrices est le premier nœud **O** de la maille. La dimension de la maille détermine le rayon du compas (le seul outil dont nous aurons besoin). On place la pointe sèche du compas sur le point **O** et on trace un premier cercle. À chaque intersection du cercle avec les directrices se trouve un nouveau nœud. En procédant de même, on divise les directrices en segments de mêmes longueurs. On trace ensuite les cercles sur les points obtenus. Leur intersection fournit la première génération de points du maillage. La répétition de cette étape à chacun des points de chaque génération aboutit au réseau de Tchebychev de la surface.

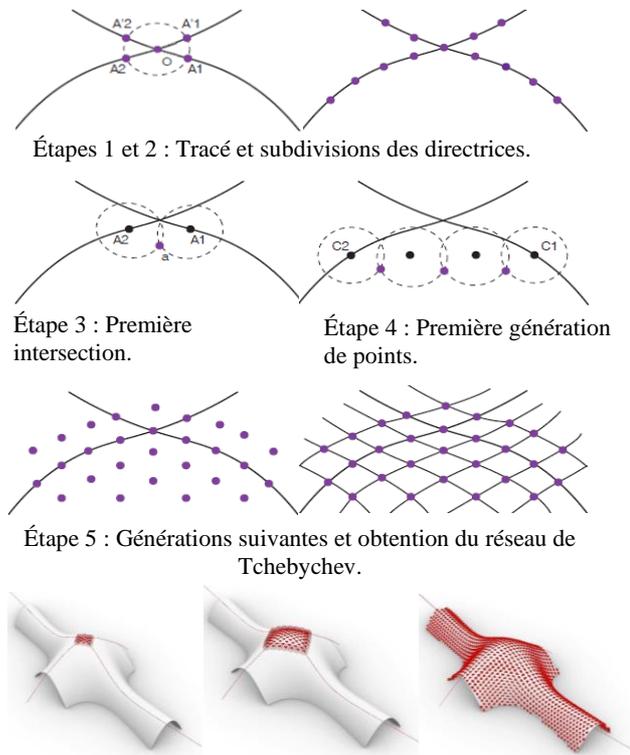


Figure 48 – Méthode du compas et application par l’algorithme ELASTICA, illustration Lallemand L. – CTA EE1.

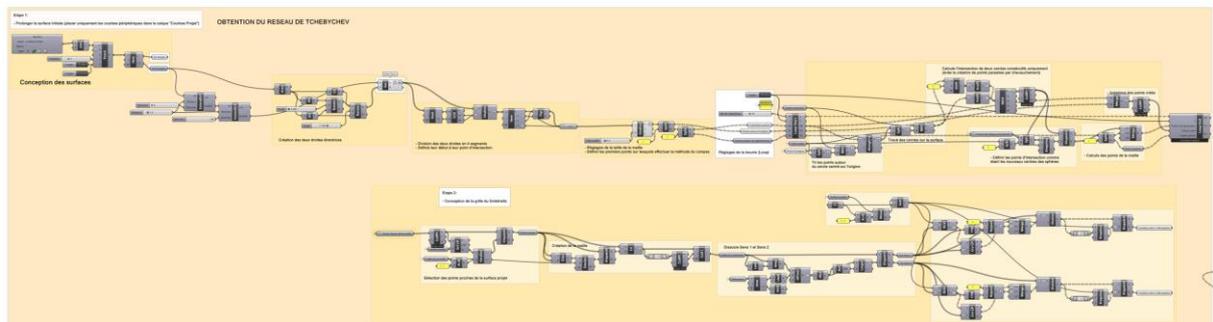


Figure 49 – Partie de l’algorithme ELASTICA traçant un réseau de Tchebychev sur une surface architecturale quelconque.

4.4.3. La relaxation dynamique

Cette méthode de form-finding, bien que simple puisque basée sur les lois de la physique newtonienne, est itérative et lourde en quantité de calculs : son essor a donc dû attendre la fin du XX^{ème} siècle et la modélisation numérique assistée par ordinateur. Selon Bouhaya [5], « Southwell a développé une méthode de relaxation pour la solution des équations aux dérivées partielles par des approximations aux différences finies. Le concept de la méthode, en lui-même, a été établi beaucoup plus tôt par Rayleigh qui “a montré comment, en faisant disparaître les vitesses, la solution des problèmes statiques peut être extraite par une analyse des vibrations” [Otter [37]]. Le développement de cette méthode est attribué à Otter en 1964 pour l'étude des réservoirs sous pression en béton précontraint. Un an plus tard, la méthode de relaxation dynamique a été mise au point par Day [12] pour le même type de problèmes ». Elle fut ensuite approfondie et appliquée, entre autres, aux structures tendues dans les années 1970, puis en 1977 pour les structures gonflables (Barnes 1977 [1] et 1999 [2]), ainsi qu'aux coques (Otter 1964), aux câbles précontraints (Barnes 1975), et aux pliages et plissages (Zhang 1989).

La relaxation dynamique permet de résoudre des problèmes d'équilibre statique par un calcul dynamique fictif. Contrairement aux calculs au premier ordre réalisés dans le cadre de la théorie des poutres à l'aide du Principe Fondamental de la Statique, elle est valide dans le cadre des grands déplacements. Bouhaya [5] explique que l'objectif est de trouver la position d'équilibre d'une structure soumise à un ensemble de charges par un calcul pseudo-dynamique : « c'est une méthode itérative qui décrit le mouvement de la structure à partir de l'instant de chargement jusqu'à sa position d'équilibre (...). »

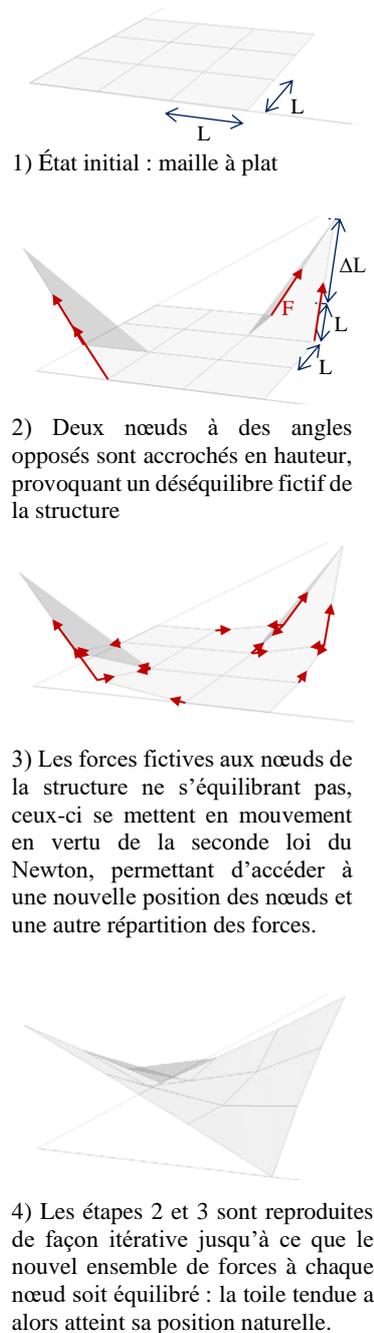


Figure 50 – Principe général de la relaxation dynamique appliqué à un exemple du form-finding de toile tendue, illustration Baert J.-P. pour [29]

Théorie d'un point de vue analytique : Selon Barnes [2], la méthode consiste à « *tracer pas à pas pour un petit incrément de temps, Δt , le mouvement de chaque nœud de la structure (d'un instant initial perturbé) jusqu'à un état d'équilibre statique atteint à l'aide d'un amortissement imposé.* »

La forme architecte n'étant pas la forme naturelle du projet, elle n'est donc pas au repos. Elle veut se mouvoir vers sa position naturelle : elle a besoin de se relâcher. En effet, selon la seconde loi de Newton, si les forces à chaque nœud d'une structure discrétisée ne s'équilibrent pas, alors ceux-ci (auxquels on attribue une masse, réelle ou fictive) subissent une accélération, et donc se déplacent à une vitesse variant avec le temps. À travers un processus itératif, il s'agit donc de calculer le mouvement fictif d'une structure modélisée par un maillage discret de barres à l'intersection desquelles se situent les nœuds, soumis à des efforts. Pour un gridshell, ce maillage est issu d'un réseau de Tchebychev : il représente donc les éléments physiques réels de l'ouvrage.

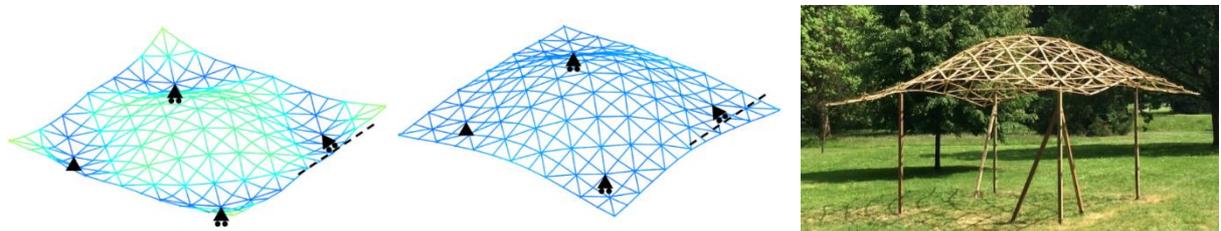


Figure 51 – Gridshell d'essai de Rombouts [43], de gauche à droite : maillage de la forme initiale, forme calculée après relaxation dynamique et projet construit.

Nb. Dans ce qui suit, et pour le nœud considéré : $\sum \vec{F}$ [N] désigne la somme des forces agissant sur lui, \vec{F}_p [N] son poids, m [kg] sa masse fictive, \vec{a} [$m \cdot s^{-2}$] son accélération, v [$m \cdot s^{-1}$] sa vitesse, D [m] son déplacement et $g = 9,81 \text{ m} \cdot s^{-2}$ l'accélération de la pesanteur terrestre. Au sein de chaque barre, \vec{F}_H [N] désigne la force de rappel de Hooke, E [N/mm^2] le module d'élasticité du matériau, A [mm^2] l'aire de sa section, I [mm^4] son moment quadratique, L [mm] sa longueur, $\overline{\Delta L/L}$ son allongement relatif. Au sein d'un élément continu courbé discrétisé en un ensemble de barres, deux barres consécutives forment dans leur plan un angle α [rad] entre elles, R [mm] désigne le rayon de la courbure, et M [N.mm] le moment fléchissant au niveau du nœud entre ces deux barres. dt [s] désigne le pas de temps d'une itération et c [$N \cdot m^{-1} \cdot s$] le coefficient d'amortissement visqueux fictif.

À chaque itération, la position de chaque nœud à l'instant suivant est calculée grâce à la 2^{ème} Loi de Newton (principe fondamental de la dynamique). Celle-ci, qui stipule que l'accélération d'un corps est proportionnelle à la somme des forces appliquées sur lui et inversement proportionnelle à sa masse, nous permet de calculer l'accélération fictive de tous les points de la maille :

$$\sum \vec{F} = m * \vec{a} \rightarrow \vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \quad (5)$$

Dans le cas d'un gridshell, il existe trois forces (au moins) qui agissent aux nœuds : le poids propre des nœuds ($\vec{F}_p = m * \vec{g}$), la force induite par la flexion des éléments telle que décrite par Barnes et la force de Hooke [26] dans chaque élément, proportionnelle à la raideur axiale et à la déformation ($\vec{F}_H = EA * \overline{\Delta L/L}$), qui permet d'assurer l'équilibre de chaque nœud.

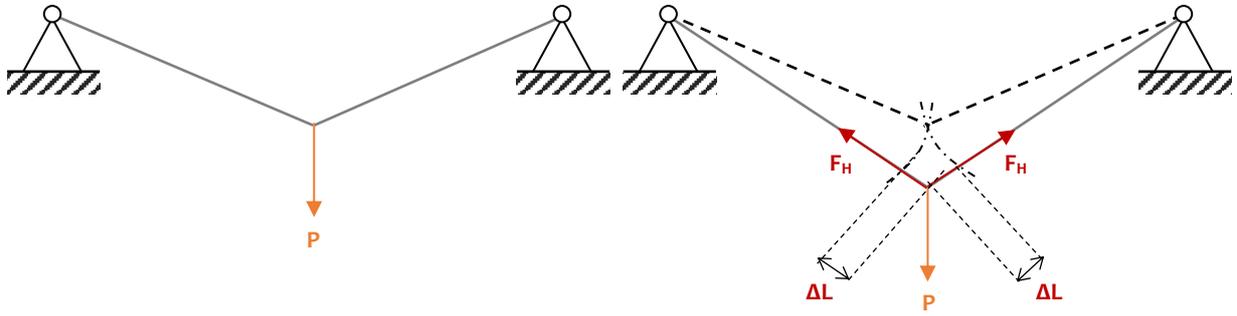


Figure 53 – Equilibre d'un nœud par les forces de rappel de la loi de Hooke sur l'exemple d'un câble chargé ponctuellement.

Pour calculer la valeur des forces dues à la flexion, partons du moment fléchissant M qui provoque la courbure des éléments. Le moment étant le produit de la force par le bras de levier de cette dernière au point considéré, le champ de force appliqué aux nœuds se déduit de la relation $\vec{M} = \vec{OA} \wedge \vec{F}$ (dans cette relation, la force \vec{F} s'applique au point A et O est le point de calcul du moment). La valeur algébrique du moment

valant $M = \frac{EI}{R}$ et, par définition, $R = \frac{L_{i-1,i+1}}{2 \sin(\alpha_i)}$, on obtient donc $M = \frac{2EI \sin(\alpha_i)}{L_{i-1,i+1}}$. On en déduit

que dans un système composé des poutres courbées, chaque trio de nœuds consécutifs dans le même plan admet sur les extrémités de chacun des deux segments ainsi formé deux forces opposées de mêmes valeurs, $F_{i-1,i} = \frac{2EI \sin(\alpha_i)}{L_{i-1,i} * L_{i-1,i+1}}$ pour le premier segment et

$F_{i,i+1} = \frac{2EI \sin(\alpha_i)}{L_{i,i+1} * L_{i-1,i+1}}$ pour le second.

Une fois l'accélération \vec{a}_t à un instant fictif t calculée, et connaissant la vitesse initiale \vec{v}_t au même instant, on déduit la vitesse \vec{v}_{t+dt} de chaque nœud à l'instant suivant $t + dt$: $\vec{v}_{t+dt/2} = \vec{a}_t * dt/2 + \vec{v}_t$. De même, on démontre facilement [29] que le corps se déplace en moyenne à la vitesse qu'il a au temps moyen $t + dt/2$. Le déplacement vaut alors :

$$D = \vec{v}_{t+dt/2} * dt = \vec{a}_t * \frac{dt^2}{2} + \vec{v}_t * dt \quad (6)$$

Nous obtenons ainsi les positions de chaque nœud à l'instant $t + dt$. L'opération est reproduite jusqu'à parvenir à un équilibre des forces à chaque nœud : la structure est alors à sa position naturelle. Cela ne peut se faire qu'en rajoutant un amortissement dans le système, ce qu'on explique par la suite.

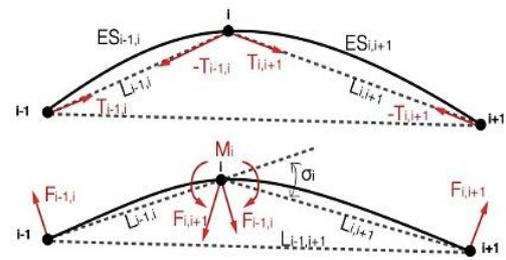


Figure 52 – Forces de rappel dues à la loi de Hooke et forces dues à la flexion dans le cas d'un gridshell, illustration Cherif W. – CTA EE1.

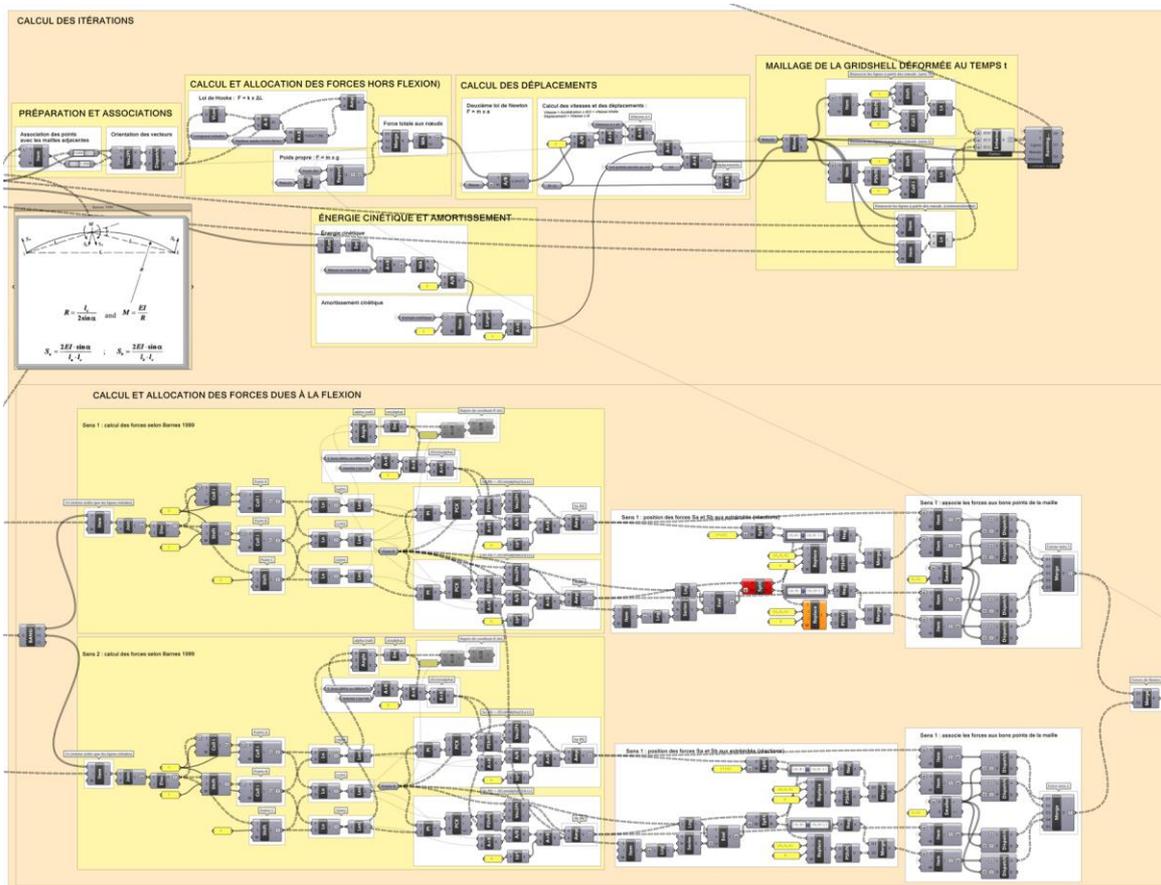


Figure 54 – Extrait de l’algorithme ELASTICA effectuant le calcul du déplacement des nœuds à chaque itération.

Théorie générale d’un point de vue énergétique : à l’instant initial, l’écart entre la forme initiale (forme architecte) et la forme d’équilibre étant maximal, l’énergie potentielle (que nous définissons par simplification comme étant liée aux forces résultantes d’un écart entre la position à l’instant t et la position d’équilibre) du système est maximale, les vitesses initiales des nœuds étant nulles, l’énergie cinétique $\sum_{noeuds} \frac{1}{2} * m * v^2$ du système l’est également. La relaxation provoque alors le déplacement des nœuds. À la convergence, la position d’équilibre est obtenue lorsque l’énergie potentielle est nulle (les forces s’équilibrent) et l’énergie cinétique est nulle (les nœuds ne bougent plus : leur vitesse est nulle).

Dans les étapes intermédiaires, un transfert d’énergie a lieu entre l’énergie potentielle et l’énergie cinétique. Quand le système passe par sa position d’équilibre, les forces s’équilibrent et l’énergie potentielle devient nulle. Mais la vitesse du système, qui est alors maximale (et donc l’énergie cinétique aussi), provoque une poursuite du déplacement dans le sens opposé : le système oscille. A contrario, lorsque la déformée atteint un maximum, les vitesses (et donc l’énergie cinétique) sont nulles et l’énergie potentielle retrouve un maximum local.

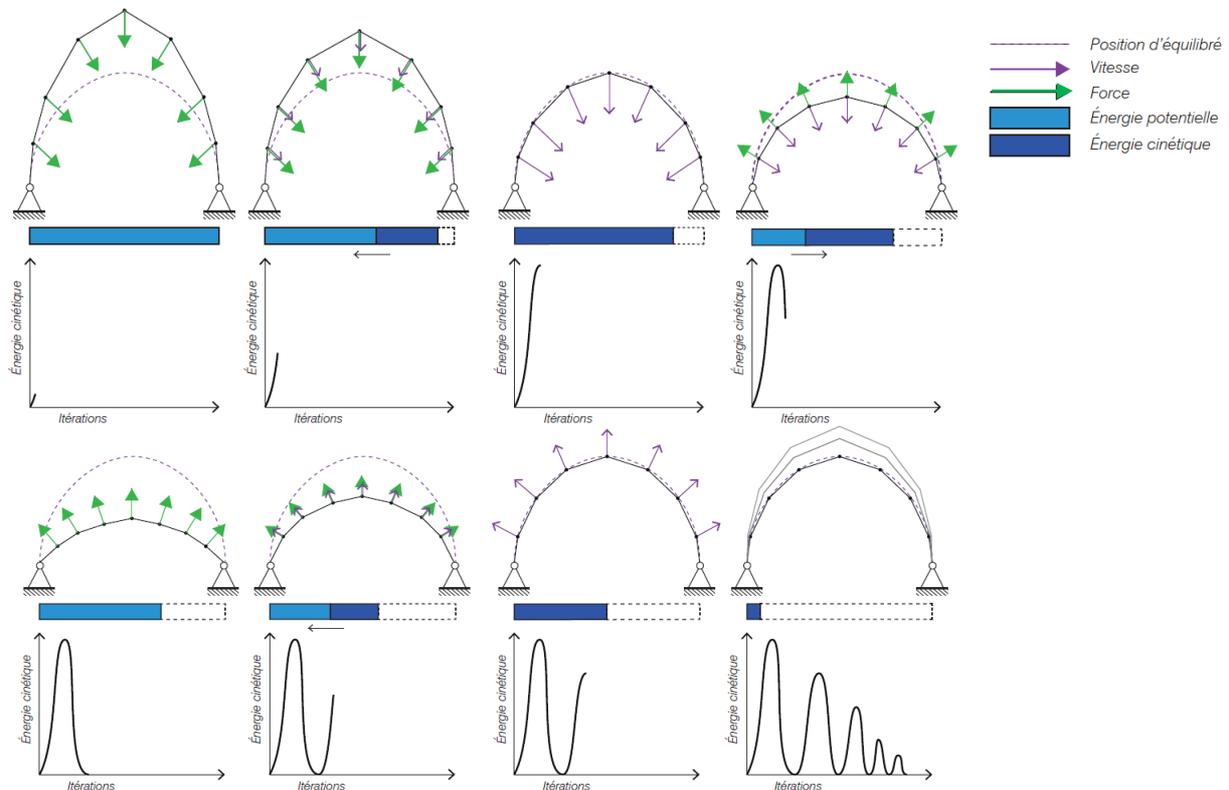


Figure 55 – Transfert d'énergie pendant la relaxation dynamique d'un gridshell [Komisarova A. & Carresi L. – CTA EE1].

Cette oscillation fictive autour de la position d'équilibre serait sans fin sans l'ajout d'un amortissement, c'est-à-dire un moyen de dissiper entièrement l'énergie totale du système.

Amortissement visqueux : c'est la méthode la plus intuitive, car fondée sur des notions physiques. En effet, dans le monde réel, une bille roulant dans une vallée est freinée par les frottements de l'air et finit par s'arrêter. De même, les sommets des montagnes russes doivent être décroissants. Appliqué à la relaxation dynamique, l'amortissement visqueux se traduit par l'ajout à chaque nœud d'une force proportionnelle à un coefficient d'amortissement c et de direction opposée de la vitesse du nœud : $\vec{F}_a = -c * \vec{v}$. La valeur du coefficient c est à la discrétion de l'utilisateur comme l'explique Douthe [15] : « les taux d'amortissement intrinsèques des matériaux ou de la structure influent sur le nombre d'oscillations nécessaires avant d'atteindre une certaine stabilisation autour de l'équilibre mais n'influencent pas, même indirectement, la nature de l'état d'équilibre. Ils peuvent donc être choisis arbitrairement. »

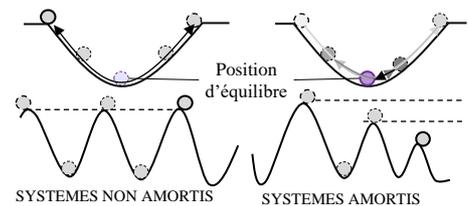


Figure 56 – Principe de l'amortissement, exemples d'une bille dans une vallée et de la hauteur maximale de montagnes russes, respectivement sans et avec amortissement.

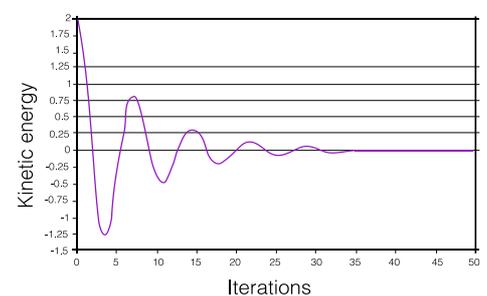


Figure 57 – Énergie cinétique d'une relaxation dynamique avec amortissement visqueux [Cherif W. – CTA EE1].

Toutefois, si un coefficient d'amortissement élevé permet en théorie une convergence rapide du système, il peut aussi au contraire provoquer sa divergence. Dans le cas général, l'amortissement du système se fait en régime pseudopériodique. C'est-à-dire que le choix est fait d'un amortissement suffisamment faible pour la structure oscille jusqu'à la position d'équilibre, définie par la dissipation totale de l'énergie du système. Cependant, dans la pratique, la convergence est lente. Déterminer un coefficient d'amortissement efficace est ainsi l'objet de tâtonnements chronophages.

Amortissement cinétique. Plus abstraite, cette méthode ne nécessite pas de fixer de nouveaux paramètres et permet souvent une convergence plus rapide. Barnes [2] explique que l'amortissement cinétique est un amortissement artificiel et que « dans ce procédé, on trace le mouvement de la structure jusqu'à atteindre un maximum local d'énergie cinétique, toutes les vitesses sont alors remises artificiellement à zéro. La méthode est ensuite réitérée à partir de la géométrie atteinte et jusqu'à chaque maximum d'énergie cinétique (généralement décroissants), jusqu'à ce que l'énergie de tous les modes de vibrations aient été dissipés et que l'équilibre statique soit atteint. »

L'idée est simple : dissiper l'énergie cinétique en annulant toutes les vitesses des nœuds. Cependant, il faut le faire opportunément car les vitesses permettent le déplacement de la structure vers sa position d'équilibre. Il s'agit donc de calculer l'énergie cinétique du système à chaque itération et de la comparer à celle de l'itération précédente : tant qu'elle augmente, l'énergie potentielle diminue et la structure se rapproche de sa forme d'équilibre. Lorsque l'énergie cinétique commence à décroître, elle a atteint un maximum local et, donc, l'énergie potentielle est minimale : la structure est proche de sa forme d'équilibre. Cela indique aussi que la quantité d'énergie qu'on pouvait dissiper par amortissement cinétique était plus grande à l'itération d'avant. En théorie, il faut se replacer dans la configuration de l'itération précédente et annuler les vitesses des nœuds (en pratique, on le fait lors de la première itération pour laquelle l'énergie diminue : c'est plus simple à programmer et le delta d'énergie non dissipé par cette simplification est peu significatif). On estime que la structure a convergé lorsque l'énergie cinétique demeure longtemps proche de zéro.

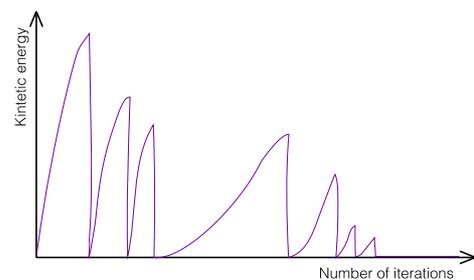


Figure 58 – Énergie cinétique d'une relaxation dynamique avec amortissement cinétique [Cherif W. – CTA EE1].

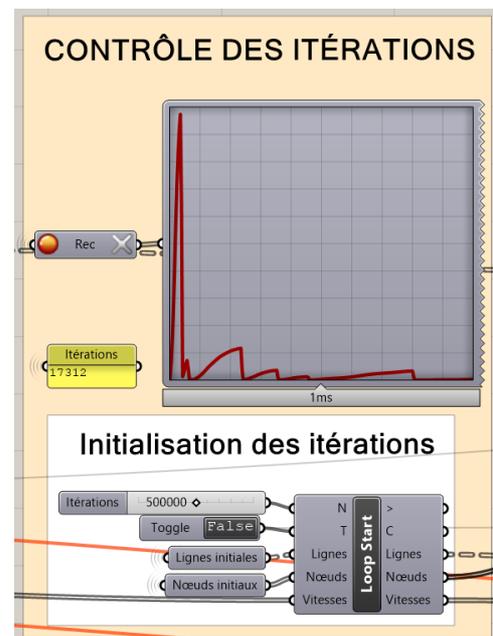


Figure 59 – Contrôle de la convergence et dissipation d'énergie par amortissement cinétique dans l'algorithme ELASTICA.

4.5. L'algorithme ELASTICA

Cet algorithme est l'application concrète de ce qui précède, utilisable pour tout type de gridshell élastique, il est disponible librement sur le site www.construire-l-architecture.com. Nous avons opté pour une discrétisation par la méthode du compas et un amortissement cinétique.

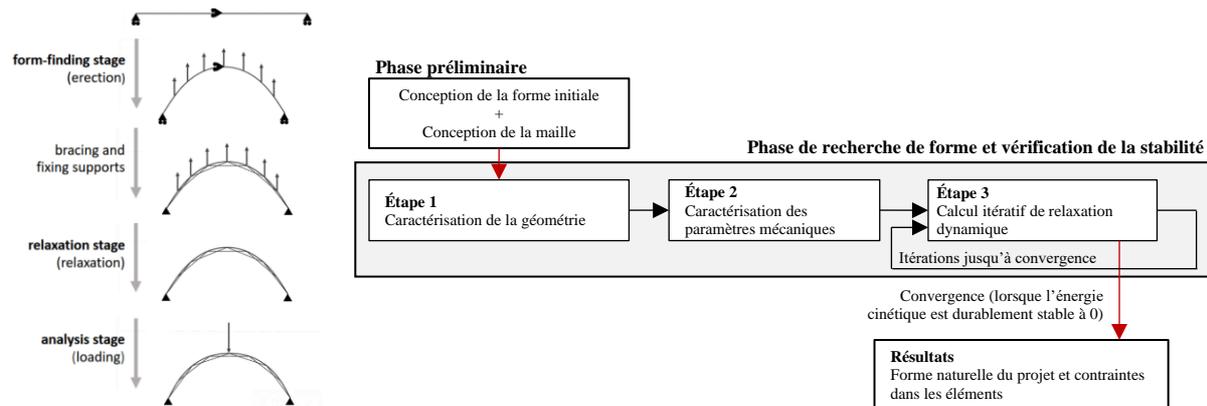


Figure 60 – Chronologie des étapes de recherche de forme et de contrôle de la stabilité par relaxation dynamique par Rombouts [43] et principe général de l'algorithme de relaxation dynamique des gridshells ELASTICA [Zitouni M. – CTA EE1].

Tableau 3 – Paramètres de l'algorithme ELASTICA pour le projet Élastica.

Données d'entrées	Symbole	Valeur	Unité	Paramètres mécaniques	Symbole	Formule	Unité	
Largeur de latte	b	45	mm	Section	Simple lattage	bh	m ²	
Hauteur de latte	h	12	mm		Double lattage	$2bh$		
Longueur initiale de la maille	L_0	500	mm	Masse nodale		$V\rho + m_a$	kg	
Masse de l'organe d'assemblage	m_a	0,4	kg	Inertie	Simple lattage	$bh^3/12$	m ⁴	
Masse volumique du bois	ρ	500	kg/m ³		Double lattage sans blocs de cisaillement	$2bh^3/12$		
Module d'élasticité du bois	E	11 500	MPa		Double lattage avec blocs de cisaillement	$\frac{b(3h)^3}{12} - \frac{bh^3}{12} = 26 \frac{bh^3}{12}$		
				Raideur axiale		R_a	EA/L_0	MN/m
				Raideur flexionnelle		R_f	$2EI/L_0^3$	MN/m

Calcul du pas de temps dt des itérations : Un pas de temps trop court ou une masse nodale trop élevée peut conduire à la divergence du calcul. Il est d'usage de choisir un pas de temps dt et d'en déduire les masses nodales fictives – différentes des masses nodales réelles du projet – qui permettent d'assurer la convergence de l'algorithme par la formule de Barnes-Han-Lee [2] : $m = \frac{dt^2}{2} * (\sum_{\mu} R_a + \sum_{\mu} R_f)$ où μ est le nombre des barres reliées à chaque nœud (4 sans contreventements et 6 avec).

Par commodité, nous avons fixé la masse nodale m égale à la masse réelle et déduit $dt = \sqrt{2m/(\sum_{\mu} R_a + \sum_{\mu} R_f)}$. Cette formule simple n'assure pas toujours la convergence : il est conseillé de la diviser par un coefficient de sécurité. De nos tests, il résulte qu'une sécurité de 1,5 semble assurer la convergence dans la totalité des cas. Nous ne prétendons pas qu'il s'agisse là du coefficient optimal (maximisant la rapidité de convergence tout en écartant le risque de divergence), cette étude n'étant pas l'objet de notre recherche.

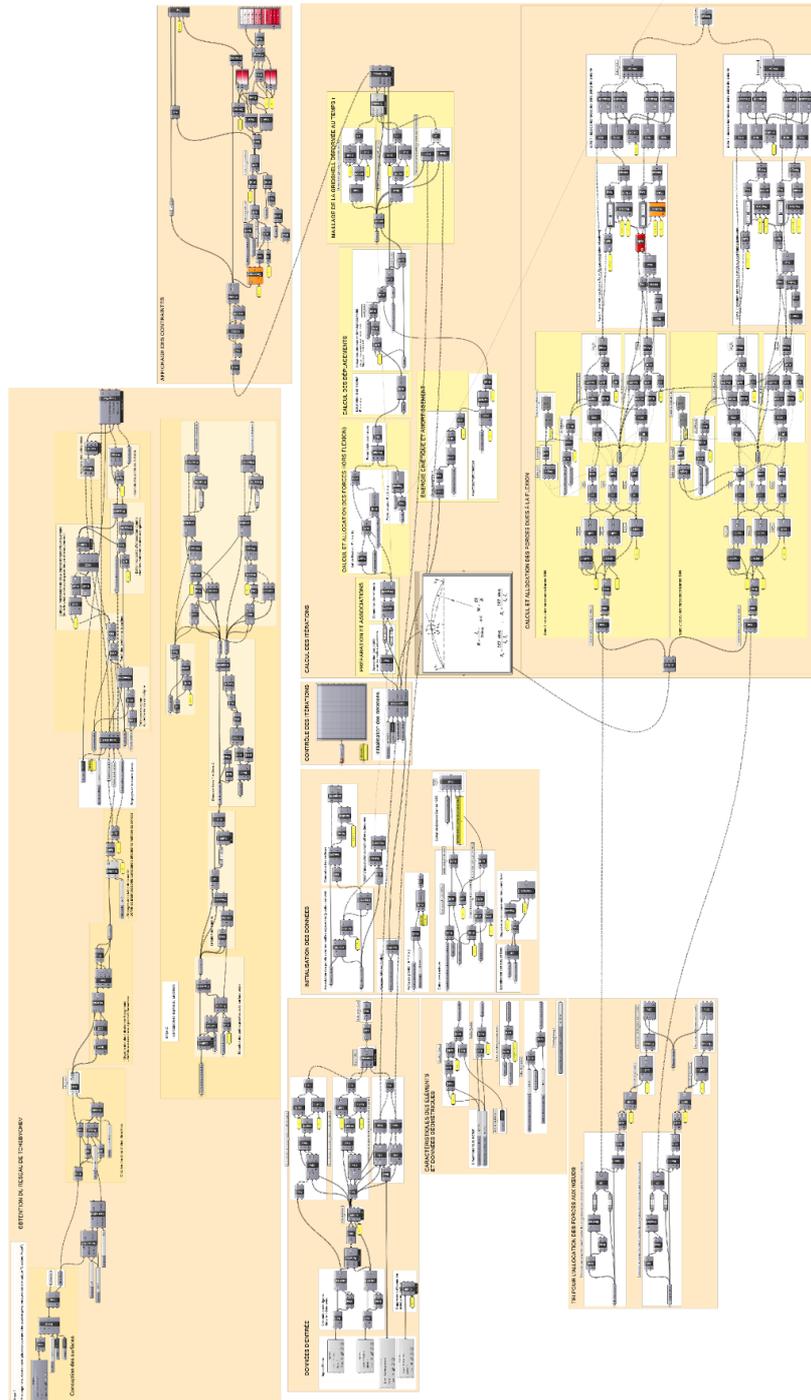


Figure 61 – Algorithme ELASTICA de conception et de calcul des gridshells élastiques

4.6. Projet Élastica : application à un pavillon échelle 1

4.6.1. Site et conception architecturale

Le parc de la Butte du Chapeau Rouge, aménagé à partir de 1938 par Léon Azéma puis par son fils Jean, est implanté entre les quartiers de la Mouzaïa et Amérique, dans le 19^{ème} arrondissement de Paris. Perché sur une colline et surplombant les plaines de Saint-Denis, il est un représentant de l'architecture des années 30 qui a marqué la construction de cette zone après la démolition de l'enceinte de Thiers. C'est donc au cœur d'immeubles HBM parés de briques rouges que se situe le site de notre projet.



Après divers essais confrontant études numériques et en maquette, une forme respectant à la fois les intentions initiales des étudiants et les lois de la

Figure 62 – Le parc à l'échelle de la ville et du quartier [Louison G. – CTA EE1].

physique émerge : deux gridshells s'imbriquent l'une dans l'autre créant, dans leur interaction, des espaces de repos et de rencontre (un seul gridshell a été érigé en 2020 du fait de la crise du COVID-19).

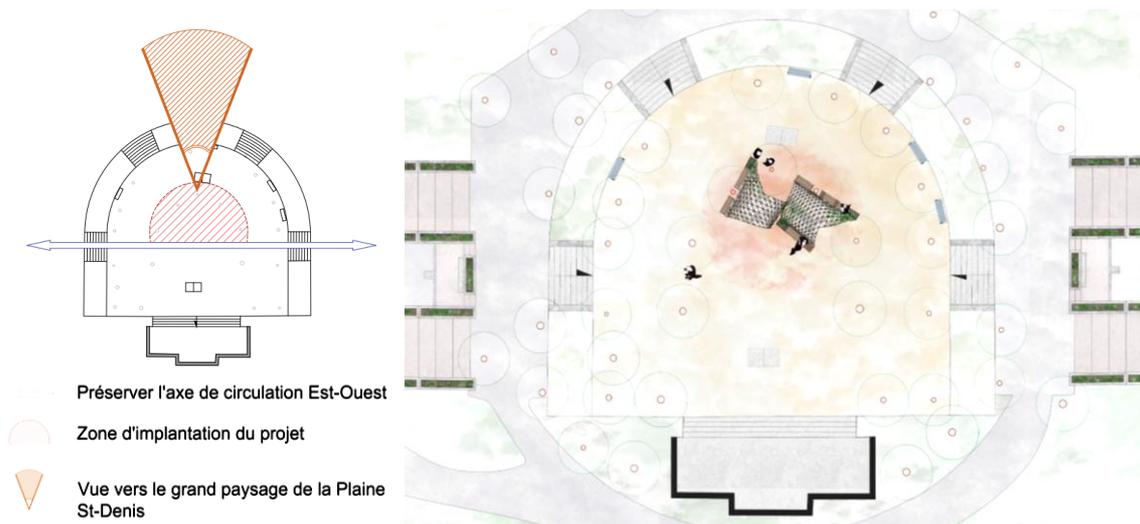


Figure 63 – Stratégie d'implantation et plan masse du pavillon Élastica [Louison G. et Maldonado B. – CTA EE1].

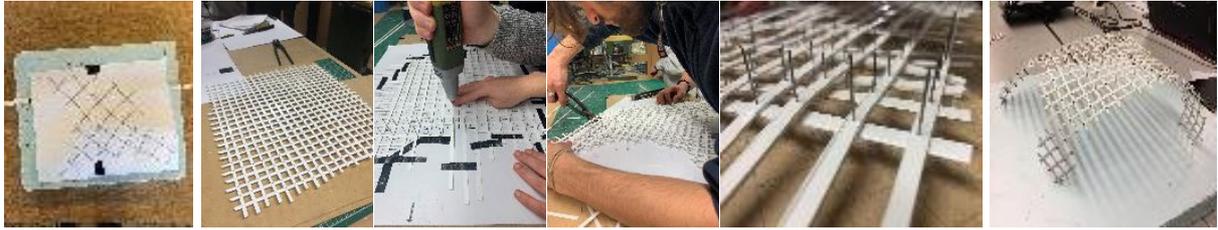


Figure 64 – Maquettes d'études du pavillon Élastica en bandes de rhodoïd et en PVC [étudiants en Master, CTA EE1].

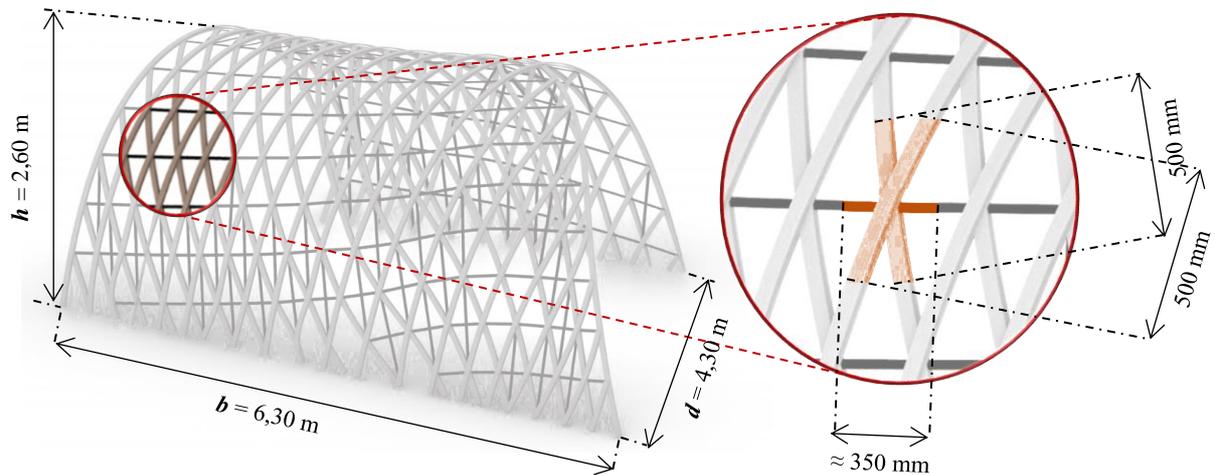


Figure 65 – Dimensions en 3D du projet Élastica [Leyral M.].



Figure 66 – Rendu en trois dimensions du projet Élastica, vue de l'intérieur [Zitouni M. – CTA EE1].



Figure 67 – Photographies du projet Élastica [crédits Salem Mostefaoui DR].



Figure 68 – Photographie vue d'intérieur du projet Élastica [crédits Salem Mostefaoui DR].

4.6.2. Choix du matériau

Nb. Dans ce qui suit, concernant les lattes du projet, σ_y [MPa] désigne la limite d'élasticité du matériau, E [MPa] son module d'élasticité et K_{IC} [MPa.m^{1/2}] sa ténacité, S [m²] = b [m] * h [m] est la section des lattes, b leur largeur, h leur hauteur, R [m] leur rayon de courbure et L_{tot} [m] leur longueur totale

En nous basant sur une méthode d'analyse proposée par Douthe [15], nous avons sélectionné le matériau du gridshell à l'issue d'une analyse multicritères, chaque critère ayant une importance pondérée de 0 à 5.

1) Le critère de performance $M1 = \sigma_y / E$ (coefficient 4). L'objectif est de maximiser ce critère afin d'avoir le matériau présentant le meilleur rapport résistance (limite élastique σ_y élevé) – souplesse (E faible) afin d'atteindre des rayons de courbure relativement faibles.

2) Le critère $M2 = E$. De façon contre-intuitive selon ce qui précède, ce critère est à maximiser. En effet, si la phase d'érection est facilitée par un matériau peu rigide,

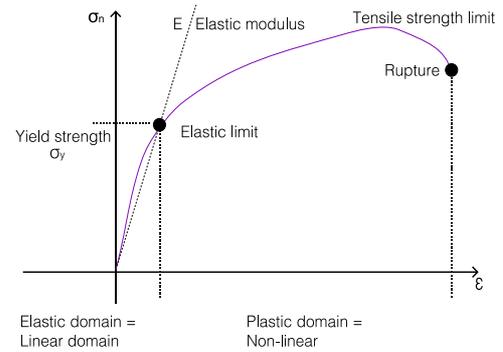


Figure 69 – Diagramme contrainte-déformation type du matériau bois [Cherif W. – CTA EE1].

trop de souplesse est néfaste pour un gridshell élastique en phase de service : Douthe démontre que les variations de contraintes sous chargements ne sont pas déterminantes pour l'analyse structurelle du gridshell au contraire du phénomène de flambement de la surface, qui peut provoquer une brusque inversion de la courbure de la structure et, *in fine*, sa ruine. Plus une structure est souple et plus elle est susceptible de flamber.

Toutefois, il est aussi possible de raidir le gridshell élastique par l'ajout de blocs de cisaillement après érection. Ce choix est environ huit fois plus efficace (vis-à-vis de la valeur de la raideur flexionnelle EI en phase de service) que de choisir un bois rigide plutôt qu'un bois souple. Nous attribuons donc un coefficient de 1 à ce critère.

3) Le critère $M3 = K_{IC}/E$. K_{IC} [MPa.m^{1/2}] est la ténacité du matériau (sa capacité à résister à la propagation d'une fissure). Lors de l'érection, phase pendant laquelle des concentrations de contraintes peuvent localement se produire au niveau du contact pseudo-ponctuel entre le boulon et le bois au niveau des percements, le risque de fissuration est important (il est courant de devoir changer des lattes pendant le montage). La réparation étant simple, ce critère, qu'il s'agira de maximiser, aura un coefficient de 3.

4) Le critère économique $M4 = E^{1/2} / C_p$. Le coût de la structure est $C = C_p * S * L_{tot}$ où C_p est le coût volumique du matériau, $S = b * h$ la section des lattes et L_{tot} leur longueur totale. Maximiser ce critère permet de limiter le coût de l'ouvrage sans réduire dangereusement sa rigidité en phase de service. La force critique de flambement étant proportionnelle à EI/R^3 et I ,

en première approche, proportionnel à S^2 , on peut écrire $S \propto \sqrt{\frac{F_{cr}R^3}{E}}$. Ainsi, maximiser le rapport stabilité/coût revient à maximiser la valeur du ratio $E^{1/2} / C_p$. Le budget restreint du projet, 3500€, impose d’attribuer un coefficient de pondération maximal de 5 à ce critère.

D’autres critères encore sont proposés par Douthe, tels que ceux liés à l’impact environnemental (coût en énergie consommée, éco-indicateur sur les dommages liés à la production du matériau, durabilité en lien avec la garantie décennale). Ils ne sont pas pris en compte dans notre étude. Ceci pour plusieurs raisons : les données ne sont pas facilement accessibles ; le pavillon est petit, unique et expérimental, il n’est pas significatif sur le coût environnemental du secteur du bâtiment ; il est temporaire. Cependant, dans le cadre hypothétique d’une réflexion sur la généralisation de la typologie des gridshells élastiques dans une part significative du secteur du bâtiment, ces indicateurs revêtiraient une importance d’autant plus élevée que l’humanité est de nos jours confrontée à son plus grand défi : le bouleversement climatique lié aux activités anthropiques.

Tableau 4 – Paramètres mécaniques et économiques des matériaux et évaluation multicritère.

Matériau	Masse volumique [kg/m³]	Module élastique E [Gpa]	Limite d'élasticité σ_y [MPa]	Rupture en flexion [MPa]	Ténacité K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]	Coût volumique C_p [€/m³]	M1	M2	M3	M4	Score global
							Coef. 4	[MPa] Coef. 1	[MPa/m ^{3/2}] Coef. 3	[MN ^{0,5} *m ^{0,5} /€] Coef. 5	
Chêne	380 - 480	13 300	40	105	0,6	1 150	$3,01 \times 10^{-3}$ (3,5/5)	13 300 (3/5)	$4,51 \times 10^{-5}$ (3/5)	$100,28 \times 10^{-3}$ (5/5)	3,96/5
Pin	300 - 400	10 200	24	97	0,5	850	$2,35 \times 10^{-3}$ (2,5/5)	10 200 (2,75/5)	$4,90 \times 10^{-5}$ (3/5)	$118,82 \times 10^{-3}$ (5/5)	3,60/5
Frêne	600 - 750	12 900	40	113	0,75	1 200	$3,10 \times 10^{-3}$ (3,5/5)	12 900 (3,5/5)	$5,81 \times 10^{-5}$ (3,5/5)	$94,65 \times 10^{-3}$ (5/5)	4,08/5
Robinier	670 - 770	16 900	40	126	0,9	1 500	$2,37 \times 10^{-3}$ (2,5/5)	16 900 (3,75/5)	$5,33 \times 10^{-5}$ (3,5/5)	$86,67 \times 10^{-3}$ (4,5/5)	3,60/5
Niangon	620 - 780	14 430	42	103	1	2 000	$2,91 \times 10^{-3}$ (3,25/5)	14 430 (3,5/5)	$6,93 \times 10^{-5}$ (3,5/5)	$60,06 \times 10^{-3}$ (4/5)	3,62/5
Acier	7 850	210 000	275	600	85	23 550	$1,31 \times 10^{-3}$ (1/5)	210 000 (5/5)	$40,48 \times 10^{-5}$ (4/5)	$19,46 \times 10^{-3}$ (2,5/5)	2,58/4
CFRP (Fibres de carbone)	1 800	90 000	2500	1200	45	175 000	$27,78 \times 10^{-3}$ (4,5/5)	90 000 (4,5/5)	$50,00 \times 10^{-5}$ (4/5)	$1,71 \times 10^{-3}$ (0,5/5)	2,85/4
GFRP (Fibres de verre)	2 600	26 000	3200	1000	65	14 500	$123,08 \times 10^{-3}$ (5/5)	26 000 (4/5)	$250,00 \times 10^{-5}$ (5/5)	$11,12 \times 10^{-3}$ (2/5)	3,77/4

Sources : Bois : FCBA, Cecobois, atomer.fr, cirad.fr – Acier : Arcelor Mittal – Fibres : [15]

Il en ressort que le frêne est le matériau le plus adapté pour notre projet. Notons toutefois que, comme le démontre le graphique ci-contre mettant en relation nos deux critères les plus importants (la courbure maximale permise et le coût de l’opération), les résultats opposent un groupe de matériaux à base de fibres transformées permettant

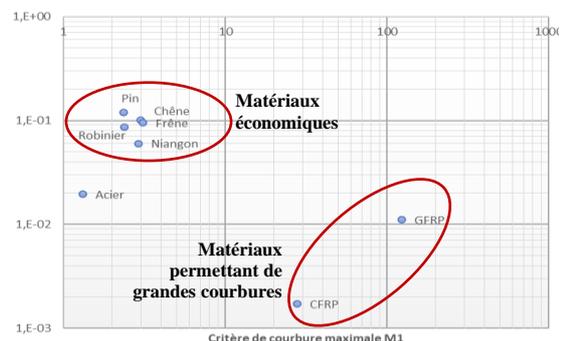


Figure 70 – Rapport des critères M1 et M4.

une structure très courbée à un autre, constitué des bois, permettant une courbure moindre mais à un coût bien plus faible.

Cette dernière conclusion nous a conduits à opter pour la technique employée par Frei Otto à Mannheim consistant à augmenter la courbure maximale permise par le bois en le maintenant à une humidité de saturation des fibres trempage avant érection afin de le rendre plus souple.

4.6.3. Vérifications du non-flambement du gridshell et mise au point des détails

Hypothèses de charges :

- Charges permanentes nodales (poids propre d'un nœud, i.e. lattes de bois, blocs de cisaillement, contreventement en acier, boulonneries et aboutages) : $\mathbf{G} = 1,26 \text{ kg}$
- Charges variables nodales dues au vent selon l'EN 1991 Partie 1-4 : $\mathbf{W} = 3,42 \text{ kg}$ (pression dynamique de pointe : $q_p = 0,453 \text{ kN/m}^2$, coefficient de force $c_f = 1,58$ (treillis plan)).
- Charges variables nodales dues à la neige selon l'EN 1991 Partie 1-3 : $\mathbf{S} = 2,15 \text{ kg}$ maximum (charge de neige sur le sol $s_k = 0,45 \text{ kN/m}^2$, coefficient d'exposition $C_e = 1,25$, cas d'une toiture cylindrique – coefficient de forme $\mu_4 = 0$ lorsque l'angle β de la tangente dépasse 60° , $\mu_4 = 2 \sin(\beta)$).
- Charges accidentelles : par sécurité, nous considérerons un cas de charge accidentel où des personnes d'une masse de 100 kg se suspendent à différents nœuds du gridshell.

Combinaisons de charges :

- État limite de service : pour le calcul des déformées. Toutefois, s'agissant d'un pavillon temporaire, aucune limite n'est imposée à ce critère d'usage et le fluage du bois est négligé.

$$1,00.\mathbf{G} = 1,26 \text{ kg}$$

$$1,00.\mathbf{G} + 1,00.\mathbf{W} + 0,60.\mathbf{S} = 5,97 \text{ kg}$$

- État limite ultime : critère de sécurité, il nous donne les combinaisons de charges utiles aux vérifications des contraintes dans le gridshell et du non-flambement de la structure.

$$1,35.\mathbf{G} = 1,70 \text{ kg}$$

$$1,35.\mathbf{G} + 1,50.\mathbf{W} + 1,05.\mathbf{S} = 9,09 \text{ kg}$$

Charge limite de flambement de la surface : mode de ruine prépondérant pour les gridshells.

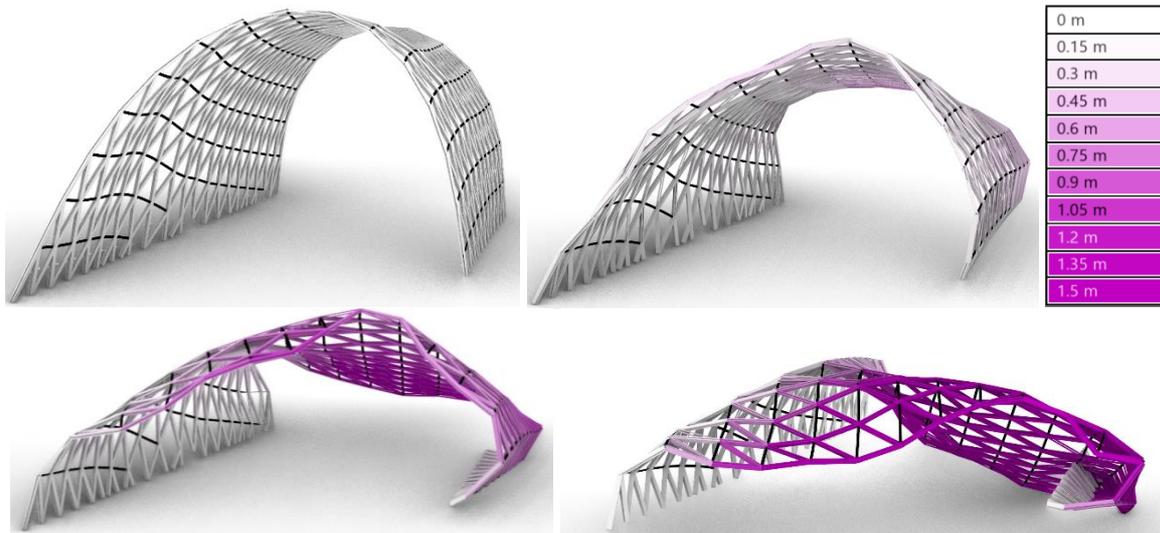


Figure 71 – Cinématique du flambement général du gridshell Élastica lorsque la charge nodale dépasse la charge critique.

Pour déterminer la charge maximale avant flambement, nous avons procédé par dichotomie sur les charges dans l’algorithme ELASTICA en testant les principaux paramètres de conception : le type de membrure (simple lattage ou double lattage), la présence ou non de contreventements, l’usage ou non de blocs de cisaillement. Afin d’interpréter ces résultats, nous les avons comparés avec ceux obtenus par maquette et par modélisation numérique par Happold et Liddell [24] pour la mutlihalle de Mannheim.

Tableau 5 – Charges nodales limites de flambement pour les gridshells Elastica et de Mannheim.

Lattage	Contreventement	Blocs de cisaillement	Charge nodale critique Elastica [kg à chaque nœud]	Charge nodale critique Mannheim [kgf/m²]
Simple	non	n/a	1,00	3,8**
	oui	n/a	1,90	non évaluée
Double	non	non	2,05 à 2,15	63***/100**
	non	oui	25,80	-
	oui	non	3,5 à 3,7	100*/160**/280***
	oui	oui	42,70	-

* Résultats du modèle numérique
 ** Prédictions extrapolées sur la base du modèle d'Essen
 *** Résultats extrapolés sur la base de la maquette de la Multihalle

On constate que, selon Happold et Liddell, toutes choses égales par ailleurs, l’ajout de contreventement sur un double lattage augmente la charge critique d’un facteur compris entre 1,60 et 4,44. De plus, nous pouvons prédire qu’un double lattage sera deux fois plus résistant

qu'un simple lattage, et que l'ajout de blocs de cisaillement augmentera la charge critique de flambement d'un facteur d'environ 13, déterminé par le rapport des inerties avec $(26 bh^3/12)$ et sans $(2 bh^3/12)$ ces blocs.

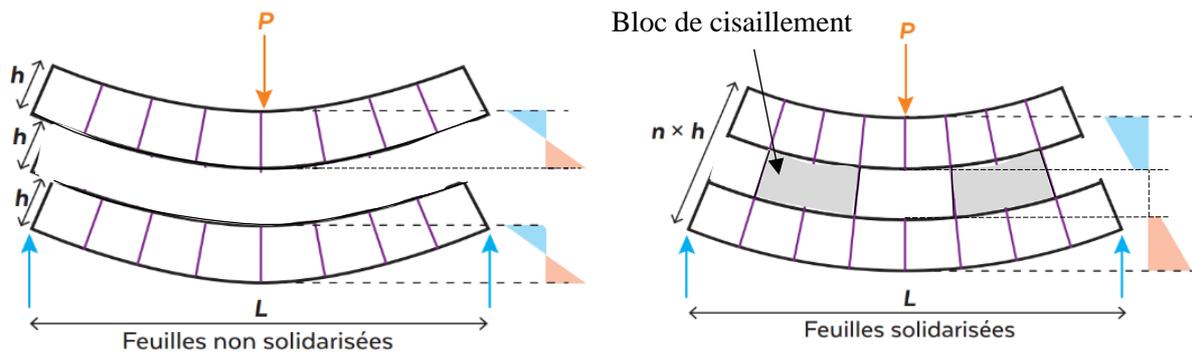


Figure 72 – Principe d'augmentation de l'inertie par solidarisation des lattes avec des blocs de cisaillement (en gris), illustration Komisarova A. – CTA EE1.

Quant aux résultats de notre modélisation du projet Élastica, on peut en conclure que, toutes choses étant égales par ailleurs, la résistance au flambement augmente :

- D'un facteur 2,00 à 2,02 par la mise en place d'un double lattage ;
- D'un facteur 1,81 à 1,83 par l'ajout des contreventements ;
- D'un facteur 11,09 à 12,29 par l'ajout des blocs de cisaillement.

Ces résultats sont en accord avec nos prédictions théoriques et avec les analyses de Happold et Liddell.

Nous avons aussi souhaité comparer ces résultats avec l'idée que propose Douthe [15] qui estime que « pour obtenir une expression de la pression critique p_{cr} qui va provoquer le claquage de la coque, on suppose que cette charge est proche de celle qui provoque l'instabilité d'une coque cylindre équivalente soumise à un chargement hydrostatique, c'est-à-dire du type : $p_{cr} = 3EI/R^3$ » (I est ici l'inertie par unité de longueur).

La grande proximité avec les résultats sur les trois conceptions testées (le rayon de courbure, 2,4 m, est mesuré à la position curviligne médiane) démontre une corrélation entre le flambement d'un gridshell et celui d'une coque cylindrique, validant ainsi l'hypothèse.

Tableau 6 – Charges limites de flambement par l’algorithme ELASTICA et par la formule des coques cylindriques.

Lattage	Contreventement	Blocs de cisaillement	Charge nodale critique par la modélisation [kg]	Charge nodale critique par la formule d’instabilité des coques cylindriques soumises à charge hydrostatique [kg]
Simple	non	n/a	1,00	1,02
Double	non	non	≈ 2,10	2,05
	non	oui	25,80	26,71

Rappelons enfin que toute structure doit être dimensionnée avec un facteur de sécurité sur les résultats des calculs. Happold et Liddell l’évaluent en prenant en compte divers paramètres [24] :

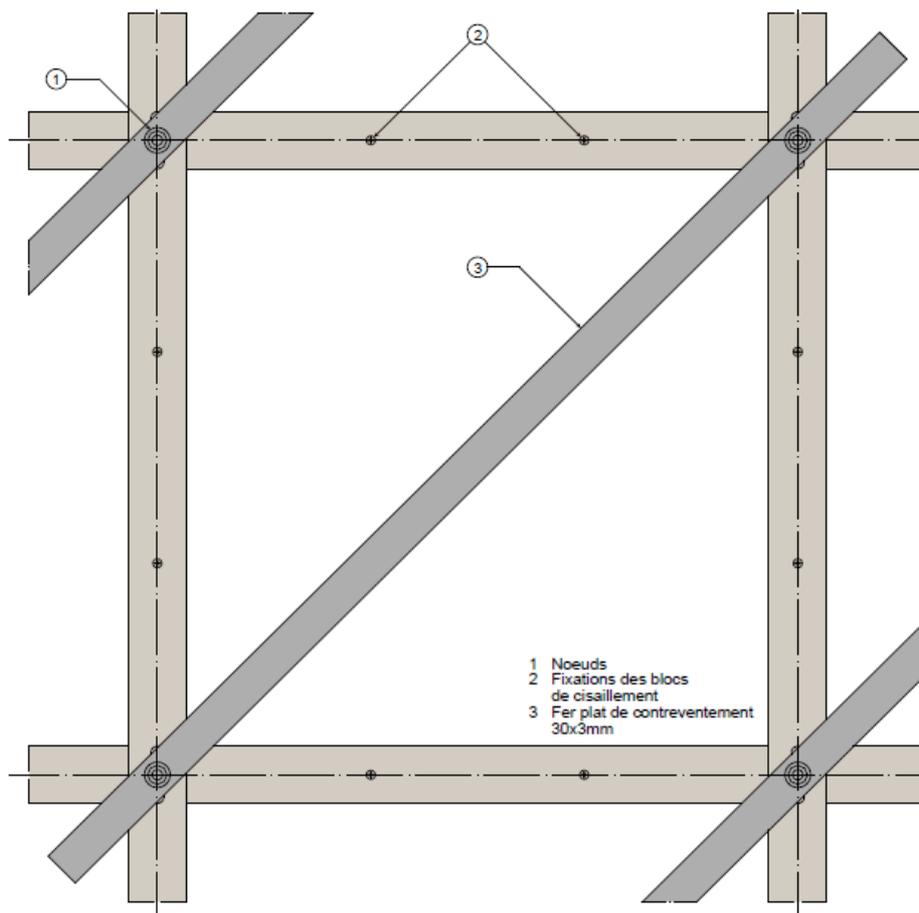
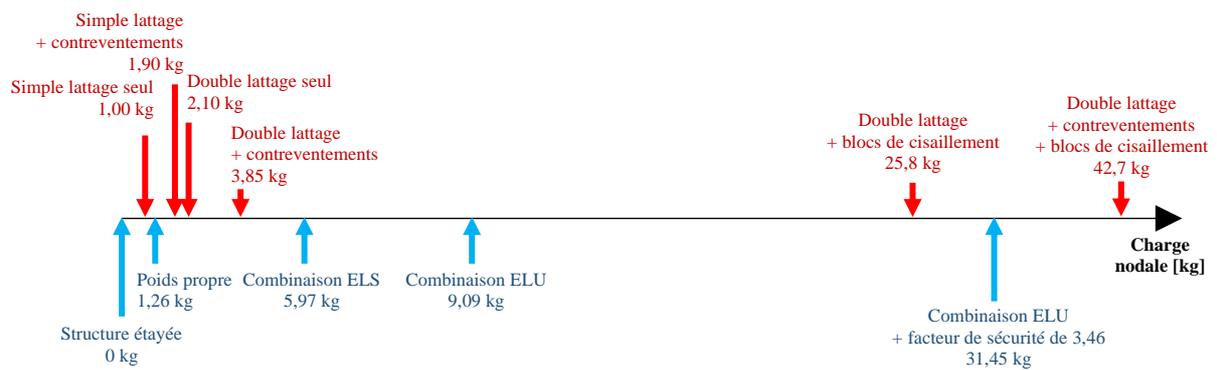
Tableau 7 – Calcul du coefficient de sécurité sur les charges limites.

Limite	Commentaire	Valeur Mannheim	Valeur Élastica
Variations du module d’élasticité E	Inhomogénéité de E entre les différentes lattes du projet	1,20	1,20
	Humidité	1,10	1,37
	Fluage	1,20	1,00
Précision de la géométrie du modèle	-	1,20	1,20
Variations dans le chargement	Période de retour des charges variables, variabilité à court terme.	1,20 à 1,40	1,40
Précision des hypothèses et du modèle de calcul numérique	Entre autres non prise en compte d’une légère double courbure. Pour Élastica : inertie avec blocs de cisaillement calculée avec solidarisation maximale. Non projection des charges (tel le vent) perpendiculairement à la surface (charges verticales uniquement).	1,00 à 1,20	1,35
Nature et dangerosité de l’effondrement par flambement	Effondrement soudain et global.	1,30	1,30
Conséquences liées à l’effondrement	Pour Mannheim, site fermé pendant les fortes neiges. Pour Élastica, structure légère non susceptible d’occasionner des blessures significatives.	1,00	1,00
Coefficient de sécurité global	(Multiplication des coefficients de sécurité unitaires)	2,85	4,85

La variabilité du chargement nodal étant déjà prise en compte dans la combinaison ELU (9,09 kg), nous appliquons sur cette charge un coefficient de sécurité global de $4,85/1,40 = 3,46$ (31,45 kg). Les résultats de notre étude démontrent que les charges attendues sur le gridshell

Élastica imposent une conception en double lattage, avec contreventements et blocs de cisaillement.

Ces trois paramètres de conception peuvent être résolus de diverses manières constructives. Celles adoptées pour le pavillon Élastica sont données dans l'illustration ci-dessous. Un état de l'art non exhaustif des diverses façons de réaliser le lattage, les contreventements et la solidarisation des membrures est donné en annexe 1. On vérifie aussi à cette occasion que le double lattage non contreventé et sans blocs est stable sans échafaudages pendant la phase d'érection (ce qui n'est pas le cas du simple lattage).



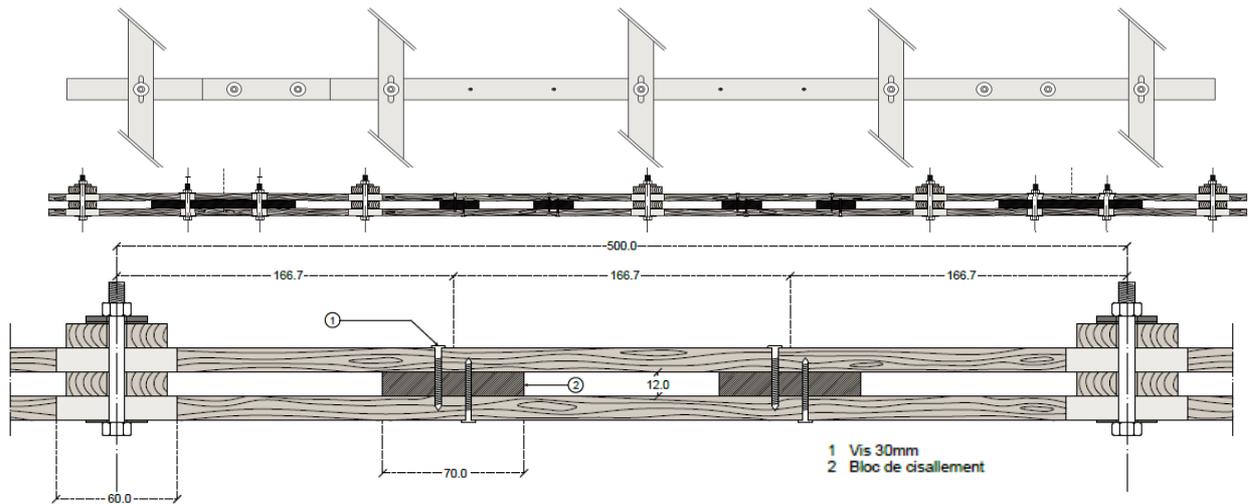


Figure 73 – Synthèse des charges du projet et des charges critiques de flambement selon les différentes conceptions possibles et détails du gridshell Élastica conçu par un double lattage avec contreventements et blocs de cisaillement [tracé des détails par Morosoff T. – CTA EE1].

4.6.4. Autres vérifications structurelles

Charges accidentelles : d’après nos essais, la position critique des charges ponctuelles se trouve au milieu de la voûte sur le plan latéral (cime), et très proche d’un bord (arche d’entrée). 24 personnes, pesant chacune 100 kg, peuvent se suspendre simultanément dans cette zone critique du gridshell sans provoquer la ruine de l’ouvrage.

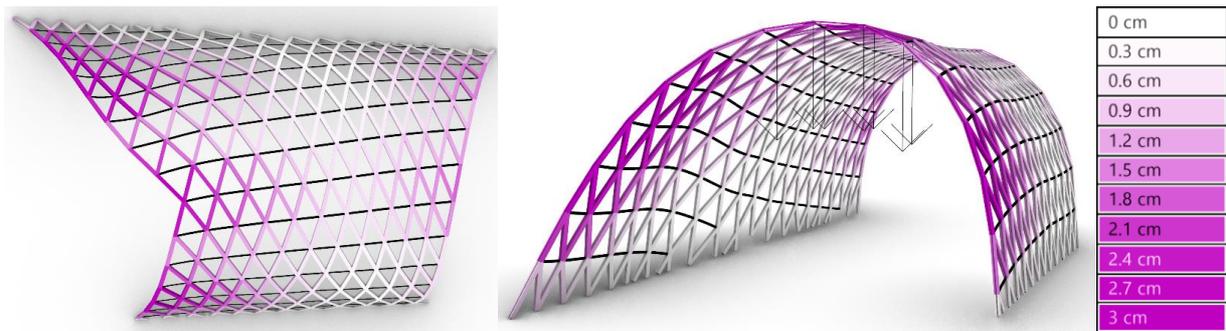


Figure 74 – Déplacements du gridshell sous l’action de son poids propre et de 7 personnes de 100 kg suspendues en 7 nœuds de la zone critique.

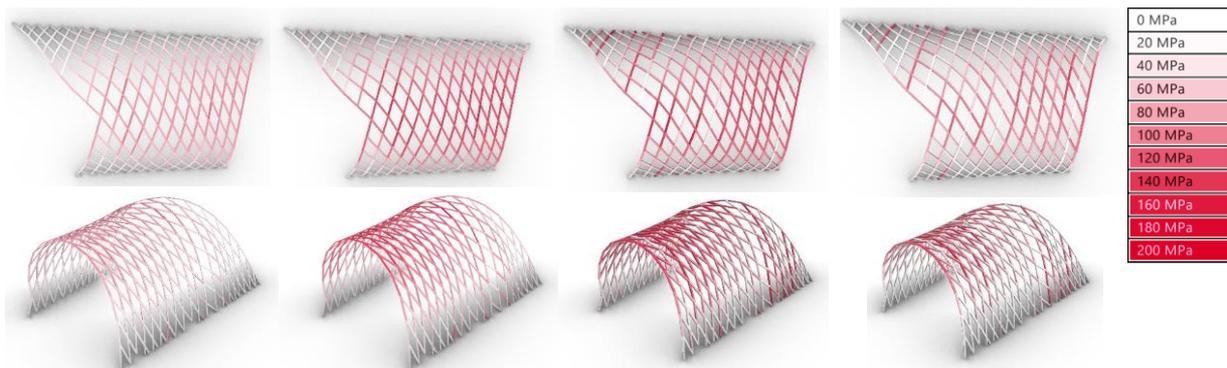
Contraintes dans le bois : elles sont dues à sa mise en flexion pendant la phase de montage puis, en phase de service, au chargement (poids propre et charges variables). Les contraintes valent $\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$ où y est la position relative perpendiculairement au plan de flexion (et par rapport à la fibre neutre), M le moment fléchissant et I le moment quadratique de la section. Cependant, des blocs de cisaillement sont ajoutés après érection, augmentant l’inertie des membrures de $2bh^3/12$

en phase de montage à $26 bh^3/12$ en phase de service (b et h désignent respectivement la largeur et la hauteur d'une seule latte, comme expliqué dans le *Tableau 3 – Paramètres de l'algorithme ELASTICA pour le projet Élastica.*). De plus, en phase de montage les lattes fonctionnent indépendamment (contraintes maximales à $y_{max} = h/2$), tandis qu'en phase de service, le double lattage fonctionne comme un unique élément poutre échelle solidaire ($y_{max} = 3 h/2$).

Comme $M = EI/R$, R étant le rayon de courbure, la contrainte maximale vaut $\sigma_{max} = \frac{E \cdot h}{2 \cdot R}$ pour la part de contrainte reçue en phase de montage et de $\sigma_{max} = \frac{3E \cdot h}{2 \cdot R}$ pour celle reçue en phase de service. Nous avons donc simulé trois cartographies des contraintes :

- A. À l'issue de la phase de montage, sans chargement, avec $\sigma_{max} = \frac{E \cdot h}{2 \cdot R}$
- B. À l'issue de la phase de montage, avec chargement, avec $\sigma_{max} = \frac{3E \cdot h}{2 \cdot R}$
- C. En phase de service après relâchement, avec chargement, avec $\sigma_{max} = \frac{3E \cdot h}{2 \cdot R}$

On déduit la cartographie **D** des contraintes résultantes dans le bois : **D = A + (C – B)**.



Cartographie A – Cartographie B + Cartographie C = Cartographie

Figure 75 – Cartographie des contraintes dans le bois sous combinaison ELU.

38% des éléments restent en phase élastique en phase de montage et 39% en phase de service, tous restants sous le seuil de rupture. En phase de montage, ce résultat peut être porté à 49% grâce au trempage du bois (diminution du module élastique E de l'ordre de 27% à saturation des fibres pendant la phase de montage). Afin de réduire le risque de ruptures, les éléments les plus sollicités sont réalisées avec les bois ayant le moins de défauts. La plastification locale de certaines lattes est admise du fait du report de charge qu'elle entraîne sur les parties restées dans le domaine élastique.

Vérification des contreventements : l’algorithme ELASTICA permet également le calcul des efforts dans les contreventements en acier. Ceux du projet sont de section plate en acier S235 de largeur $b' = 30$ mm et de hauteur $h' = 3$ mm.

Ceux en traction sont dimensionnés par la résistance intrinsèque à leur section $N_{max} = \sigma_{y,s} \cdot b' \cdot h' = 2115$ kg ($\sigma_{y,s} = 235$ MPa étant la contrainte limite élastique de l’acier) et ceux en compression par leur force critique de flambement, $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI'}{l_f^2} = 89$ kg pour un élément de longueur de flambement $l_f = 400$ mm ($I' = b'h'^3/12$ est le moment quadratique du contreventement).

Poussées au vide : les efforts horizontaux au niveau des pieds sont en moyenne de 37,5 kg sous poids propre et 261 kg à l’ELU. Les pieds sont fixés via un bastaing ancré par des tiges d’acier enfoncées à 25 cm dans le sol. Des bancs et des pots de plantes jouent le rôle de culées. L’ensemble est capable de résister à une poussée de 270 kg.

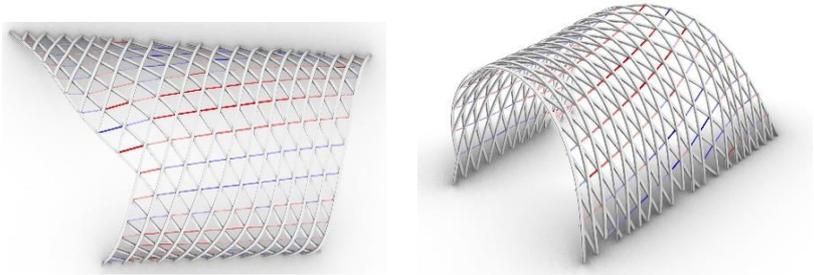


Figure 76 – Cartographie des contraintes dans le bois sous combinaison ELU.

Divers : l’algorithme ELASTICA est également en mesure de produire automatiquement les plans d’exécution (plans de fabrication et de plans de montage) des projets.

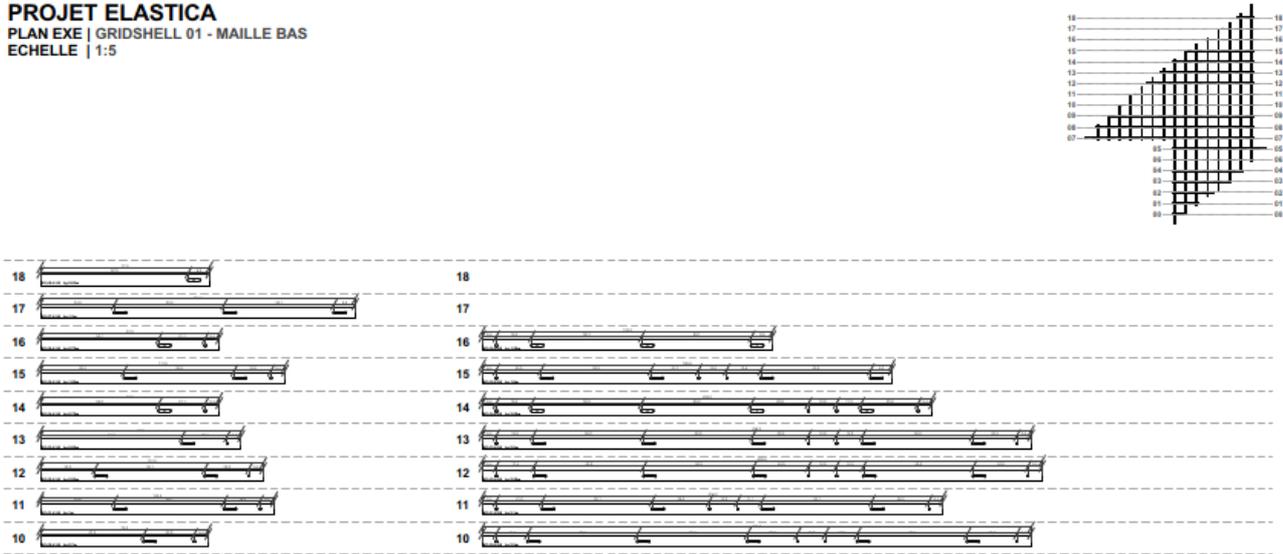


Figure 77 – Plans de fabrication et de montage issus de l’algorithme ELASTICA [Zitouni M. – CTA EE1]

4.7. Validité des résultats issus de l'étude de modèles numériques et de modèles physiques

Les études de cette partie ont été menées en enseignement CTA « Explorer à l'échelle 1 » avec la participation des étudiants de ENSA-Paris-la-Villette Romain ANTIGNY, Tom BARDOUT, Nina BARGOIN, Sofia CASERO, Flora Cassettari CHIARATTO, Marisa DE GUZMAN REYES, Adrien ECHEVESTE, Noémie GIRARDI, Linus GRIMMINGER, Ines HITMI, Amalia IGLESIAS CRESPO, Bryan KATEKONDJI, Jongmin KIM, Yeji KIM, Antoine MAISONNEUVE, Hortense MAJOU, Ana MARTIN DE CASTRO, Asnathé MOUANDE, Martina PAOLINO, Pablo POUGET, Alicia TRESGOTS, Farah LADHARI, Mariem BEN ALI, Clotilde BURDET, Marie GASKOWIAK, Élise ROMAGNAN, Rafik KHENDEK, Farrah MISTOIHI, Fanny DE BLAS, Davy KIMA, Jean SIAU, Alexis SORIA, Julia TORNEL-MEDINA MATAS, Julia HLADUN, Alice EISING, Oriana REY et de CentraleSupélec Alexis MEYER, Bastien FROBERT, Marc POUYANNE, Louise DE-LAHAYE, Jérôme GARCIA en co-encadrement avec Quentin CHEF.

Au cours d'une réflexion sur la manière de modifier l'algorithme ELASTICA pour qu'il soit également capable de modéliser un gridshell élastique obtenu par un entrelacement de son lattage, il est apparu que la complexité apportée par la prise en compte du tressage dans le calcul des inerties en flexion de l'objet rendait nécessaire – pour la validation et le calibrage des études – la comparaison de la solution de l'algorithme numérique à des résultats expérimentaux menés par des essais de chargements sur des modèles réduits physiques.

Cependant, lors du développement de cet outil, l'épidémie de Covid-19 avait entravé sérieusement les rencontres physiques de l'équipe et les études sur maquettes réelles ne purent être menées. De ce fait, il n'avait pas été possible de prouver expérimentalement les résultats de la modélisation numérique. Lors de la présente étude, publiée en 2022 dans le *Journal of Civil Engineering and Architecture* [32], il a été possible de confronter les résultats numériques de différentes conceptions de gridshells élastiques (simple ou double lattage, avec ou sans contreventements, avec ou sans blocs de cisaillement), obtenus avec ELASTICA, à ceux d'essais de chargement sur des maquettes à l'échelle 1/10^{ème} et 1/2.



Figure 78 – Essai de chargement d'une maquette à l'échelle 1/2 d'un gridshell élastique [ENSA-PLV – CTA EE1].

4.7.1. Présentation de l'objet d'étude

L'objet d'application de cette vérification est le projet Kagome, un second gridshell élastique, mais cette fois-ci à membrures entrelacées, que nous avons voulu réaliser en 2022 en lieu et place du second gridshell prévu en 2020 à côté d'Elastica, mais non réalisé à cause de l'épidémie de COVID-19 et des confinements qu'elle a imposés.



Figure 79 – Élévation et plan masse des gridshells [étudiants de Master 1 de l'ENSA-PLV – CTA EE1 2021-2022].



Figure 80 – Gridshells Élastica et Kagome [crédits : Olivier Namias].

4.7.2. Problématique et méthodologie

Problématique : l'intégrité du gridshell Kagome n'est pas vérifiable de façon directe par une simulation numérique à l'aide l'algorithme de relaxation dynamique ELASTICA, du fait que :

1. Le gridshell est déjà contreventé lorsque la grille est construite à plat (il s'agit d'une conséquence directe du motif en étoile, et donc à trois directions, kagome, utilisé dans sa conception). Il n'y a donc aucun mouvement relatif possible des membrures en plan, que ce soit durant la phase d'érection ou durant les essais de chargement.
2. L'évaluation de l'inertie de flexion hors plan est complexe du fait du motif à trois directions, ainsi qu'à cause de la méthode d'assemblage par entrelacement.

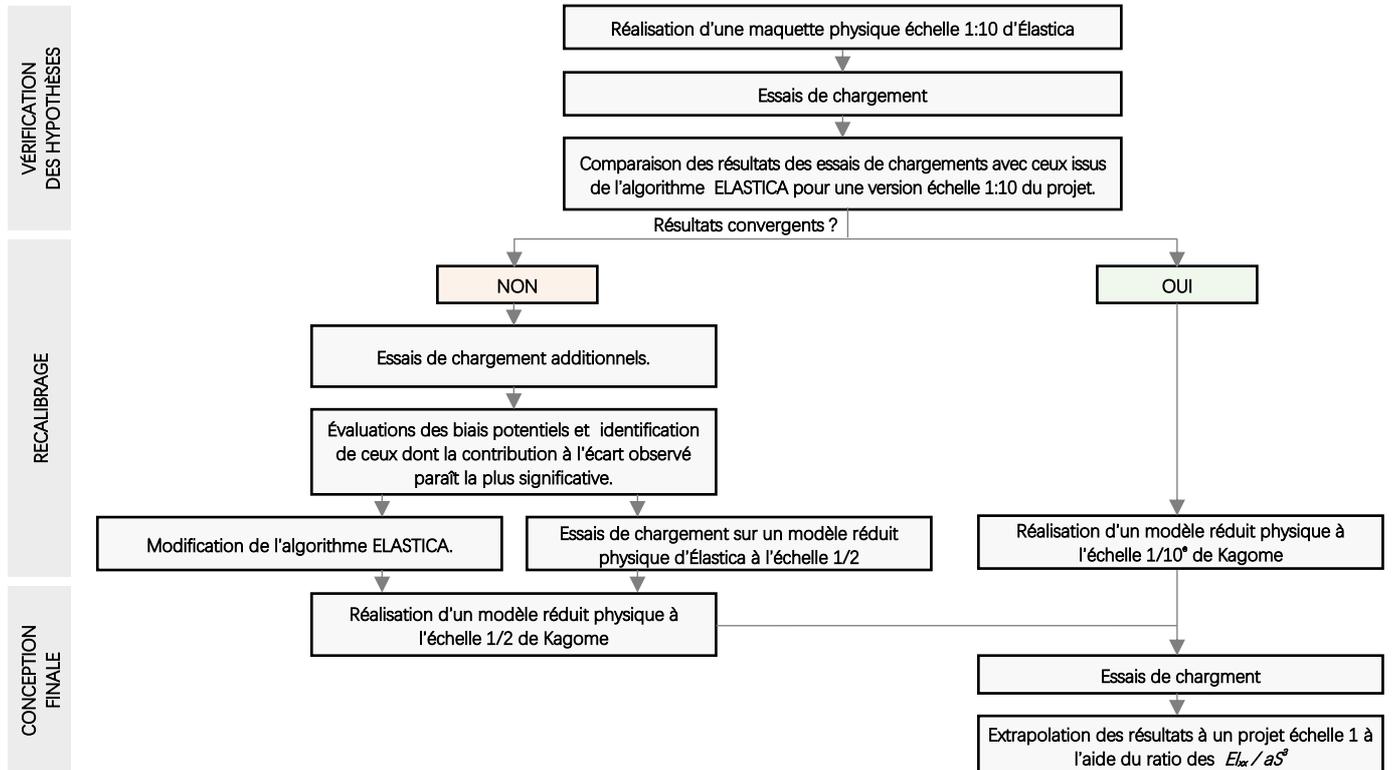


Figure 81 – Méthodologie développée pour la conception et la vérification de l’intégrité du gridshell Kagome.

4.7.3. Phase de consolidation

Durant l’élaboration de l’algorithme ELASTICA en 2020, l’épidémie de COVID-19 et les confinements qu’elle avait engendrés avaient rendu impossible la réalisation d’essais de chargement de maquettes physiques afin de confronter résultats d’études numériques et physiques. En 2022, nous avons décidé de procéder à ces essais par la réalisation de maquettes à l’échelle 1 /10^{ème} du projet de gridshell Kagome.

Comme nous le rapportons au paragraphe 4.4.1 *L’approche par la maquette*, lors de la vérification structurelle de la Multihalle de Mannheim, un modèle en flexion active fut fabriqué en PMMA à l’échelle 1/60^{ème} et testé par l’équipe de Happold & Liddell [24] en chargeant les nœuds par des clous. La charge d'effondrement par flambement du modèle a été mesurée à 2,8 kg/m² sans contreventement et à 12,5 kg/m² avec. Dans leur article, Happold et Liddell démontrent qu’une extrapolation de la charge critique est possible d’un modèle à un projet réel en la multipliant par le rapport des EI_{xx} / aS^3 du projet et du modèle (I_{xx} est l’inertie hors plan, a l’espacement des lattes et S la portée du gridshell). La charge d'effondrement est ainsi évaluée à 63 kg/m² pour un double lattage sans contreventement et à 280 kg/m² avec. Toutefois, les

calculs numériques prédisaient 100 kg/m², nous avons alors cité la conclusion de l'étude sur cette observation et qui attribuait la différence à la non-variabilité d'échelle de la raideur en cisaillement ou à une plus grande raideur des nœuds du modèle réduit. Revenons-y plus dans le détail à la lumière de nos propres expériences.

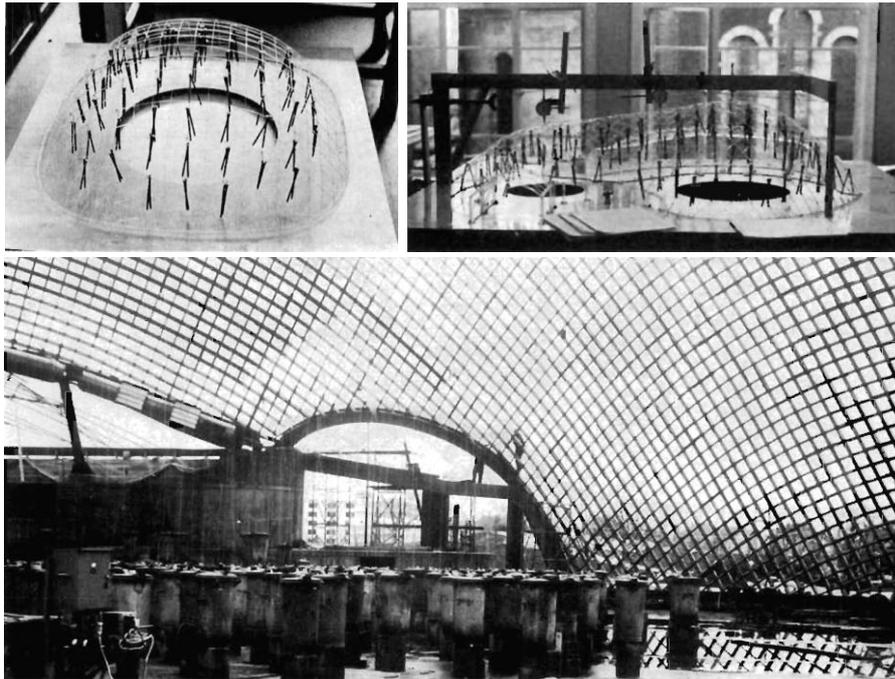


Figure 82 – Test de charge par ajout de clous sur les nœuds du modèle du gridshell d'Essen ; modèle en PMMA et essais de chargement avec des poubelles remplies d'eau [24].

Tableau 8 – Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux sur un gridshell élastique post-formé à simple lattage et sans contreventements.

G01 : Gridshell élastique simple lattage				Conception	
				Lattage : simple	
Données :		Maquette	Ech. 1/10e		
Rayon de courbure à la position médiane sur la courbe entre base et sommet R		0,24 m		2,40 m	
Section lattes $b \times h$		10 mm	1 mm	50 mm	12 mm
Nœuds par m ²		400		4	
Portée du gridshell S / Espacement des lattes a		0,356 m	50 mm	3,56 m	500 mm
Module d'élasticité du bois		10 200 MPa		11 500 MPa	
Contreventement : non					
Blocs de cisaillement : non					

	Modèle réduit			Projet réel		
	Test de chargement sur maquette	Simulation numérique sur maquette	Extrapolation de la simulation sur projet réel	Par extrapolation des résultats de la maquette	Par la formule du flambement des coques cylindriques.	Par simulation numérique (relaxation dynamique)
Charge limite de flambement	0,027 kg (0)	0,011 kg (0)	0,011 kg (1)	2,80 kg (1)	0,92 kg (1)	1,05 kg (0)
Inertie de l'élément I_{xx}	2,358 mm ⁴ (1)	0,83 mm ⁴		21 468 mm ⁴	7200 mm ⁴	
Inertie par unité de longueur I	0,047 mm ⁴ /mm (1)	0,017 mm ⁴ /mm		42,9 mm ⁴ /mm	14,4 mm ⁴ /mm	

0. Par mesure directe (maquette) ou par dichotomie sur l'algorithme ELASTICA
1. Via la formule de flambement des coques cylindriques soumises à un chargement hydrostatique : $p_{cr} = 3EI/R^3$.
2. Extrapolation à l'aide du ratio des EI_{xx} / aS^3 entre le projet et du modèle.

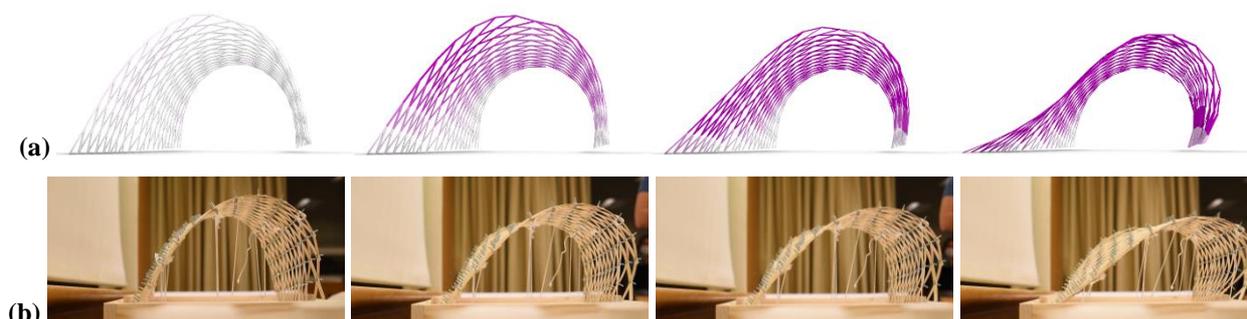


Figure 83 – Cinématique de flambement prévue par ELASTICA (a) et sur une maquette du projet Elastica à l'échelle 1/10^{ème} (b) respectivement à 35%, 80%, 90% et 99% de la charge critique de flambement.

Conclusions de la phase de calibrage. Les résultats de l'essai « de calibrage » montrent que la charge critique de flambement du modèle réduit est 2,48 à 2,53 fois supérieure à celle anticipée par le calcul via la simulation par relaxation dynamique. Cet écart non négligeable est assez proche de celui constaté par Happold et Liddell sur Mannheim (2,80).

Pour essayer de le comprendre, revenons aux réflexions d'Happold et Liddell sur l'extrapolation des résultats sur modèle réduit [24]. Les auteurs identifiaient plusieurs propriétés de la structure « qui définissent et contrôlent son comportement et qui sont listées ci-dessous :

- $S = \text{Span}$. If the model is geometrically scaled then its size can be represented by a typical dimension, say the span
- $EI_{xx} / a =$ The out of plane bending stiffness of the surface a per unit length ($a =$ spacing of laths)
- $EI_{yy} / a^3 =$ [The in-plane bending stiffness] is proportional to the contribution of the timber members to diagonal stiffness, if the joints between timber members are rigid
- EA / a is the axial stiffness along the timber members per unit length
- $E'A' / ka =$ is proportional to the contribution of the ties to the diagonal stiffness ([...] $ka =$ tie spacing) »

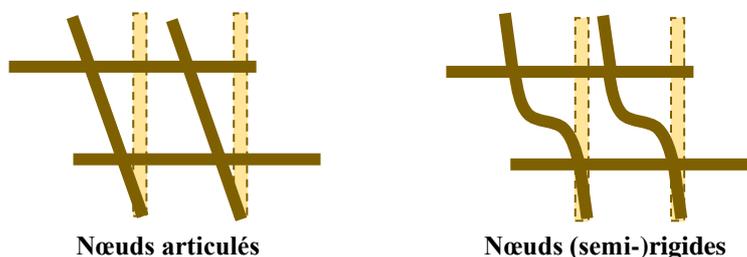


Figure 84 – La flexion dans le plan des membrures n'est rendue possible que si les nœuds sont (semi-)rigides.

Liste à laquelle s'ajoute une contribution liée au glissement par force unitaire de chaque nœud. Nous suivons alors le raisonnement suivant afin de déterminer les paramètres qui nous semblent les plus significatifs dans leur contribution aux écarts constatés :

- *"The deformation of the grid shell is mainly due to out-of-plane bending and diagonal distortions of the grid squares [and] if the diagonal stiffness is much less than the axial stiffness"* [24]. De ce fait, nous considérerons comme négligeable la contribution de la raideur axiale des membrures par rapport à la raideur flexionnelle hors-plan.
- Comme le gridshell testé est conçu sans contreventements, la contribution de la raideur axiale $E'A$ n'a pas lieu d'être dans la réflexion.
- En accord avec Happold et Liddell, nous dirons que si les contreventements ont une rigidité axiale très importante, la contribution de la rigidité en plan est négligeable. Toutefois, le gridshell testé n'avait pas de contreventements.

Nous identifions donc à ce stade les deux paramètres sur lesquels nous allons concentrer notre évaluation :

1. **Nœuds semi-rigides** : la contribution des nœuds qui sont modélisés en relaxation dynamique comme parfaitement articulés dans le plan alors qu'ils ont en fait une certaine raideur due au serrage de l'assemblage et aux frottements induits par la courbure des membrures.

Pour évaluer ce paramètre, nous avons :

- a. Mené des essais de chargement sur des maquettes contreventées, car alors le blocage de la déformation de la maille induit par la raideur axiale des contreventements, si elle est suffisamment grande, devrait faire converger les résultats numériques et physiques.

- b. Modifié l'algorithme ELASTICA pour prendre en compte un couple de rappel en frottement par rotation à chaque nœud, confronter les résultats obtenus avec des essais de chargement sur maquettes à l'échelle 1/10^{ème} et 1/2. La contribution des frottements, qui en théorie a tendance à augmenter fictivement la charge critique extrapolée par la maquette physique, devrait diminuer avec l'augmentation de l'échelle de la maquette.

2. **Raideur en flexion dans le plan.** De plus, la raideur en rotation des nœuds implique une possible mobilisation de la raideur en flexion dans le plan des membrures. Pour analyser cette contribution, nous allons modifier ELASTICA pour prendre en compte une flexion biaxiale précise des membrures.

Entre autre, chaque modélisation, numérique ou physique, comporte un ensemble de biais dont il convient de lister la nature et, si possible, d'évaluer les écarts qu'ils peuvent engendrer sur le résultat. Il s'agit ici principalement des imperfections géométriques et de celles du chargement de la maquette, d'autant plus importantes que le modèle est réduit, nous y consacrerons une part de notre analyse.

4.7.4. Phase de recalibrage

Essais de chargement sur une maquette à échelle 1/10^{ème} avec assemblages relâchés. Nous avons alors réalisé un nouvel essai de chargement en relâchant le plus possible les nœuds afin de réduire au maximum la contribution de leur raideur en rotation, et donc possiblement de la flexion dans le plan des membrures. Les résultats de ce test donnent une charge critique de flambement de la maquette à 0,0177 kg par nœud, soit un écart de 1,61 à 1,65 avec les prévisions numériques. Un résultat préliminaire qui conforte notre intuition quant à la pertinence d'étudier plus précisément les contributions respectives de la raideur rotationnelle des assemblages et de la raideur en flexion dans le plan des membrures à la charge critique de flambement des essais.

Essais de chargement sur une maquette à échelle 1/10^{ème} avec contreventements. Afin d'aller plus loin dans cette réflexion, nous avons voulu poursuivre les mesures sur un gridshell contreventé à l'échelle 1/10^{ème}. Si notre hypothèse est juste, les résultats devraient concorder beaucoup mieux entre modèles numériques et physiques sur ce type de conception puisque le contreventement bloque presque totalement – à condition que la raideur axiale par unité de longueur des contreventements $E'A' / ka$ soit suffisamment grande, ce qui est le cas ici – la déformation de la maille. Les éventuelles contributions d'une raideur rotationnelle sur les nœuds et d'une raideur de flexion hors plan des membrures devraient être rendues négligeables.

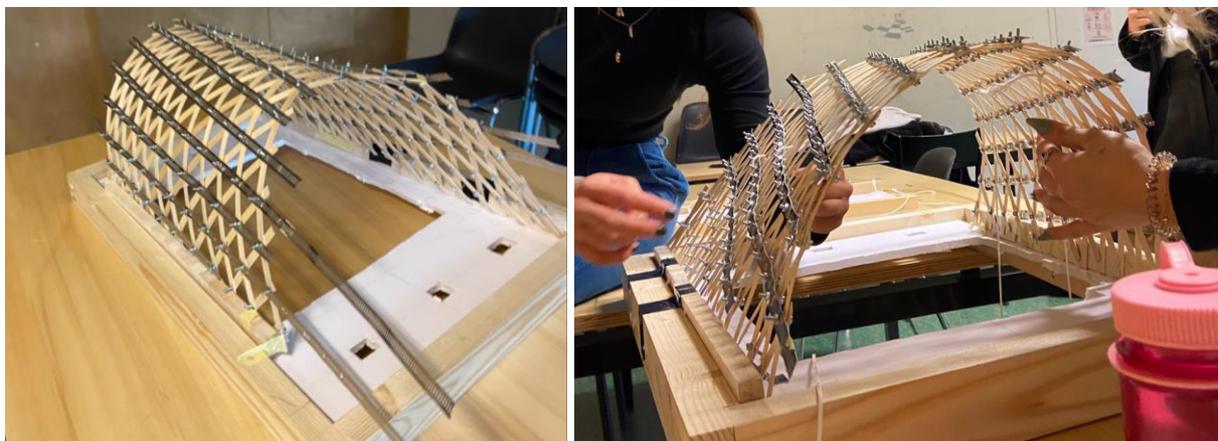


Figure 85 – Essai de chargement sur maquette 1/10^{ème} du projet Elastica (simple lattage avec contreventements).

Les résultats de cette expérience montrent un écart de seulement 1,5 % entre le modèle réduit physique (0,0182 kg par nœud) et le modèle numérique (0,0185 kg par nœud).

Conclusions préliminaires. Ces résultats tendent à nouveau à confirmer nos hypothèses sur la contribution à l'évaluation de la charge critique de flambement de la coque de la raideur rotationnelle des nœuds et – éventuellement – de la raideur flexionnelle en plan des membrures en bois dans le cas d'un gridshell non contreventé. Toutefois, ces résultats sont à ce stade à considérer avec une grande prudence car :

- Le nombre d'essais est très faible.
- À cette échelle, les biais liés aux imperfections géométriques et sur le mode de chargement – nous n'avons chargé qu'un nœud sur 15 environ sur la maquette – sont probablement importants et leurs contributions aux résultats encore mal maîtrisées.
- Nous n'avons pas pu mettre les boulons et donc les rondelles à l'échelle. Ils sont proportionnellement plus gros et augmentent mécaniquement les frottements au niveau des nœuds et donc leur raideur. Le fait que l'écart sur les essais de chargement physiques entre le modèle aux nœuds les plus lâches possibles (0,0177 kg par nœud) et celui avec le gridshell contreventé (0,0182 kg par nœud) soit si faible invite à penser qu'une fois la coque mise en forme, les frottements entre les boulons des nœuds et les membrures jouent un rôle de blocage par frottement non négligeable, et cela d'autant plus que l'échelle de la maquette est réduite et que l'échelle des boulons est proportionnellement plus grande par rapport à celle des membrures. Notons cependant que ce biais ne contredit pas – au contraire – nos précédentes interprétations.
- Ces conclusions impliqueraient que la concordance entre la charge critique de flambement d'un gridshell (contreventé ou non) et celui d'une coque cylindrique soumise à une pression hydrostatique n'est valable qu'à une échelle suffisamment grande. Notons qu'une coque cylindrique n'a pas de mouvements possibles dans le plan de sa surface.
- Nous n'avons pas testé une voûte cylindrique simple et symétrique, mais le projet des étudiants en architecture de master de l'ENSA-Paris la Villette qui présente une forte asymétrie au niveau des pieds. Des tests ultérieurs ont montré que cette asymétrie abaissait la valeur de la charge critique de flambement de 33% selon les tests physiques à l'échelle 1/10^{ème} et de 46% selon le modèle numérique extrapolé. Nous avons également remarqué que cette asymétrie augmentait très substantiellement la sensibilité à l'imperfection de chargement (selon la position des charges, le résultat pouvait varier de 56%).

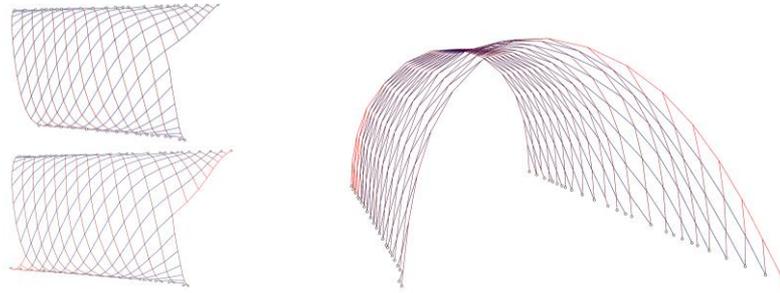


Figure 86 – Effet de la symétrie du gridshell: l'ajout des seules parties en rouge a permis d'augmenter la charge critique de flambement d'Elastica de 86% selon la simulation numérique, une modification similaire sur Kagome a conduit à une augmentation de 56% selon un essai de chargement sur maquette 1/10^{ème}.

Nous en concluons que des essais complémentaires sur une maquette échelle 1/2 sont nécessaires afin d'évaluer l'impact des imperfections dans le résultat. En effet, à plus grande échelle, les imperfections géométriques, celles sur les charges et également le frottement au niveau des nœuds sont réduits. Une modification de l'algorithme ELASTICA prenant en compte la raideur rotationnelle des nœuds et la raideur flexionnelle en plan des membrures permettra également de confronter numériquement les nouveaux résultats sur modèles numériques à ceux réalisés sur le modèle réduit physique.

4.7.5. Méthodologie d'analyse de la contribution de la raideur rotationnelle des nœuds

Méthodologie. La raideur des nœuds est ajoutée dans un premier temps au modèle numérique par l'addition d'une force de rappel F_f proportionnelle à l'angle de rotation θ entre les deux directions des membrures :

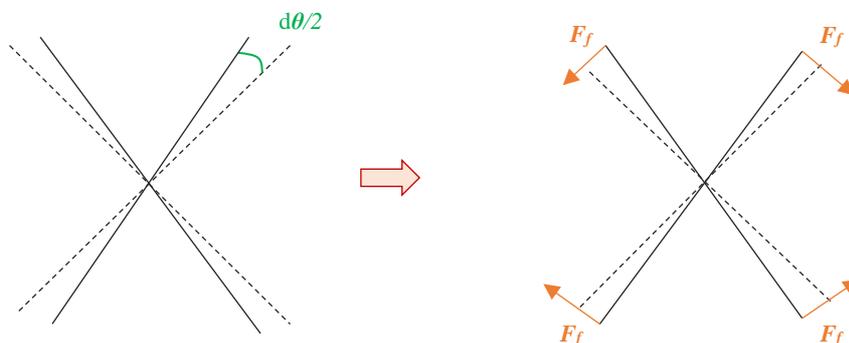


Figure 87 – Force de rappel due aux frottements et s'opposant à la rotation relative des membrures.

Elle modélise les contributions respectives :

1. D'une force de serrage N_{ser} prise égale à 90% de la contrainte limite élastique en compression du bois dans le sens perpendiculaire aux fibres $\sigma_{y,w,90}$ multipliée par l'aire de la rondelle A_r :

$$N_{ser} = 0,9 * \sigma_{y,w,90} * A_r \quad (8)$$

2. D'une force N_{con} relative au contact entre les membrures de chaque direction lorsque la courbure dépasse une limite définie par le jeu moyen des assemblages :

$$N_{con} = (F_{i-1,i} + F_{i,i+1}) * \cos(\alpha_i) \approx \frac{4EI \sin(\alpha_i) \cos(\alpha_i)}{L_0^2} \quad (9)$$

On rappelle que les forces dues à la flexion valent :

$$F_{i-1,i} = \frac{2EI \sin(\alpha_i)}{L_{i-1,i} * L_{i-1,i+1}}$$

$$F_{i,i+1} = \frac{2EI \sin(\alpha_i)}{L_{i,i+1} * L_{i-1,i+1}}$$

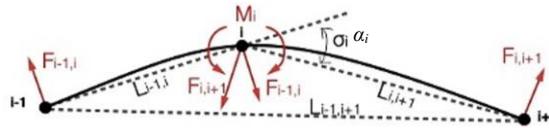


Figure 88 – Force dues à la flexion.

Le moment de rappel M_r vaut donc :

$$M_r = \alpha_{fr} * (N_{ser} + N_{con}) * \frac{b}{2} \quad (10)$$

Où α_{fr} est le coefficient de frottement statique bois-bois.

On en déduit donc la valeur de la force F_f :

$$F_f = \frac{M_r}{L_0} = \frac{\alpha_{fr} * (N_{ser} + N_{con}) * b}{2 * L_0} \quad (11)$$

Nous menons alors des essais numériques avec et sans serrage des nœuds d'assemblage. La force de contact N_{con} est appliquée seulement si la courbure est suffisante pour créer le contact. Avec un jeu d'un millimètre aux assemblages, le contact est observé pour environ un tiers à la moitié des nœuds du gridshell (selon l'instant considéré de la cinématique de déformation). Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants.

Lors de cette phase d'essais plus précis, nous avons réalisé qu'il existait en réalité trois états distincts vis-à-vis du claquage général de la structure. Afin de caractériser correctement les résultats observés, nous les définissons dans l'illustration ci-dessous.

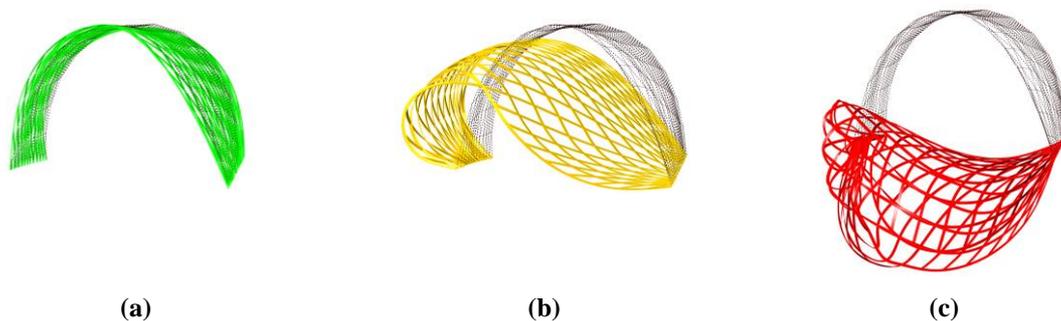


Figure 89 – Gridshell en voûte (a), gridshell en état critique (b), gridshell effondré (c).

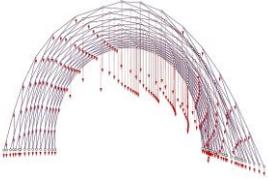
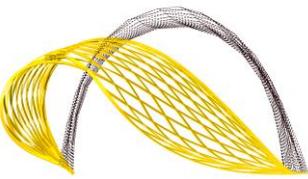
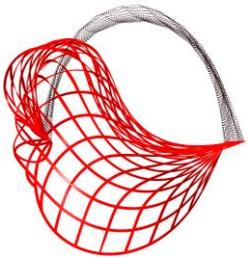
Afin d’obtenir une comparaison plus précise et de réduire l’influence des biais, un modèle d’étude a été construit à l’échelle 1/2 dans le but de le soumettre à des essais de chargement. Durant cette expérience, seulement les 73 nœuds jugés les plus critiques vis-à-vis du flambement global de la surface ont été chargés (sur les 203 nœuds composant le gridshell). Cela induit un biais de chargement que nous avons dû évaluer et corriger à l’aide d’essais numériques dans lesquels le poids propre était réparti sur tous les nœuds tandis que la charge rapportée était appliquée seulement aux 73 nœuds correspondants.

Tableau 9 – Données du modèle à échelle 1/2 du gridshell Élastica (simple lattage, sans contreventement)

G01 : Gridshell élastique simple lattage				Conception	
				Lattage : simple	
Données :	Maquette	Ech. 1/2	Projet		
Rayon de courbure à la position médiane sur la courbe entre base et sommet R	1,2 m		2,40 m		
Section lattes $b \times h$	24 mm	7 mm	50 mm	12 mm	
Nœuds par m^2	16		4		
Portée du gridshell S / Espacement des lattes a	1,78 m	250 mm	3,56 m	500 mm	
Module d'élasticité du bois	11 500 MPa		11 500 MPa		
				Blocs de cisaillement : non	

Il est également important de souligner que l’effondrement a nécessairement lieu sur la maquette physique à un chargement inférieur à celui de la modélisation numérique. Cela est dû au fait que les barres du modèle numériques sont modélisées comme étant infiniment résistantes, permettant un retournement complet du gridshell. En réalité, cette déformation géométrique génère des diminutions localisées du rayon de courbure et, par extension, une augmentation de la contrainte qui va dépasser la contrainte limite de rupture du bois avant le retournement complet de la coque. Cette observation nous invite à introduire un coefficient de sécurité sur les résultats de la modélisation par relaxation dynamique que nous avons évaluée de façon préliminaire dans notre étude aux alentours de 1,15.

Tableau 10 – Comparaison et calibrage des essais sur modèles réduits à l'échelle 1/2 du gridshell Élastica.

Modèles	Début du flambement (RD)	Rupture du modèle réduit	Fin du flambement (RD)
			
			
-	Chargement : 57,15 kg	Chargement : 65,00 kg	Chargement : 74,14 kg

4.7.6. Méthodologie d'analyse de la contribution de la raideur en plan des membrures

Comme expliqué précédemment et pour une maille donnée, à chaque série de 3 nœuds consécutifs **A**, **B** et **C**, correspond un jeu de forces dues à la flexion qui appartient au plan **(ABC)**. Les forces sont ainsi proportionnelles au sinus de l'angle α entre \overline{AB} et \overline{BC} .

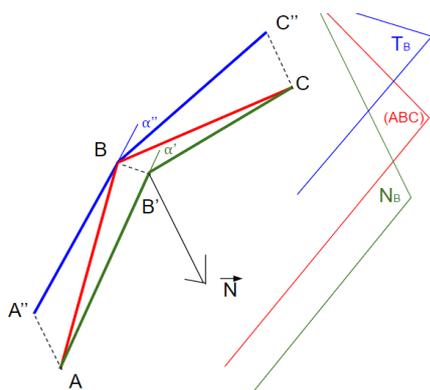


Figure 90 – Définition des plans en vue du calcul de la flexion biaxiale [Chef Q.]

Jusqu'à maintenant, l'algorithme ELASTICA considérait dans son calcul de flexion l'inertie faible des lattes ($I_{xx} = b * h^3 / 12$), donc comme si les lattes restaient dans leur flexion dans le plan perpendiculaire au plan local de la surface du gridshell.

En réalité, les lattes sont en flexion biaxiale. Rigoureusement, la contribution de l'inertie forte ($I_{yy} = h * b^3 / 12$) devrait donc être prise en compte. Pour ce faire, nous avons construit deux plans : un plan **T_B** qui est tangent à la coque au point **B** et un plan **N_B** qui contient la normale à la coque évaluée en ce point et la droite **(AC)**.

Prendre en compte la raideur en plan des membrures signifie que les plans **(ABC)** et **N_B** ne sont pas identiques. On projette alors le point **B** sur le plan **N_B** (on obtient **B'**) et les points **A** et **C** sur le plan **N_B** (formant **A''** et **C''**). On calcule alors les forces due à la flexion dans chacun des plans.

4.7.7. Résultats comparés des essais sur modèles physiques et numériques

Tableau 11 – Contribution de la raideur rotationnelle des nœuds et de la flexion en plan des membrures sur modèles numérique et physique échelle 1/10^{ème}.

Type d'essai	0,010 kg	0,011 kg	0,013kg	0,015 kg	0,016 kg	0,017 kg	0,018 kg	0,021kg	0,026 kg	0,027 kg
Relaxation dynamique avec nœuds articulés										
Relaxation dynamique avec frottements et assemblages lâches.										
Essais physique nœuds lâches										
Relaxation dynamique avec frottements et assemblages serrés.										
Relaxation dynamique avec frottements et assemblages serrés et flexion en plan										
Essais physique nœuds serrés										

Tableau 12 – Contribution de la raideur rotationnelle des nœuds sur modèles numérique et physique échelle 1/2.

Type d'essai	0,40 kg	0,45 kg	0,50 kg	0,55 kg	0,60 kg	0,65 kg
Relaxation dynamique avec nœuds articulés						
Relaxation dynamique avec frottements et assemblages lâches.						
Relaxation dynamique avec frottements et assemblages serrés.						
Essais physique nœuds serrés (résultats recalibrés)					?	

Tableau 13 – Contribution de la raideur rotationnelle des nœuds sur modèles numérique et physique échelle 1.

Type d'essai	0,9 kg	1,0 kg	1,1 kg	1,2 kg	1,3 kg	1,4 kg	1,5 kg	1,6 kg
Relaxation dynamique avec nœuds articulés								
Relaxation dynamique avec frottements et assemblages lâches.								
Relaxation dynamique avec frottements et assemblages serrés.								

On remarque que l'écart entre le modèle réduit et la simulation numérique diminue drastiquement lorsque la contribution de la raideur en rotation des nœuds est prise en compte dans le calcul : par exemple, cet écart n'est plus que de 4% sur un modèle à échelle 1/10^{ème}.

Cependant, prendre en compte ce paramètre requiert une évaluation hasardeuse du jeu réel dans les assemblages et de la force de serrage des écrous.

On observe en outre que la prise en compte de la contribution de la raideur en plan a un effet très limité sur les résultats.

La dernière observation est que la contribution de la raideur en rotation des nœuds décroît avec l'échelle du modèle. De ce fait – et concernant ce paramètre précisément – nous pouvons en conclure que la simulation numérique devrait donner des résultats proches de la réalité à l'échelle 1, et cela est encore plus vrai lorsque le gridshell est contreventé.



Figure 91 – Lors de nos simulations, une concentration de contrainte (95 – 105 MPa) est observée dans la zone de courbure maximale (a). À 65 kg, la valeur de la contrainte est supérieure à la limite de rupture du bois et la ruine de la maquette a lieu avant l'instabilité montrée par la simulation numérique (b).

4.7.8. Conclusions et applications

De cette étude, nous pouvons conclure que :

1. Pour des gridshells non contreventés, l'écart entre la force nodale de claquage obtenue par simulation numérique (avec nœuds articulés) et par essais de chargement sur modèle réduit physique semble provenir essentiellement de la raideur en rotation des nœuds (et de la difficulté à en rendre compte à échelle réduite).
2. La contribution de la flexion en plan semble bien moins significative.

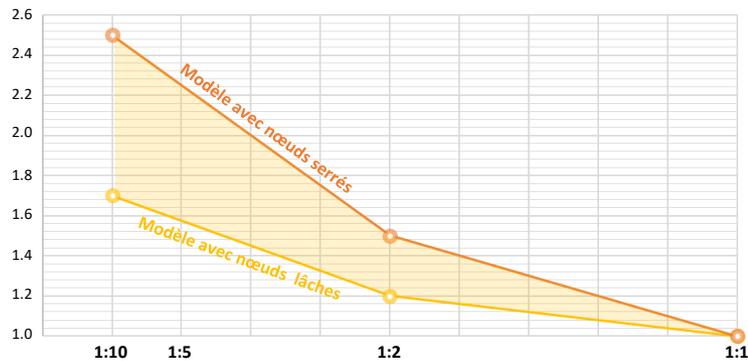


Figure 92 – Première proposition pour un coefficient de sécurité à appliquer sur les résultats d'essais d'un modèle non contreventé prenant en compte la non-linéarité du frottement et de la raideur des nœuds avec l'échelle.

3. Ces résultats doivent encore être confirmés, étant donné les biais possibles dans les essais et la sensibilité observée du comportement du gridshell envers eux. Nous avons mené environ dix essais de chargements, ce qui est encore trop peu pour correctement analyser leurs effets.
4. Quoi qu'il en soit, les simulations numériques avec des nœuds articulés aboutissent à des valeurs sécuritaires. Les essais sur modèles réduits tendent à surestimer le chargement critique de flambement de l'ouvrage.
5. Cette différence tend à décroître avec l'échelle des modèles réduits physiques. Les biais expérimentaux décroissent de même.
6. Les résultats obtenus dans l'étude de gridshells contreventés sont plus fiables, même sur des échelles réduites de modèles. Nous recommandons d'appliquer aux résultats numériques un coefficient supplémentaire de sécurité de l'ordre de 1,10 pour ce type de conception.
7. En réalité, la rupture a lieu avant les prédictions numériques du fait des contraintes engendrées par la déformation. Nous recommandons d'appliquer un facteur de sécurité supplémentaire de l'ordre de 1,15 sur les résultats d'une simulation numérique pour traduire cette simplification.

Grâce à cette étude, nous avons finalement pu extrapoler la résistance du gridshell élastique à membrures entrelacées Kagome. Les résultats, incluant les coefficients de sécurité défini ci-avant, sont les suivants :

- Simple lattage (plan asymétrique) : 2 essais Moyenne 8,82 kg/m² ; $s = 0,42$
- Double lattage (plan asymétrique) : 2 essais Moyenne 12,86 kg/m² ; $s = 0,33$
- Double lattage (plan symétrique) : 1 essai Moyenne 23,50 kg/m²

Sur la base de ces résultats, nous avons décidé de la conception de l'ouvrage finale : plan symétrique et double lattage.



Figure 93 – Essais de chargement des modèle réduits à échelle 1/10ème et 1/2 et photographie du gridshell Kagome [crédits photo : David Cousin-Marsy]

4.8. Conclusion sur le premier axe de recherche

Les gridshells élastiques constituent une solution à la fois efficace et écologique répondant à la problématique de couvrir des grandes surfaces rapidement et à bas coût. Avec la multihalle de Mannheim, Frei Otto a montré leur faisabilité à grande échelle. Pourtant depuis ce jour, peu de projets ont eu recours aux gridshells élastiques à ces fins.

Partant du constat de l'apparente complexité de cette typologie, qui nécessite contrairement à d'autres une étape de recherche de forme, un algorithme, appelé ELASTICA, a été développé dans le but précis de d'être à la fois utile aux designers – par son ergonomie et sa simplicité : il est entièrement développé sous Rhino + Grasshopper sans aucun recours à du code Python ou VBA – et aux ingénieurs ou aux calculateurs par l'accessibilité aux résultats (intermédiaires ou finaux) des calculs et par l'exhaustivité de l'accès aux inputs et aux outputs. C'est d'ailleurs ce dernier point qui nous distingue de solutions existantes comme Kangaroo.

Les résultats d'ELASTICA sur des maquettes numériques d'un projet test ont ensuite été comparés à ceux issus d'essais de chargement sur des maquettes physiques à échelles réduites. Un écart très significatif entre les résultats a été constaté, écart du même ordre de grandeur à celui déjà rapporté par Happold et Liddell dans leur étude de la multihalle de Mannheim. Une liste des facteurs possibles pouvant influencer la validité des résultats (numériques et physiques) a été proposée par ces deux chercheurs sans qu'ils les aient formellement quantifiés. Nous avons donc cherché à les mesurer. D'une part, des modifications ont été implémentées à l'algorithme ELASTICA afin de prendre en compte la raideur en rotation des nœuds et la flexion dans le plan des lattes. D'autres part, des modèles réduits physiques à plus grande échelle ont été testés en les chargeant afin d'observer comment évoluait l'écart entre les résultats physiques et numériques lorsque l'échelle de la maquette augmentait.

Les résultats sont à prendre avec prudence car il faudrait reproduire cette expérience un nombre suffisant de fois pour exclure tout autre biais de mesure. Il a cependant été constaté que la raideur en rotation des nœuds biaisait de façon très significative les résultats à petites échelles (de l'ordre du $1/10^e$), ce qui mène à la conclusion que les résultats numériques sont bien plus fiables que ceux obtenus sur de petites maquettes. A plus grande échelle ($1/2$), ces écarts sont en revanche bien moins significatifs et le résultat d'un essai de chargement sur modèle physique devient exploitable pour le projet.

Ces résultats préliminaires peuvent être utiles à tout concepteur réfléchissant à l'intégrité de son projet de gridshell sur des modèles numériques et des modèles réduits.



Credits photo : Olivier Leclere

5. Projet Baya : évolution du souple au raide dans la matérialité des coques structurelles réalisées grâce au tressage de fibres végétales

Les études de cette partie ont été menées en enseignement CTA « Explorer à l'échelle 1 » avec la participation des étudiants de l'ENSA-Paris-la-Villette : Wided Zina CHERIF, Mélanie BENTO, Victor BARDY, Marius BAUDURET, Albin BREUGNOT, Hanane GUIDOU, Marie MERLE, Morgan DANNENMÜLLER, Lu GAO, Agathe MOMBAZET, Robin PELOUR, Mathilde ARMENGAUD, Sara BOUKILI, Denisa MIHAES, Martin PROCUREUR, Léo PAUVAREL, Nathanaël THOMAS, Benoit ROYANNAIS, Annabelle CAMAIL, José Pablo SALINAS, Caroline LEGER, Maxence FRISSON, Sarah KLEIN, Francisco GARCIA CRUZ, Zahra ASADOLLAHI, Victoria GARCIA FLORES, Aurélie ANASTASI, Marius BAGREAUX, Louise BOUCHAUDON, Ronan LACROIX, Razan DAHAM, Anne-Louise DE MASSARY, Luis Gerardo LIZARRAGA ROMERO, Ana MIRANDA et Nicolas PREVOST, et de Centrale-Supélec Paris : Élodie ROBLIN, Jeanne BUGNET, Cornelia HULLER, Alice VILLATTE DE PEUFEILHOUX en co-encadrement avec Quentin CHEF.

5.1. Problématique : est-il possible de réaliser des coques structurelles tressées à l'échelle architecturale et, si oui, comment les concevoir et les optimiser ?

Nous venons d'étudier la conception et la fabrication des gridshells élastiques, un objet mis en forme souple avant raidi sans sa phase service. Ce procédé constructif n'est pas sans rappeler, à l'échelle de la matière, le travail du vannier qui courbe, entrelace et tresse des objets avec des fibres végétales encore vertes (ou trempées), avant que cette matière sèche et devienne rigide de telle sorte que l'objet formé est finalement assez raide dans sa phase de service.

L'art de la vannerie remonte au néolithique, et il est toujours utilisé aujourd'hui. Paniers en osier, meubles en rotin, abat-jours en lames tressées, nasses de pêche, hottes de vendanges, etc. : les exemples d'objets du quotidien viennent à l'esprit par centaines, mais qu'en est-il en architecture ?

Le monde de la construction est resté assez imperméable à la vannerie et quand elle y est utilisée, c'est surtout à des fins de remplissage. Les exemples d'architectures en tressage structurel sont rarissimes. Pourtant des habitats à structure tressée existent par milliers... dans le monde animal ! C'est notamment le cas du nid du tisserin de Baya. C'est en nous inspirant – entre autres – du nid de ce petit passereau d'Asie du Sud-Est, que nous avons voulu étudier la possibilité de transposer ce savoir-faire – avec le même type de matériaux – dans la structure pour l'architecture. L'objectif final étant de chercher des synergies entre la souplesse évolutive de la matière et celle du mode constructif des projets de franchissement ou de couverture de type gridshells élastiques.



Figure 94 – Nid de tisserin de Baya [crédits : Kalyan Varma].

Mais avant cela, nous devons comprendre **s'il est possible de réaliser des coques structurelles tressées à l'échelle architecturale ? Et, dans l'affirmative, quel serait le meilleur moyen de les concevoir et de les optimiser du point de vue de l'usage et de la mise en œuvre de la matière qui les compose ?**

5.2. Méthodologie

L'objectif de cette étude est donc de concevoir une méthodologie de construction de coques tressées porteuses et de l'appliquer à la réalisation de pavillons à échelle humaine suspendus aux branches des arbres du parc de la Butte du Chapeau Rouge dans le XIX^{ème} arrondissement de Paris. Nous l'appellerons le projet Baya, en référence au nid du tisserin de Baya qui nous a inspirés.

Son apport scientifique est d'apporter une réponse à une question qui s'est imposée à nous (et à propos de laquelle nous n'avons pas trouvé d'études dans la littérature) : **connaissant le champ des contraintes principales d'un coque chargée, existe-t-il une façon idéale de la tresser et, si oui, qu'elle est-elle ?**

Pour répondre à cette reformulation de la problématique, nous avons élaboré la méthodologie d'études suivante :

1. Nous avons d'abord étudié le fonctionnement mécanique d'éprouvettes surfaciques tressées soumises à des champs de contraintes. En faisant varier les paramètres du tressage et ceux des contraintes, nous avons cherché à obtenir des « lois » qui pourraient

modéliser le plus fidèlement possible le fonctionnement optimal de la matière tressée en fonction des sollicitations qu'elle subit.

2. Nous avons ensuite modifié le cœur de l'algorithme de relaxation dynamique ELASTICA présenté à la sous-partie précédente pour qu'il fournisse les champs des contraintes principales d'une coque quelconque soumise à un chargement donné. Nous avons ensuite nourri cet algorithme avec les « lois » de tressage optimal obtenues au point précédent pour que celui-ci soit capable d'établir le plan de tressage optimal de l'ensemble de la coque structurelle étudiée (sous un cas de charge donné). Ce nouvel outil algorithmique a été nommé BAYA.
3. Nous avons enfin confronté les résultats obtenus à l'expérience, pour cela nous avons – entre autres – soumis le nid du tisserin de Baya en tant qu'objet à l'algorithme BAYA pour obtenir son tressage « optimal ». Nous avons ensuite analysée par scanner laser, photogrammétrie et radiographie RX le nid tressé par le passereau et nous avons comparé les deux afin d'en tirer une conclusion rigoureuse sur la validité des premiers résultats de BAYA.
4. Enfin, nous avons appliqué les résultats de cette recherche à deux objets à échelle 1 : un pavillon suspendu et une passerelle piétonne de 12,80 mètres de portée.

5.3. Les nids : de la structure réciproque au tressage

Lorsque l'on réfléchit au fonctionnement d'un nid d'oiseau, la structure réciproque est la première idée qui vient à l'esprit. Cette typologie structurelle, dont le nom est attribué à Graham Brown en 1987 selon Danz [10], forme une surface constituée de poutres inclinées se soutenant mutuellement dans une sorte de circuit fermé sur lui-même.

Elle est régulièrement utilisée au Japon pour les charpentes de toiture ne nécessitant aucun pilier central. Le terme de nexorade est parfois employé pour définir les structures réciproques dans lesquels chaque élément, appelé pour l'occasion *nexor* (du latin nœud ou lien), est considéré comme infiniment rigide (équilibre par réciprocité des efforts tranchants et non en prenant en compte la souplesse flexionnelle des éléments, contrairement à un tressage par exemple). L'origine de cette sémantique est en général attribuée à Olivier Baverel.



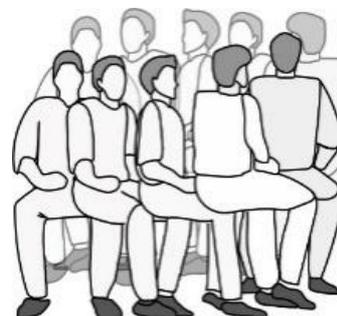
Figure 95 – Nid d'oiseau et projet Uchronia d'Arne Quinze.



Figure 96 – Exemples de structures réciproques : maquette par Charlotte Gambotti, pont militaire de Léonard de Vinci, pont arc-en-ciel à Kaifeng, musée de Stonemason (Yasufumi Kijima arch., Yoishi Kan ing.) [crédits : Kelkaku-Inc.], Hall d’exposition du théâtre du Bunraku Puppet à Seiwa (Kazuhiro Ishii arch.) [crédits : Kazuhiro Ishii].

Dans une structure réciproque, l’extrémité de chaque poutre repose sur la poutre suivante qui la supporte, formant un ensemble circulairement fermé puisque la dernière poutre est finalement posée sur la première. La défaillance d’une seule poutre entraîne celle de l’ensemble.

Figure 97 – Exemple anthropomorphique de structure réciproque par Olivier Prévost [40] : la ronde de personnes assises, le poids d’une personne est reporté sur celle qui la précède et ainsi de suite jusqu’à la dernière personne qui se tient sur la première. Chaque personne du cercle a besoin de la précédente pour être stable, si une seule faillit, c’est tout le cercle qui s’effondre [Merle M., Gao L., Camail A. et Salinas J.P. – CTA EE1].



Ce type de structure est également utilisé pour réaliser des planchers. Villard de Honnecourt, maître d’œuvre dans le bâtiment, décrit par exemple dans son carnet de dessin (1225-1250) une méthode réciproque pour « *construire une maison ou une tour lorsque les poutres de bois sont trop courtes* » (une pénurie de bois sévit en Europe dans la seconde moitié du Moyen-Âge). En 1537, Sebastiano Serlio, peintre et architecte bolognais, propose dans le cinquième livre de son traité d’architecture un nouveau plafond réciproque de quinze pieds de côté composé de poutres de quatorze pieds. Il y note que « *la structure serait assez solide* ».

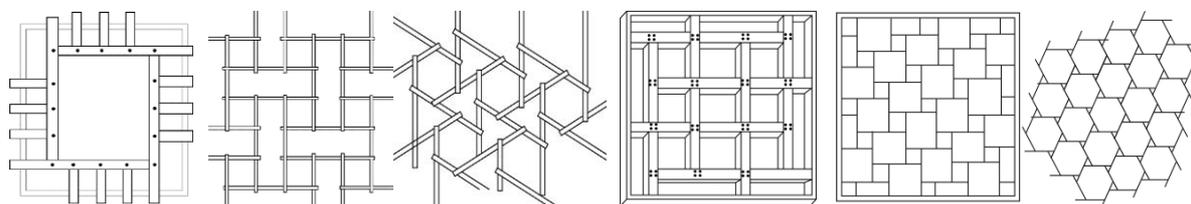


Figure 98 – De gauche à droite : plancher Honnecourt, schémas de deux configurations spatiales par Léonard de Vinci in Codex Atlanticus, fol. 899v, schéma du sol Serlio et deux exemples de motifs réciproques de John Wellis.

Notons d'ailleurs que ces structures sont régulièrement décrites dans la littérature comme efficaces et économes en matière. Il convient de contextualiser ces affirmations. En effet, nous avons comparé le dimensionnement d'un plancher « classique » à poutres et solives avec celui d'un plancher Honnecourt de mêmes dimensions en plan dans le cadre d'un projet fictif de logement.

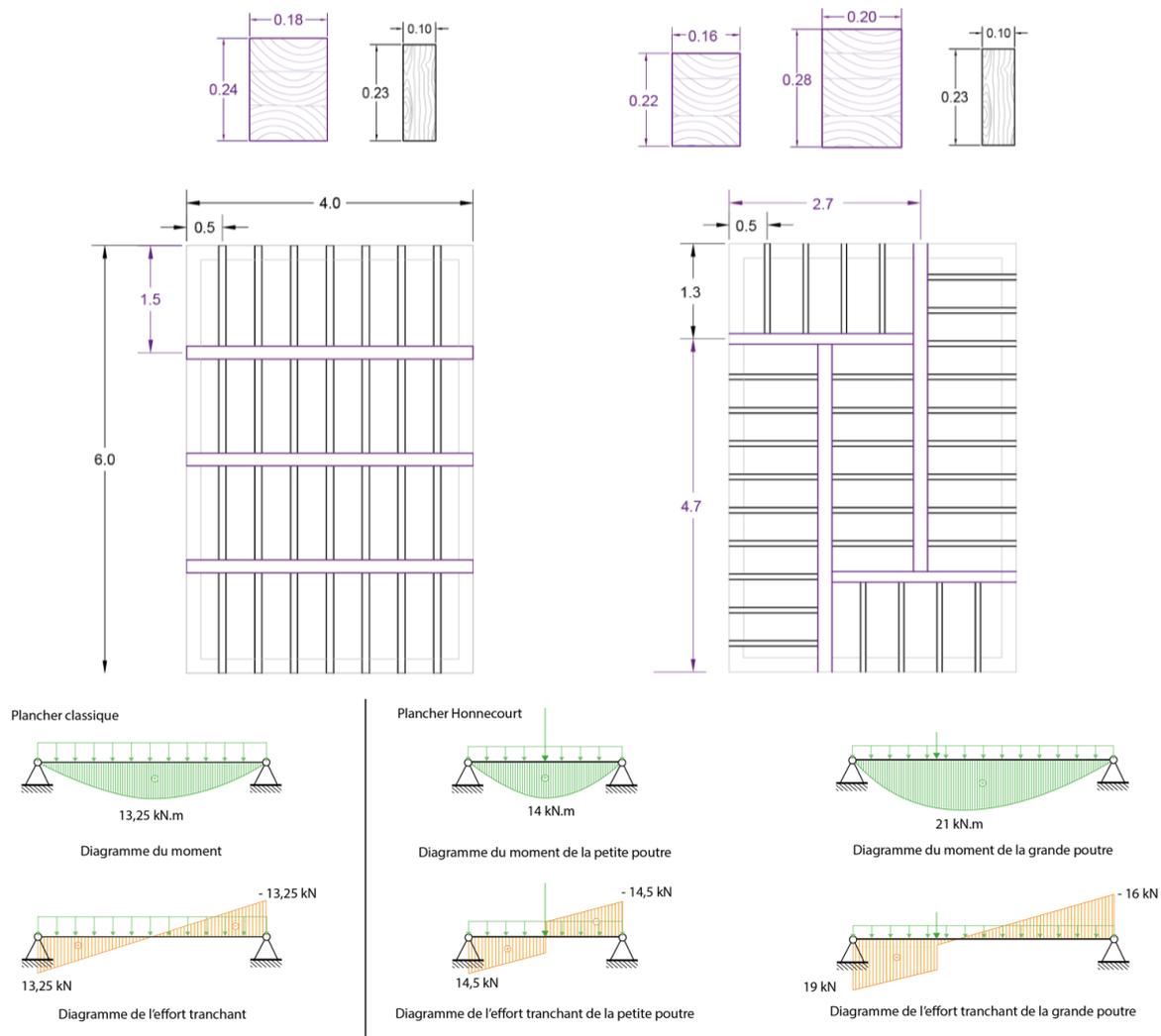


Figure 99 – Plan et cotes des planchers et des poutres, diagrammes du moment fléchissant et de l'effort tranchant dans les poutres principales du plancher classique et Honnecourt, et dimensions des éléments calculées [Merle M. – CTA EE1].

Le volume de bois nécessaire à chacun des deux planchers est sensiblement le même : $1,48 \text{ m}^3$ pour le plancher classique et $1,58 \text{ m}^3$ pour le plancher Honnecourt, et serait quasiment identique entre les deux solutions pour un plancher carré. Le plancher Honnecourt ne permet pas forcément de faire des économies en termes d'efforts et donc de quantité de matière.

Cette conclusion portée sur un plancher rectangulaire – le cas le plus fréquent en logements – serait différente sur un plancher carré : le volume de bois nécessaire serait quasiment le même entre les deux solutions, mais le plancher Honnecourt possède néanmoins l'atout de pouvoir être réalisé avec des éléments moins longs et donc plus facile à trouver localement (la mise en œuvre est toutefois plus complexe). Une étude complète devrait aussi être menée sur différentes

portées, afin d'étudier l'efficacité sur des couvertures d'édifices publics (portées de l'ordre de 10 m) et d'équipement (20 – 30 m). Nous conduirons ces études en CTA « Explorer à l'échelle 1 » dans les années futures.

Cela s'explique assez facilement par l'analyse structurale de la typologie : les forces verticales sont transmises par effort tranchant au point de l'appui réciproque d'une poutre sur l'autre, mettant chaque élément en flexion sur toute sa longueur. Le bois fonctionnant mal vis-à-vis des forces perpendiculaires aux fibres, ce fonctionnement limite *de facto* l'efficacité des solutions réciproques réalisées avec ce matériau.

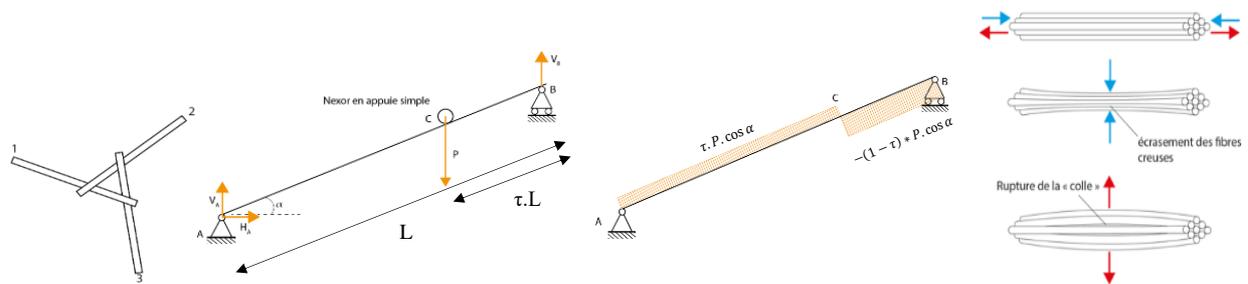


Figure 100 – Plan d'une nexorade, schéma statique d'une des poutres qui la compose, diagramme de l'effort tranchant [Merle M. – CTA EE1] et principe du comportement mécanique du bois, un matériau sensible aux sollicitations ponctuelles perpendiculaires aux fibres [29].

Cependant, on peut faire l'objection que si on retire un brin d'un nid d'oiseau, celui-ci ne s'effondre pas complètement. Il est même probable qu'il ne se passerait rien de très significatif. En outre, certains oiseaux tel le tisserin de Baya courbent leur brin pour qu'il sollicite par flexion, sur toute sa longueur, de nombreux autres brins.

Cette méthode de construction est toujours analogue à une structure réciproque : chaque brin, par sa flexion, appuie sur les brins qu'il entrelace, générant ainsi une force de cisaillement et de frottement sur eux, et vice-versa. L'introduction dans la structure réciproque de la flexion, et la mobilisation ainsi rendue possible pour chaque élément des nombreux autres éléments qui l'intersectent, nous conduisent cependant vers une nouvelle typologie structurale de cette grande famille des structures réciproques : celle des objets tressés sur lesquels repose l'art de la vannerie.

5.4. Les tressages : un aperçu de l'état de l'art de la vannerie et de ses applications à l'architecture

La vannerie est à la fois un art et une technique artisanale dont le produit est la création d'objets par tressage de fibres végétales. Rappelons ici qu'on utilise souvent, à tort, les termes tissage et tressage comme des synonymes.

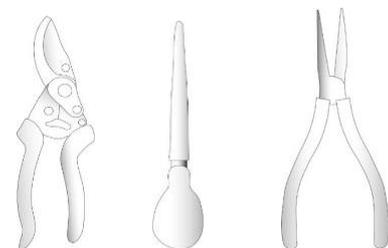


Figure 101 – Outils du vannier : sécateur, poinçon, pinces [Dannenmüller M. – CTA EE1].

En ce qui concerne la surface issue de l'art de la vannerie, et essentiellement du fait de sa capacité à pouvoir reprendre des efforts de compression, nous emploierons dorénavant dans notre étude le verbe tresser.

Origines : la vannerie est apparue avant même la poterie et le travail du bois et des métaux. Elle était utilisée pour créer des barrières naturelles pour se protéger des animaux (plessage des haies). Les premières traces retrouvées remontent au néolithique (négatifs de moules tressés sur des poteries en argile) et les plus anciens ouvrages de vanneries retrouvés ont été exhumés à Fayum (haute Égypte) et ont été datés de plus de 10 000 ans.



Figure 102 – Plessage de haie [photo : Vincent Jones].

On retrouve largement la trace d'objets issus de cet art à l'époque sumérienne – vers 4000 ans avant notre ère – où il semble que la vannerie s'est déjà étendue à une vaste panoplie d'applications, allant des ustensiles du quotidien à des éléments de l'architecture de la maison en passant notamment par le mobilier. Cependant, et comme pour l'usage du béton par exemple, il convient de rappeler qu'ici comme toujours, l'être humain n'a fait qu'imiter une technique déjà maîtrisée depuis longtemps par les animaux.



Figure 103 – Exemples de tressages dans la nature : républicains social (en haut à gauche te au centre) [Diego Delso, delso.photo, License CC-BY-SA et Bento M. et Guidou H. – CTA EE1], cassiques (en haut à droite) [Tanguy Deville] et fourmis tisserandes (en bas) [Frawsy Eklablog & Bernard Dupont].

On retrouve d'ailleurs des applications de la vannerie dans les habitats primitifs ou vernaculaires, probablement inspirés des tressages réalisés par les animaux.

C'est le cas par exemple en Ethiopie, dans la montagne Guge, où les membres de la tribu Dorzé construisent leurs habitations en tressant des huttes en forme d'ogive avec des palmes de faux bananiers sur des cadres en bambous et tiges de bois local. La structure, légère, peut se soulever à trois ou quatre personnes pour être déplacée. Elles sont initialement construites très hautes, environ 10 à 12 mètres du fait de la présence de termites qui détruisent, en les dévorant, les soubassements des huttes qui voient alors leur hauteur diminuer progressivement dans le temps ! Cet habitat a une durée de vie moyenne de 60 ans, et peut perdurer jusqu'à 80 ans.



Figure 104 – Huttes du village Chench (peuple Dorzé) en construction (en haut à gauche) ([Kevin Smith], et huttes du lac Turkana (en haut à droite et en bas) [Eric Lafforgue, Bjorn Svensson, Alamy & Richardandmarthashaw.blogspot.com].

Quelques exemples sont également à citer dans l'architecture moderne. Cependant tous, sauf de rares exceptions, ont en commun que le tressage n'y est utilisé que comme élément de remplissage : il n'est pas « structurel ». Rappelons à cette occasion que la définition communément admise d'un élément structurel est celle d'un composant de l'édifice participant au cheminement des efforts vers les fondations.



Figure 105 – Un Mudhif en Irak [photo : Hassan Janali, U.S. Army Corps of Engineers].

C'est la raison pour laquelle nous avons voulu réfléchir à la possibilité d'utiliser le tressage de fibres pour la réalisation de coques porteuses.



Figure 106 – Projet éphémère Beaubourg construit par Nikolay Polissky dans le parc Nikola-Levinet, région de Kaluga (en haut) et tunnel en bambou par Wang Wen Chih (en bas) [Cave Urban].



Figure 107 – Projet « Weaver's Nest » par Porky Hefer d'Animal Farm (matériaux et techniques de fabrication d'Afrique du Sud sur cadre en acier) et deux autres projets du même bureau d'études (en bas au centre et à droite) [Deezen & Animal Farm].



Figure 108 – Les magnifiques coques tressées en entrelacs de l’artiste Laura Ellen Bacon font écho à notre recherche par leur dimension architecturale et par l’absence – à notre connaissance – de sous-structure porteuse. Notre réflexion s’en éloigne toutefois par la quantité de chargement que doit reprendre un projet à l’intention d’usagers [photos : Laura Ellen Bacon].

5.5. Le choix du matériau de l'étude

Nb. Dans ce qui suit, f_{yt} [MPa] désigne la limite d'élasticité du matériau, E [MPa] son module d'élasticité et k_{def} son coefficient de fluage.

Avec l'aide de Roger Hérisset [25], expert en vannerie et docteur en ethnologie à l'Université de Bretagne Occidentale, nous avons sélectionnés les matériaux de notre étude à l'issue d'une analyse multicritères, chaque critère ayant une importance pondérée de 0 à 5.

1. La facilité de mise en œuvre **M1** : d'un point de vue pratique, le tressage étant un savoir-faire accessible au terme d'un apprentissage spécifique. Le nôtre étant basique, puisque nous n'avons nulle prétention vis-à-vis à notre maîtrise de l'art de de la vannerie, nous attribuons à ce critère une pondération de 4.
2. La disponibilité et la provenance **M2** : certains matériaux de vannerie sont difficiles à trouver en quantité et à coût raisonnable pour réaliser un projet de cette taille. Suivre les traditions des vanniers français permet aussi d'intégrer au choix l'origine locale ou non du matériau. Même si à l'échelle du projet ce critère est relatif, notre ambition est de proposer une étude globale et transposable à de nombreux autres projets. Elle se doit donc de considérer l'impact environnemental comme une donnée à ne pas négliger. **M2**, qui a une pondération de 3, est obtenu par le produit d'une note sur la disponibilité du matériau préparé (lame formée, séchage, traitement, etc.), et sur son origine (par ordre de préférence : Île-de-France, France, Europe, autres continents).
3. Le coût **M3** = f_{yt} / C_l : comme nous le démontrons ci-après, le critère dimensionnant pour notre projet de coque suspendues est la résistance à la traction, la quantité de matière à mettre en œuvre dans de larges zones du projet à construire étant inversement proportionnelle à la limite élastique en traction f_{yt} (MPa). Ainsi, maximiser le rapport résistance/coût revient à minimiser le coût global de la structure. Nous attribuons à ce critère un coefficient de pondération de 5.
4. La durabilité **M4** = $E / (1 + k_{def})$. Il est difficile de trouver des données quantitatives dans la littérature à ce sujet. Dans un premier temps, nous cherchons donc un matériau raide (module d'Young E élevé), afin de limiter la déformation initiale, avec un coefficient de fluage k_{def} le plus faible possible pour limiter la déformation sous chargement de long terme, qui est égale à la déformée initiale sous ce même chargement multipliée par $(1 + k_{def})$. Le critère considère aussi la résistance aux attaques liées à l'humidité, fongiques ou dues aux insectes. Il s'agit donc de maximiser le critère **M4**. Toutefois, le projet Baya est temporaire : nous lui attribuons un coefficient de pondération de 2.

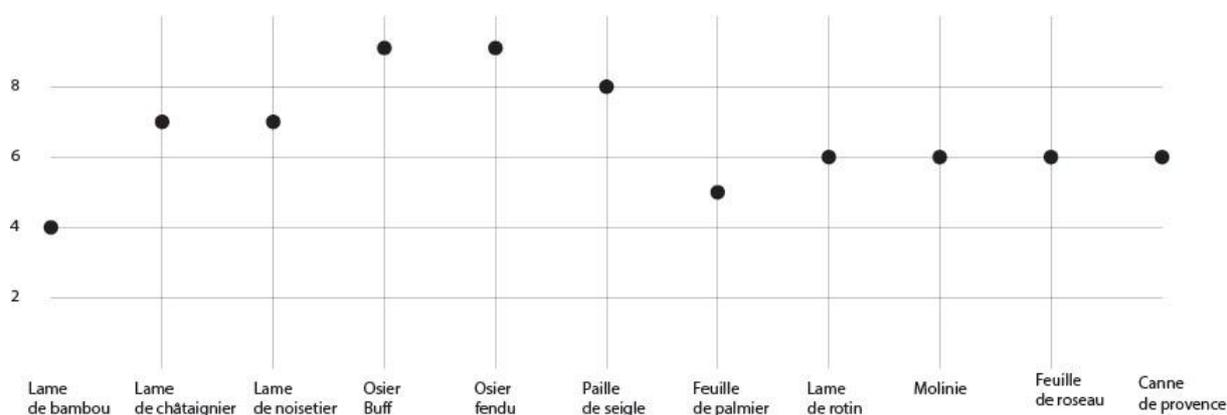


Figure 109 – Résultats de l'analyse multicritères [Dannenmüller M. – CTA EE1].

Cette analyse, menée sur l'osier blanc, l'osier buff, l'osier fendu, le rotin, les éclisses de châtaignier, la canne de Provence, les lames de bambou, la molinie, les lames de noisetier, la paille de seigle et la feuille de palmier, a permis de retenir trois matériaux pour le projet : l'osier buff, l'osier fendu et les lames de rotin.

À noter :

- L'analyse multicritère gagnerait à être précisée et complétée par d'autres critères, souvent propres au projet. Par exemple, d'aucuns pourraient être surpris que la paille de seigle ait une si bonne note. Cela vient du fait que le critère mécanique a été défini exclusivement en fonction de la résistance à la traction. Or, nombreux peuvent être les projets ou les utilisations pour lesquelles la résistance à compression et au flambement seront aussi déterminants. Prendre en compte ce paramètre dans l'analyse multicritère aura un effet significatif sur ce classement. Cela souligne l'importance de la contextualisation du choix de la fibre.
- Pour des raisons de disponibilité au moment précis de la commande des matériaux, le pavillon Baya a finalement été réalisé en osier traité à l'autoclave, qui résiste mieux encore que l'osier buff aux altérations liées à l'humidité.

* * *

On obtient l'osier à partir des tiges de boutures de saules qui peuvent atteindre jusqu'à 3,5 m. Un champ de saules pour l'osier peut durer deux à trois décennies avec une coupe annuelle et demande peu d'entretien.



Figure 110 – Champs d’osier de la Vannerie de Villaine-les-Rochers : au premier plan du Noir de Villaine, puis de la Grisette et du Vinimalis Pêcher jaune à gauche ; Noir de Villaine et osier jaune à droite [Photos par Prévost N. lors de sa visite en vue de la construction d’une passerelle en osier avec l’algorithme BAYA pour les Utopies Constructives de Richelieu].

Selon Mellgren [35], leur récolte se fait en hiver sur les souches des saules. On différencie principalement quatre types d’osiers. L’osier vert tout juste récolté n’est pas utilisé en vannerie. L’osier est brut sec lorsqu’il est déshydraté naturellement, les bottes placées debout pendant deux à trois mois.

Après les avoir séchées, on peut écorcer les tiges. Soit en immergeant leur pied et les plaçant dans un lieu chaud permettant à la sève de « circuler à nouveau » et à l’écorce de se détacher (osier blanc). Soit en cuisant l’osier dans de l’eau bouillante pendant trois à cinq heures (osier buff). Par la suite, l’osier est à nouveau séché. Il sera laissé dans de l’eau pendant 8 à 15 jours avant son tressage afin de l’assouplir.



Figure 111 – De gauche à droite : osier brut sec [Wicker Paradise], osier blanc et osier buff.

Les plus grosses tiges d'osier peuvent éventuellement être refendues afin de former des éclisses, soit à sec, soit après un trempage de plusieurs heures. On entaille alors en trois ou quatre parties l'extrémité de la tige à l'aide d'une serpette, avant que celle-ci soit fendue sur toute sa longueur grâce à un fendoir en bois. Les éclisses sont enfin obtenues après passage dans une éclisseuse ou un trusquin.

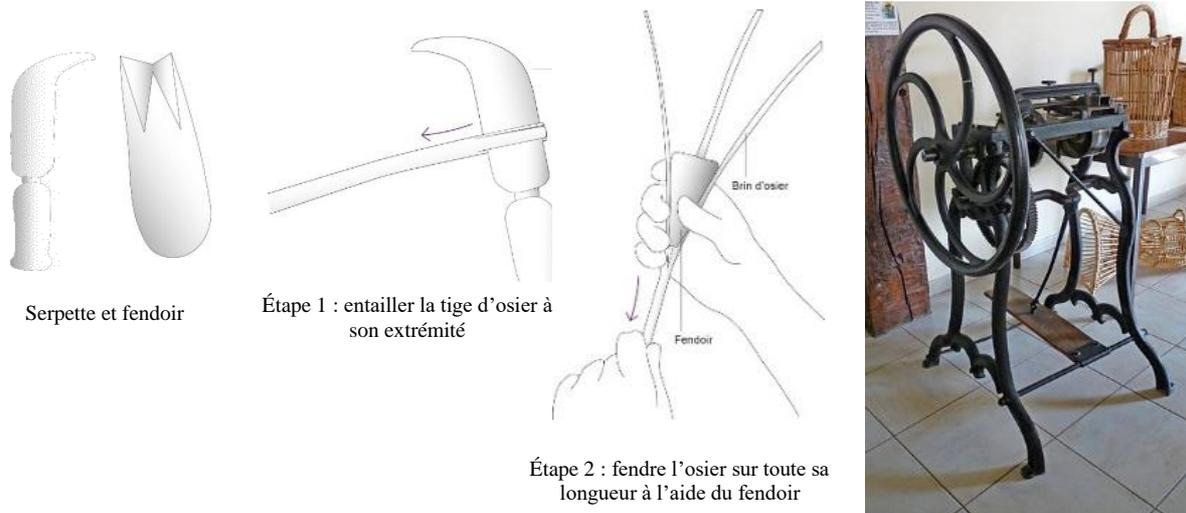


Figure 112 – Fendage de l'osier [Dannenmüller M. – CTA EE1] et photo d'une éclisseuse [Ji-Elle].

Le rotin est également très couramment utilisé en vannerie, notamment pour la confection de meubles. Sa production étant issue des palmiers rampants parfois épineux, il est généralement originaire des régions tropicales. Les tiges de rotin font entre 3 et 10 mm de diamètre.

Les troncs des palmiers sont abattus à la base avant d'être débités en baguettes. Celles-ci sont dégagées des feuilles et épines et séchées au soleil. À l'aide d'une fendeuse, on peut en obtenir deux types de matériaux à tresser comme l'expliquent Duchesnes, Ferrand et Thomas [17] : « des lamelles ou éclisses de la région externe » et de « la moelle ronde de l'intérieur » utilisée pour la vannerie fine. Pour le calibrage, les éclisses passent dans une planeuse et les moelles dans une filière.

Il existe de très nombreuses techniques de tressages, celles que nous avons voulu utiliser étant principalement la vannerie crocane et en nappe. En réalité, du fait des plans de tressages non réguliers fournis par BAYA – que nous allons détailler dans les parties suivantes – le résultat évoque beaucoup les entrelacs utilisés par exemple par l'artiste Laura Ellen Bacon. Cette technique, dont le nom est issu du verbe entrelacer, donne toutefois le sentiment d'un aspect aléatoire dont – étant donné l'objectif même de notre recherche qui est d'optimiser mécaniquement le tressage – il conviendra de s'éloigner.

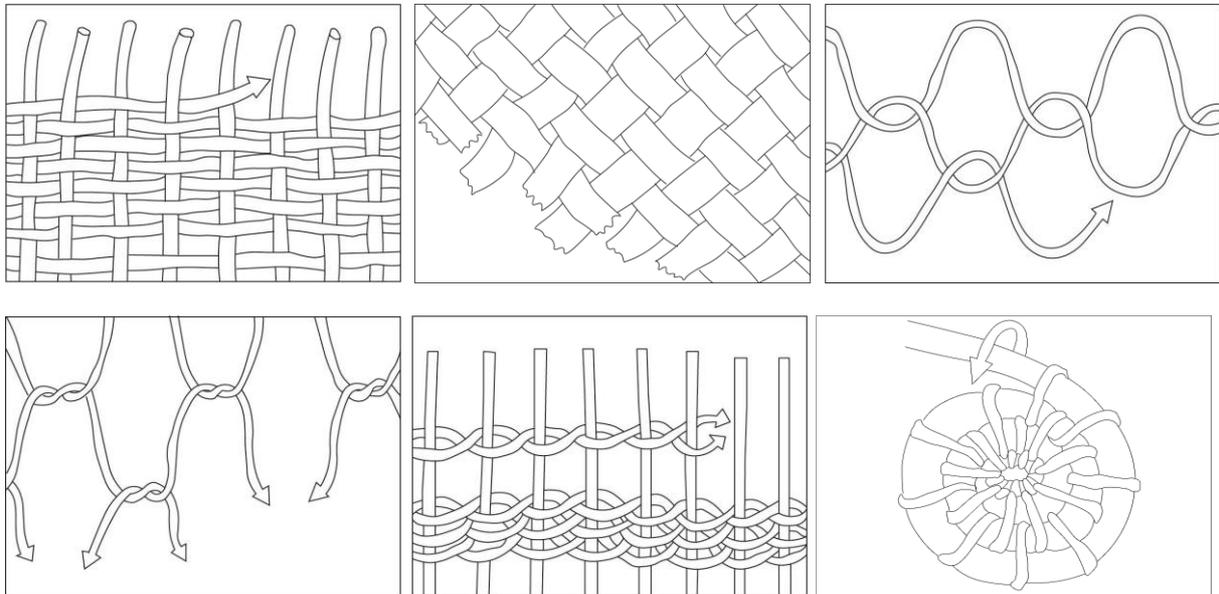


Figure 113 – De gauche à droite et de haut en bas : vannerie crocane, en nappe, de boucles, torche, en nœuds et spiralée [Dannenmüller M. – CTA EE1].

5.6. Conception de l’algorithme BAYA

5.6.1. Problématique et méthodologie

Notre objectif est de transposer le savoir-faire du vannier à une œuvre architecturale. Notre projet, Baya, est un pavillon suspendu, mais la réflexion que nous menons est plus large : elle doit être applicable à toute surface chargée, aussi bien des coques que des ouvrages simples et plans de type poutre.

Ces surfaces forment l’intégralité de la structure de l’ouvrage. Elles reprennent les charges et permettent leur cheminement en leur sein afin de les drainer jusqu’au support. Se faisant, les charges circulent dans toute l’épaisseur de la surface de la coque et font subir à cette dernière des contraintes de traction et de compression. **Notre problématique est d’étudier ces champs de contraintes et de s’interroger sur l’existence d’un tressage optimal de la coque vis-à-vis de ceux-ci.**

Notre méthodologie d’étude consiste :

- **En l’observation du comportement général des tressages soumis à des champs de contraintes, sur des éprouvettes de 30x30 cm.**
- **En la déduction des relations entre les caractéristiques géométriques du tressage et son comportement mécanique lorsqu’on lui fait subir un champ de forces donné.**

- **A nourrir de ces résultats un algorithme, nommé BAYA, capable de donner le tressage optimal de n'importe quelle coque structurelle sous différents cas de charges.**

5.6.2. Les lois de tressage optimal

Méthodologie : notre simulation numérique est menée par relaxation dynamique, méthode qui permet de résoudre des problèmes d'équilibre statique par un calcul dynamique fictif dont nous avons expliqué le fonctionnement général au paragraphe 4.4.3 *La relaxation dynamique*.

Dans un tressage plan contraint dans son plan, nous observons trois types de forces : les forces dues à la flexion des brins que l'on doit courber pour passer au-dessus puis au-dessous des brins de l'autre nappe, les forces de rappel liées à la déformation axiale des brins (loi de Hooke) et les forces de frottement aux nœuds. Sachant que nous pouvons déduire ces dernières de l'analyse par la loi de Hooke de l'effort normal dans des barres fictives reliant les deux nappes à chaque nœud, nous constatons que seules la force de rappel et la force de flexion sont nécessaires pour simuler le comportement d'un tressage dans le cadre de cette modélisation. Il s'agit donc des mêmes forces que l'on retrouve dans la relaxation dynamique des gridshells élastiques (dont on négligerait le poids propre).

De cette constatation, le choix a été fait de réutiliser le cœur de l'algorithme ELASTICA, en le modifiant de sorte à pouvoir étudier la réaction d'une éprouvette tressée soumise à un champ de contraintes en compression et de traction (de façon à simuler les contraintes principales d'une coque structurelle chargée). L'objectif est de comprendre l'influence des différents paramètres des tressages listés ci-après.

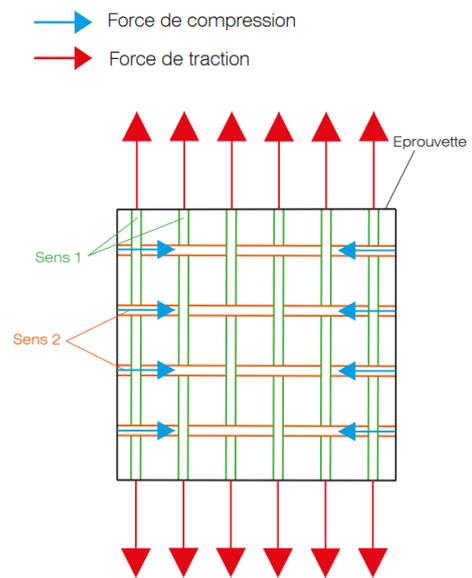


Figure 114 – Schéma d'une éprouvette tressée soumise à un champ de contraintes donné [Cherif W. – CTA EE1].

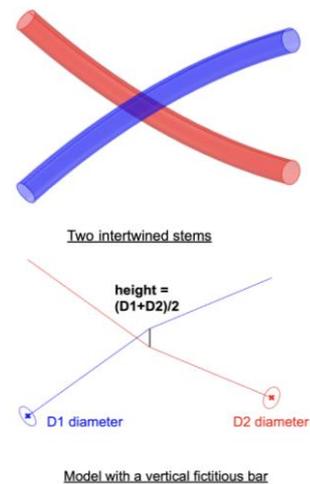


Figure 115 – Barres fictives simulant les forces de frottements aux nœuds [Chef Q. – CTA EE1].

Le matériau (paramètre fixe) : l'expérience est initialement menée sur un des trois des matériaux sélectionnés pour le projet Baya : des tiges rondes en osier. Elles sont modélisées par leurs caractéristiques géométriques et mécaniques : les dimensions de la section des brins – le diamètre est par simplification supposé constant sur la longueur de la tige –, le module d'élasticité E et les contraintes limites élastiques en traction et en compression respectivement f_{yt} et f_{yc} . Dans la littérature, les propriétés mécaniques varient nettement en fonction de l'espèce, du lieu de culture et des procédés de transformation. On retient dans l'algorithme pour l'osier : $E = 3000$ MPa ; $f_{yt} = f_{yc} = 25$ MPa. Des expériences sont prévues dans le futur afin d'estimer plus précisément ces caractéristiques mécaniques.

Paramètres d'entrée : géométrie de l'éprouvette et chargement extérieur. Le tressage est un ensemble de brins, tressés dans deux directions, ou nappes, différentes. Dans chacune des directions, les brins sont parallèles entre eux, et passent alternativement au-dessus et au-dessous des brins de l'autre direction. Il s'agit d'une modélisation idéalisée d'un tressage par entrelac : dans les faits, nous constatons que le vannier peut parfois sauter un ou deux brins d'une nappe avant de repasser au-dessus ou au-dessous.

L'éprouvette est soumise à des efforts qui simulent le champ de contraintes principales dans la coque (il représente deux directions de contraintes orthogonales au niveau de l'élément fini considéré, lequel a été orienté de sorte à ne subir que des efforts normaux et aucun effort tangentiel). La première contrainte représente la contrainte principale maximale et la seconde la contrainte principale minimale. La simulation des différents champs de contraintes principales dépend donc uniquement des deux paramètres suivants :

- Traction / Compression.
- **La valeur $F_{\sigma 1}$ et $F_{\sigma 2}$ des efforts** (en N/ml) respectivement dans le sens 1 et dans le sens 2 ($|F_{\sigma 1}| \leq |F_{\sigma 2}|$).

Une fois le matériau paramétré, la géométrie de l'éprouvette est définie par quatre paramètres :

- Les densités de tressage n_1 et n_2 de chacune des nappes (en nombre de brins par ml).
- L'orientation α du tressage par rapport au champ de contraintes principales (angle de la nappe du sens 1 par rapport aux forces orthogonales exercées sur l'éprouvette).
- L'angle θ de tressage : angle entre les deux nappes du tressage.

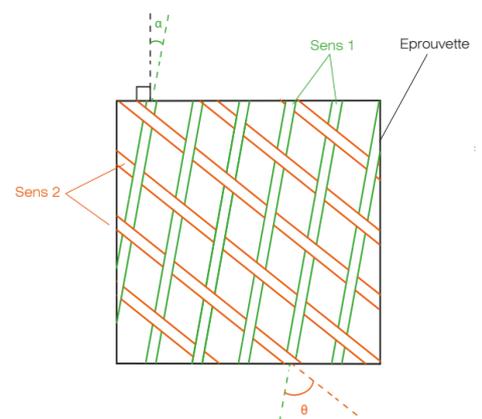


Figure 116 – schéma de principe de l'expérience numérique [Roblin E. – CTA EE1].

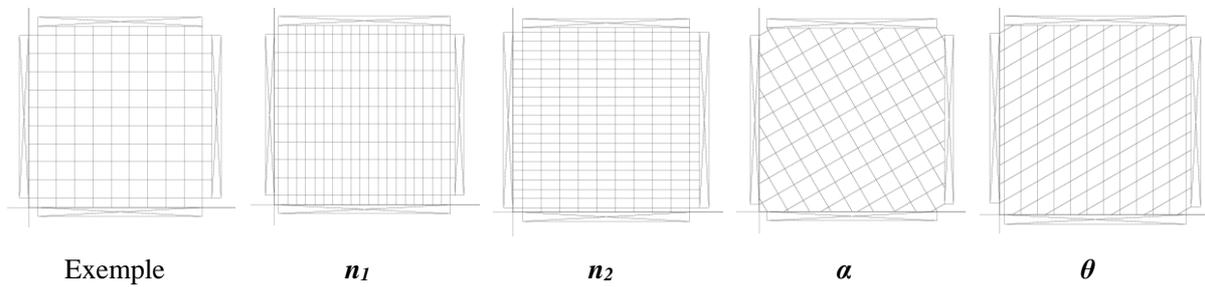


Figure 117 – Exemples de variations des différents paramètres définissant la géométrie du tressage de l'éprouvette [Chef Q. – CTA EE1].

Tableau 14 – Paramètres d'entrée et pas des essais.

Paramètres d'entrée	Symbole	Unité	Plage de variation	Pas des essais
Valeur de la force 1	$F_{\sigma 1}$	N	150 - 10000 N	1000 N
Valeur de la force 2	$F_{\sigma 2}$	N	100 - Min($F_{\sigma 1}$; 4000N)	500 N
Densité de tressage dans le sens 1	n_1	u/ml	10	n/a
Densité de tressage dans le sens 2	n_2	u/ml	10	n/a
Angle de tressage	α	Degrés (°)	0 - 45°	5°
Orientation du tressage dans l'éprouvette	θ	Degrés (°)	0 - 45°	5°

En sortie, l'algorithme fournit la position des nœuds à l'état final. Connaissant leur position initiale, on peut calculer les efforts subis par chacune des barres, réelles ou fictives, et mesurer le déplacement ou la rotation des brins. À l'issue de chaque essai, les grandeurs du tableau ci-dessous sont mesurées, à partir desquelles les vérifications des modes de ruines sont menées.

Tableau 15 – Paramètres de sorties et vérifications.

Paramètres de sortie	Symbole	Unité	Vérifications	Critère
Traction maximale dans les brins	T_{max}	N	V1 – Résistance élastique	$T_{max} \leq f_{yt}$ et $C_{max} \leq f_{yc}$
Compression maximale dans les brins	C_{max}	N	V2 – Flambement local	$C_{max} \leq \pi^2 EI / (2l_b)^2$
Différentiel maximal d'effort normal entre deux brins consécutifs	ΔN_{max}	N	V3 – Non-glisement des nœuds	$\alpha' \cdot V \leq \Delta N_{max}$ avec α' le coefficient de frottement statique osier-osier
Forces de compression dans les barres fictives aux nœuds	V	N	V4 – Non-rotation des nœuds	$EI \cdot \sin(\rho) / l_{mesh} \leq \alpha' \cdot V \cdot R$ avec ρ = angle entre 2 brins ; R = rayon de contact de la surface
Déformation maximale	d	mm	V5 – Non-voilement	Convergence de la courbe d'énergie cinétique + éprouvette plane

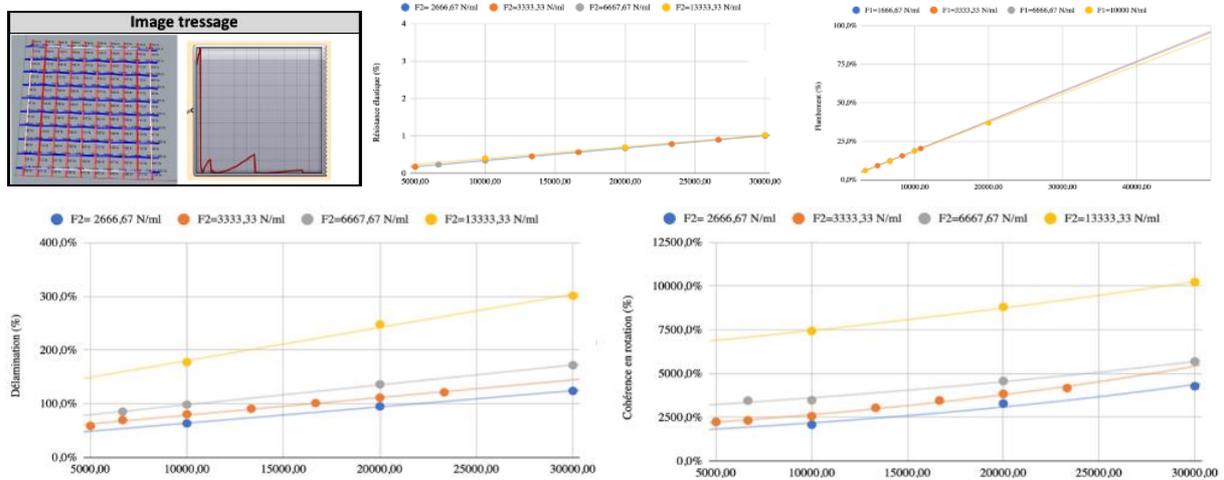


Figure 118 – Résultats des essais exemples de graphiques des critères de vérification **V1**, **V2**, **V3**, **V4** en fonction de $F_{\sigma 1}$; au sein d'un même graphique, chaque courbe correspond à une valeur de $F_{\sigma 2}$ différente.

L'étude de l'éprouvette numérique nous a enseigné les principes suivants :

- Comme attendu, le rapport T_{max} / f_{yt} est une fonction linéaire dépendant de $F_{\sigma 1}$
- Le flambement local (C_{max} comparé à la force critique d'Euler) n'est pas dimensionnant avec des valeurs usuelles de densités n_1 et n_2 .
- Le flambement global hors plan de l'éprouvette dépend principalement de la force de compression $F_{\sigma 2}$
- Les forces de frottement augmentent avec $F_{\sigma 1}$ et diminuent avec $F_{\sigma 2}$; ce qui explique que le mode de ruine par instabilité a lieu pour des valeurs de compressions faibles lorsque la tension perpendiculaire n'est pas suffisante pour assurer un contact suffisant au niveau des nœuds (augmentation de la longueur de flambement).
- Des valeurs élevées de $F_{\sigma 2}$ conduisent à des glissements en translation et en rotation au niveau des nœuds, parfois même à des décompressions de ces derniers.
- L'angle de tressage θ n'a que peu d'influence tant que les forces principales maximales en entrée sont presque parallèles aux brins du sens 1 (α proche de zéro) ; ce qui légitimise l'idée de tresser dans la même direction que les contraintes principales maximales de la coque.

Le détail des principes de tressage optimal des coques structurales est donné en Annexe 2.

5.6.3. L'algorithme BAYA de tressage optimal des coques architectoniques

L'algorithme BAYA détermine les champs de contraintes principales pour une coque quelconque sous un chargement donné. Grâce aux lois de tressage optimal qui précèdent, il est capable de donner le tressage idéal pour la réalisation de la coque. L'algorithme pouvant s'appliquer à toute surface chargée, y compris les objets de vanneries tels que les paniers, nous avons choisi d'illustrer sa présentation sur une poutre isostatique sur deux appuis chargée par une force uniformément répartie.

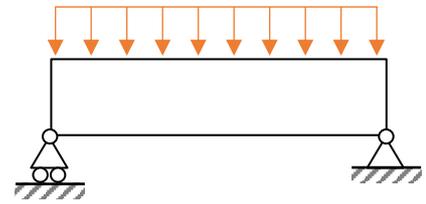


Figure 119 – Schéma de la poutre à tresser.

Les principales étapes clés réalisées par BAYA sont alors les suivantes :

1. Géométrie de la coque étudiée (input) : la surface de la coque, la position des points d'appuis et les chargements sont les données d'entrée de l'algorithme BAYA.
2. Maillage de la coque en éléments finis : La surface est discrétisée en triangles isocèles rectangles de petites dimensions, représentant chacun un élément fini de celle-ci.
3. Obtention des efforts : dans les arrêtes des éléments finis par relaxation dynamique.
4. Obtention des champs des contraintes principales : déduits des efforts par calage de la plus grande contrainte principale sur la réaction d'appui la plus grande du triangle isocèle rectangle.
5. Tressage de la coque : en utilisant les lois définies ci-avant

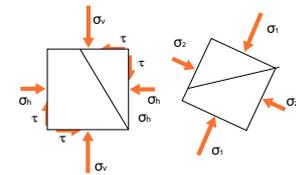
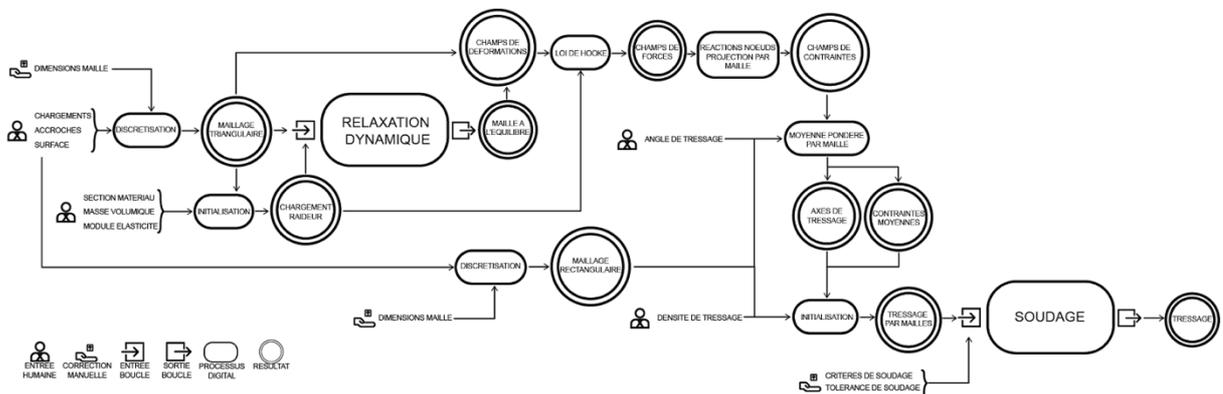


Figure 120 – Contraintes principales sur un élément fini [Cherif W. – CTA EE1].



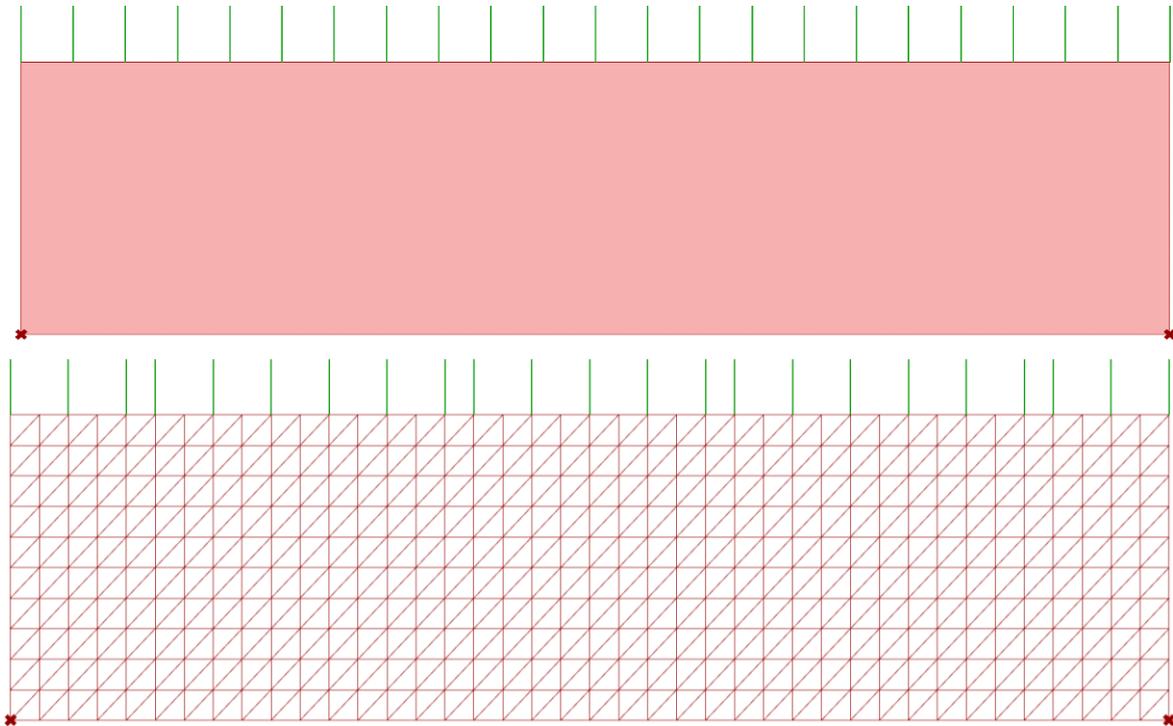


Figure 121 – Diagramme fonctionnel de l’algorithme Baya [Albin Breugnot], données d’entrée (surface de la coque, points d’appui et chargement) dans l’exemple de la poutre isostatique et discrétisation de la surface en éléments finis triangulaires.

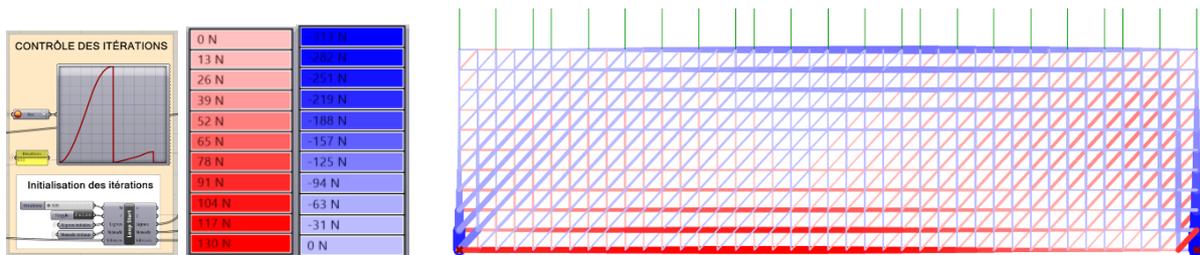


Figure 122 – Convergence de l’algorithme et efforts dans les éléments finis de la maille.

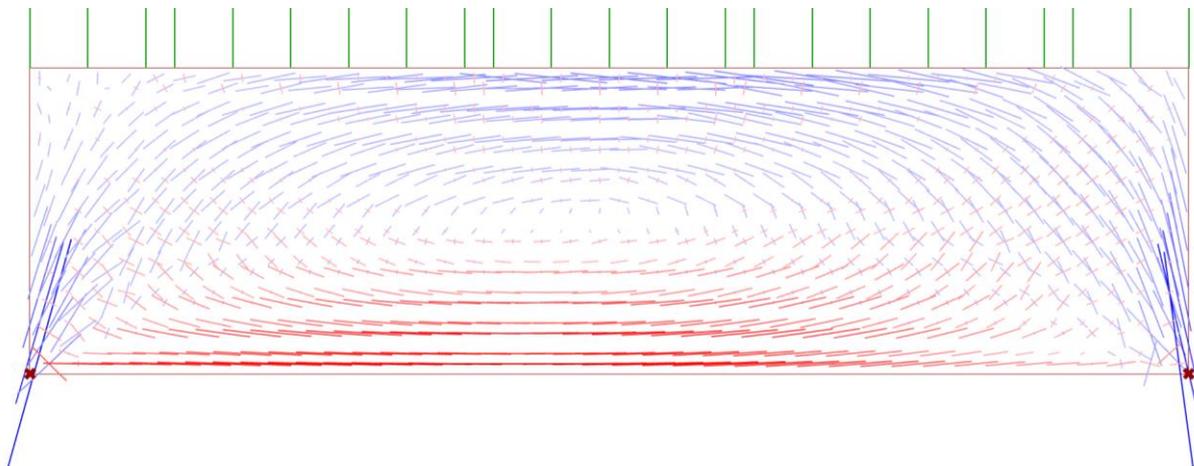


Figure 123 – Contraintes principales [Breugnot A., Leyral M. – CTA EE1].

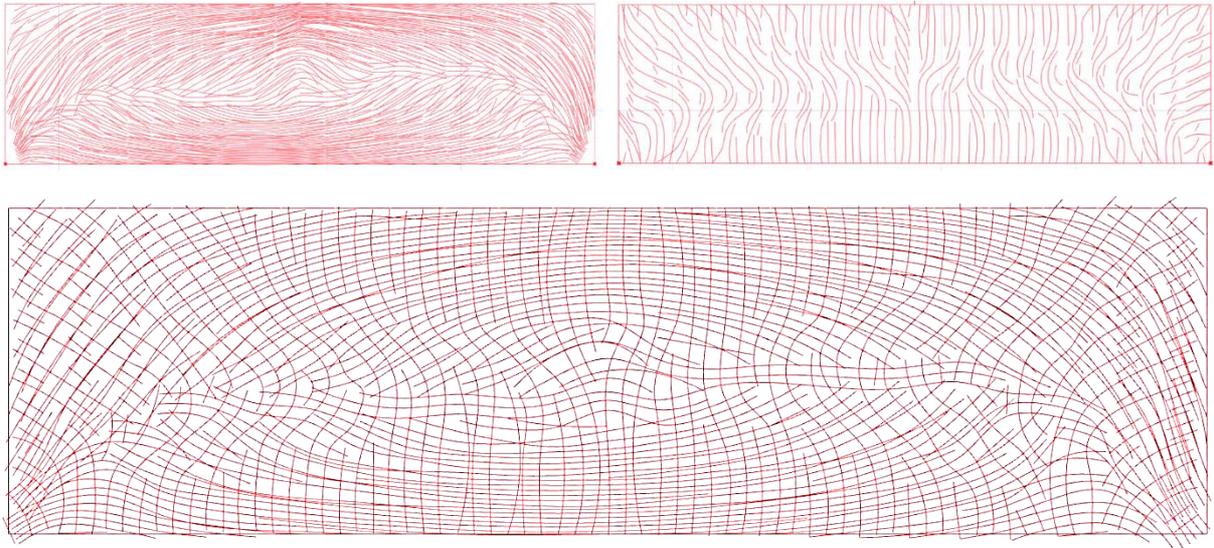


Figure 124 – Tressage optimal obtenu sur l'exemple de la poutre isostatique [Breugnot A., Leyral M. – CTA EE1].

* * *

Contrairement à un gridshell dont le mode de ruine prépondérant est le flambement global de la surface, celui d'un nid suspendu provient de la rupture des brins.

L'hyperstaticité de la structure autoriserait a priori la plastification localisée de certains brins, qui répartiraient alors les efforts sur des brins adjacents moins sollicités, mais on se place dans le cas sécuritaire du domaine élastique.

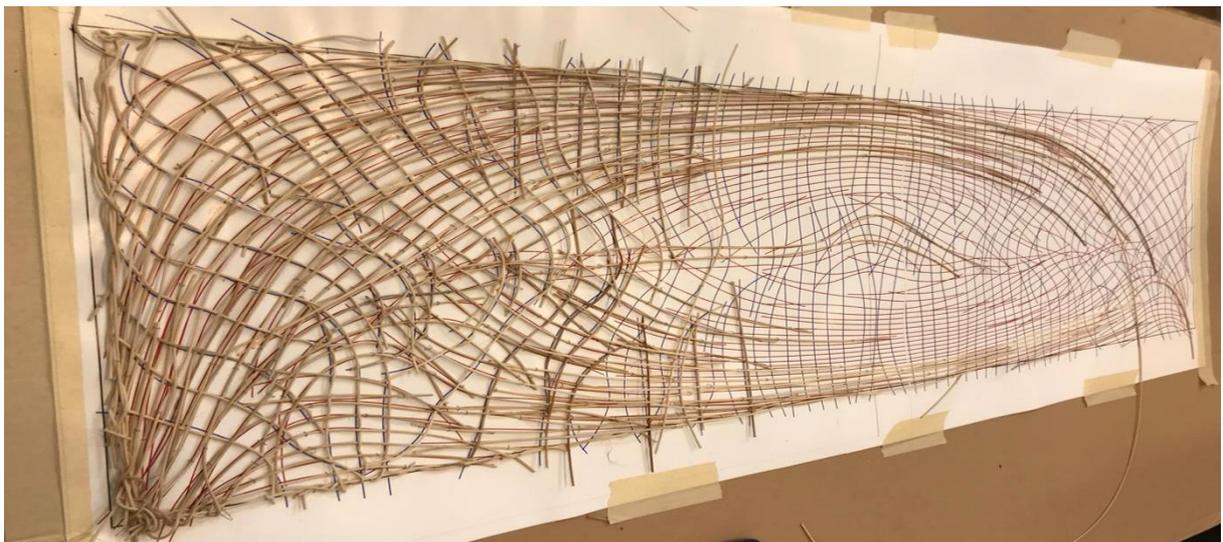


Figure 125 – Expérience en cours pour vérifier l'efficacité de la poutre tressée conçue avec l'algorithme BAYA.

Avant de conclure, rappelons que toute structure doit être dimensionnée avec un facteur de sécurité sur les résultats des calculs.

Tableau 16 – Calcul du coefficient de sécurité sur les charges limites.

Limite	Commentaire	Valeur
Variations du module d'élasticité E	Inhomogénéité de E entre les différents brins du projet.	1,20
	Incertitude sur la valeur de E d'un matériau qui n'est pas destiné habituellement à la structure (espèce, élevage, transformation).	1,20
	Matériaux de vannerie sensibles à l'humidité.	1,30
	Fluage : matériaux très sensibles, mais le pavillon temporaire.	1,10
Précision de la géométrie du modèle		1,20
Variations dans le chargement	Période de retour des charges variables, variabilité à court terme.	1,40
Précision des hypothèses et du modèle de calcul	Non pris en compte dans la modélisation : chargement non axial, frottement inefficace (géométrie, température, humidité), effets d'instabilité globale, glissement des nœuds.	1,40
Nature et dangerosité de l'effondrement	Effondrement soudain si la rupture a lieu au niveau de l'attache.	1,30
Conséquences liées à l'effondrement	Structure légère situé à un moins d'1m du sol.	1,00
Coefficient de sécurité global	(Multiplication des coefficients de sécurité unitaires)	6,30

5.7. Vérifications expérimentales

5.7.1. Les lois de tressage optimal par une étude sur des éprouvettes physiques

Le modèle numérique idéalise la réalité et un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été faites pour les vérifications. Les résultats ne pouvant être confrontés à la littérature, puisque nous n'avons pas trouvé d'études similaires, il est nécessaire de les vérifier par une étude expérimentale similaire.

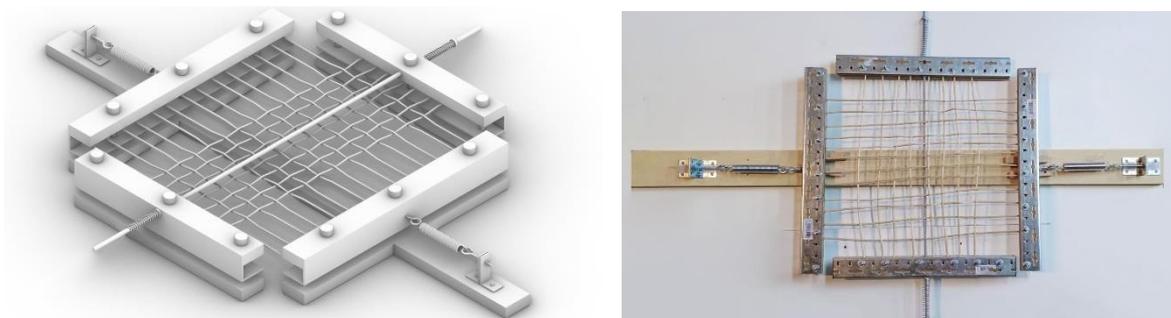


Figure 126 – Dispositif expérimental [Dannenmüller M. – CTA EE1 et Séminaire PCPA].

Les résultats préliminaires de cette expérience physique, toujours en cours à ce jour dans le laboratoire de l'école CentraleSupélec de Paris, tendent à confirmer ceux issus du modèle numérique.

5.7.2. Les contraintes principales

Par photoélasticimétrie

En 1808, Étienne Louis Malus découvre la polarisation de la lumière : cette dernière peut être considérée comme une onde électromagnétique dont la composante électrique se propage de façon orthogonale à sa composante magnétique. Cette polarisation peut être modifiée par un polariseur placé en aval de la source de lumière, celui-ci transforme l'onde lumineuse en une onde polarisée rectilignement, transmettant uniquement la composante parallèle à l'axe du polariseur.

Si nous plaçons un deuxième polariseur, appelé analyseur, à la suite du premier, la lumière en sortie de celui-ci sera

maximale si leurs axes sont parallèles, et nulle s'ils sont perpendiculaires.

Certains matériaux sont biréfringents lorsqu'ils sont soumis à des contraintes. C'est-à-dire qu'ils sont capables de polariser la lumière suivant les axes des contraintes principales en leur sein. C'est le principe de la photoélasticimétrie développée dans la première moitié du XX^{ème} siècle par Coker et Filon [7].

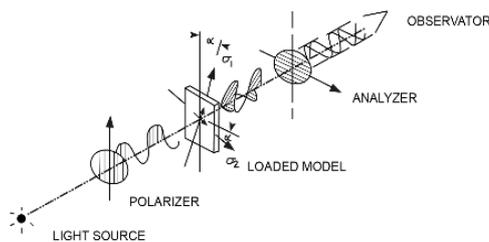


Figure 128 – Schéma d'un polariscope plan [https://cours.polymtl.ca/].

α est l'angle entre les contraintes principales et l'angle du polarisateur. Lorsque $\sin^2(2\alpha) = 0$, l'intensité lumineuse est nulle et on observe une bande noire : ce sont les isoclines. Le long de celles-ci, les contraintes sont donc parallèles à l'angle du polarisateur. Il suffit ainsi de tracer les isoclines pour différents angles du polariseur, d'y placer les sens des contraintes principales σ_1 et σ_2 à intervalles réguliers puis de les relier : nous obtenons les lignes des contraintes principales, appelées isostatiques.

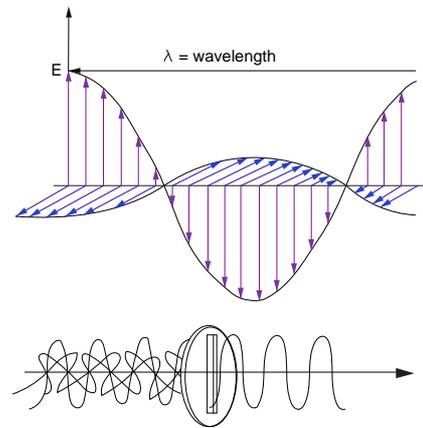


Figure 127 – Champ électrique E et champ magnétique B d'une onde lumineuse et principe du polariseur [Huller C. – CTA EE1].

Le polariscope plan : en plaçant un matériau biréfringent entre un polariseur et un analyseur, on obtient un dispositif expérimental appelé polariscope plan. On peut démontrer que l'intensité lumineuse à la sortie du dispositif expérimental vaut :

$$I = a \cdot \sin^2(2\alpha) \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi \cdot c \cdot d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \right] \quad (12)$$

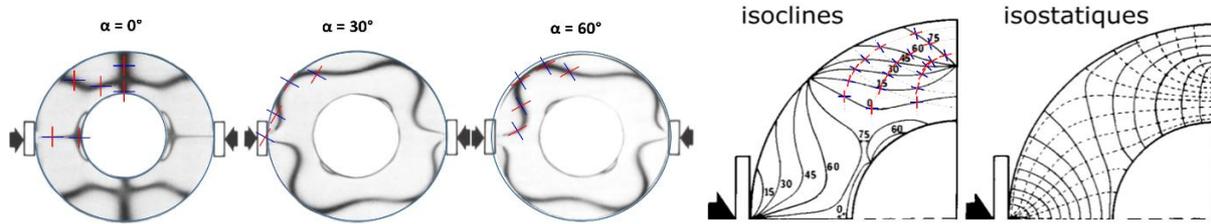


Figure 129 – Principe d’obtention des isoclines et des isostatiques [depuis <https://cours.polymtl.ca/>].

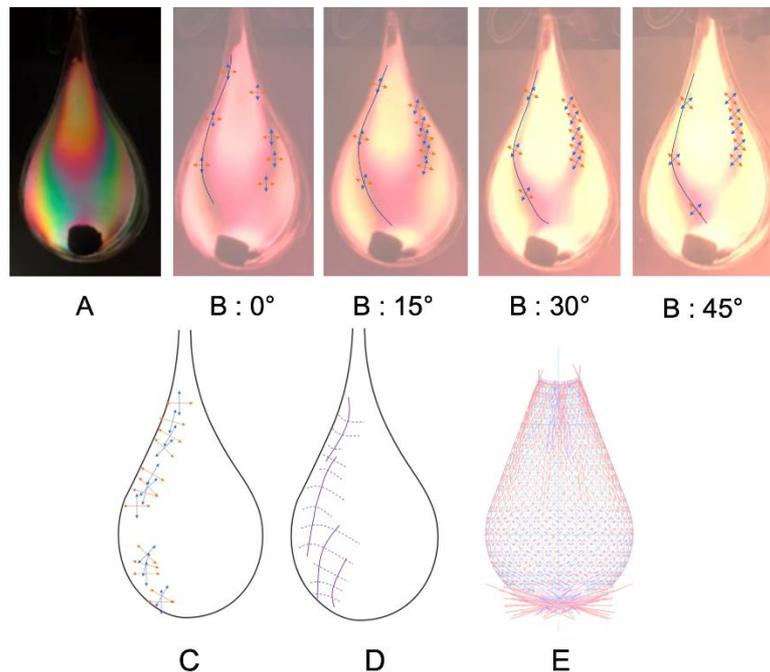


Figure 130 – Isochromes pour un chargement spécifique (A), isoclines pour différents angles du polariseur (B), isoclines sur un schéma unique (C), isostatiques (D), comparaison avec les contraintes principales anticipée par l’algorithme BAYA (E) [Huller C., Bugnet J. – CTA EE1].

Par photogrammétrie sur une coque suspendue

Un ballon suspendu est rempli d’eau (la pré-tension due à l’eau donne à la coque une capacité à reprendre des efforts de compression) et chargé avec une masse ponctuelle à son point bas.

Grâce à une série de photographies et à un algorithme de reconnaissance d’images conçu pour l’expérience, nous avons pu reconnaître les points de contrôle et déduire la déformation de la coque discrétisée. Celle-ci est convertie en une grille d’effort par application de la loi de Hooke. Les résultats sont ensuite comparés à ceux anticipés par l’algorithme Baya (la compression est représentée en bleu et la traction en rouge).

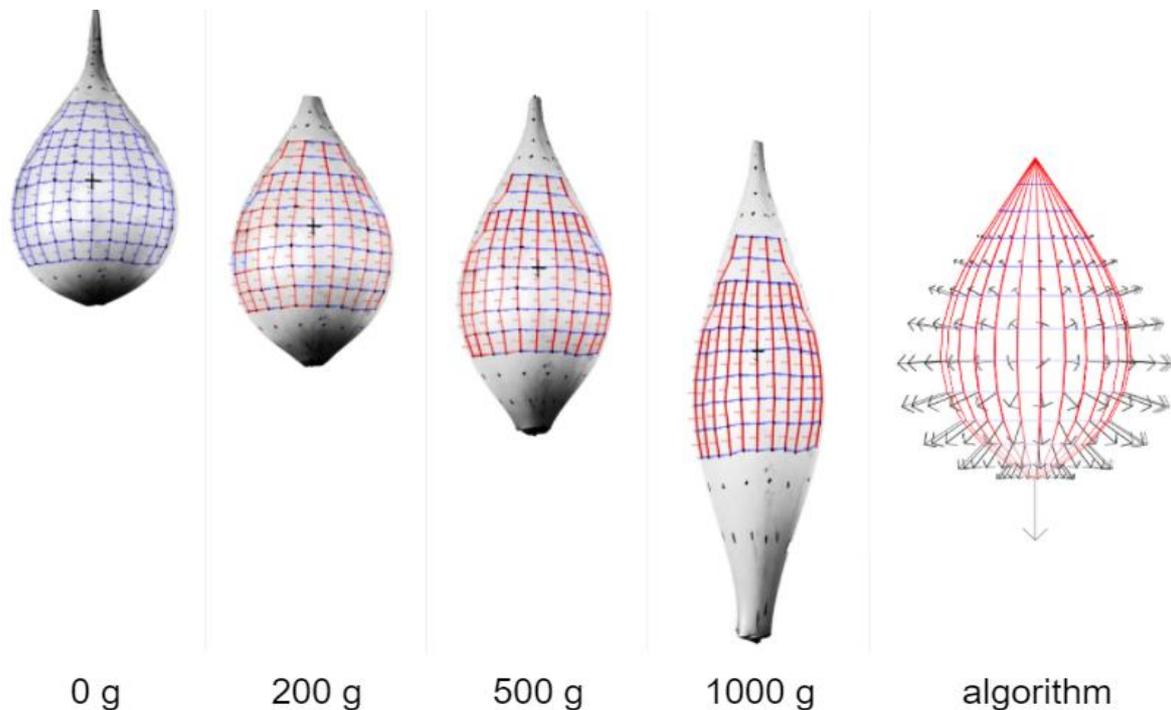


Figure 131 – Photogrammétrie de la coque comparée aux prédiction de l’algorithme BAYA [Royannais B., Chef Q., Leyral M. – CTA EE1].

5.8. Applications

5.8.1. Le tisserin de Baya et sa nidification

Sans même parler de biomimétisme, il est un fait établi que les constructeurs s’inspirent depuis toujours de la nature, vivante ou non, pour bâtir leurs projets. Le projet Baya, décrit ci-après, est une colonie de pavillons suspendus dont la peau, la structure même de l’objet, est un tressage d’éléments longs et fins.

Ce type de construction fait en effet écho à de nombreux habitats du monde animal, en particulier les nids des oiseaux. Parmi eux, qui construisent autant de nids différents qu’il en existe d’espèces, il nous est apparu que celui du tisserin de Baya était un objet particulièrement proche de notre intention.



Figure 132 – Tisserin de Baya tressant son nid [DURAIRAJ].

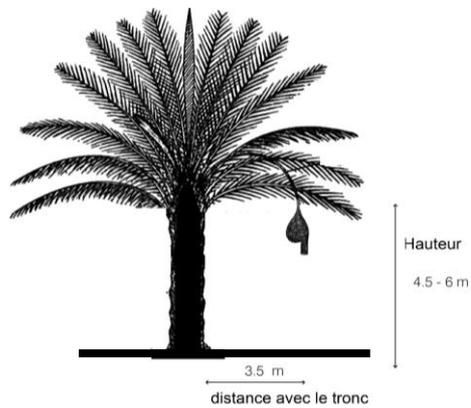


Figure 133 – Position du nid dans l’arbre et effet supposé par Davis [11] de son orientation au vent vis-à-vis du risque de chute des œufs [Cherif W. – CTA EE1].

Le tisserin de Baya (*Ploceus philippinus*) est un petit oiseau de la famille des *Ploceidae*, qui vit en Asie du Sud-Est et construit des nids suspendus en forme de bas lestés ou ressemblant à une goutte d’eau. L’étymologie de son nom provient du Hindi-ourdou : *bayā* बया بيا, oiseau tisserand (*Ploceus baya*), est un nom construit sur le mot sanskrit *vaya* signifiant tisserand ou celui qui tisse. La plupart des colonies (50 à 100 nids en général) se trouvent en Inde, sur des cocotiers dans le nord-est et des arbres épineux dans le sud-ouest.

Le tressage du nid suspendu débute durant sa période de reproduction, celles des pluies, du mois d’avril au mois de septembre selon les localités. Cette période de reproduction est associée à la mousson, provoquée par un échange d’air entre le continent et l’océan : l’air chaud chargé d’humidité se déplace de l’océan vers les terres.

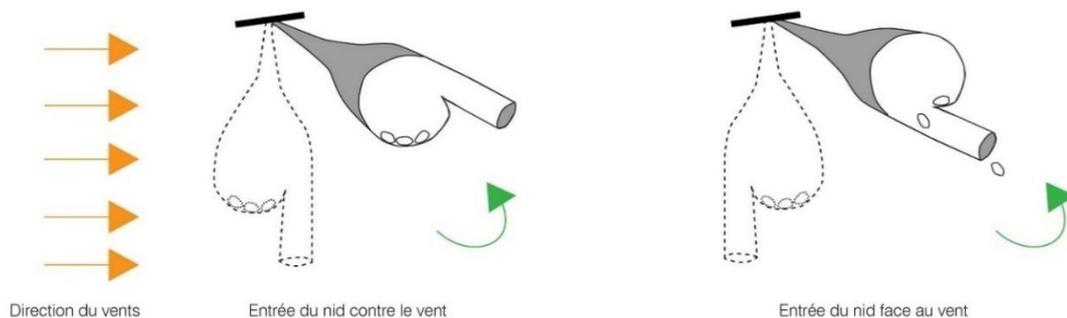
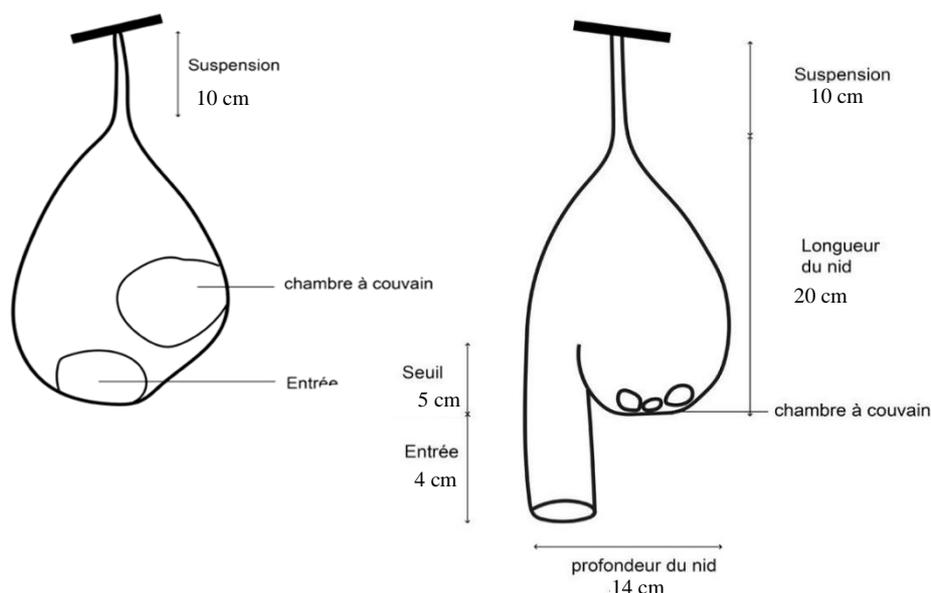


Figure 134 – Effet supposé de l’orientation de l’entrée de nid sur la probabilité de chute des œufs sous vents violents [Guidou H., Cherif W. – CTA EE1].



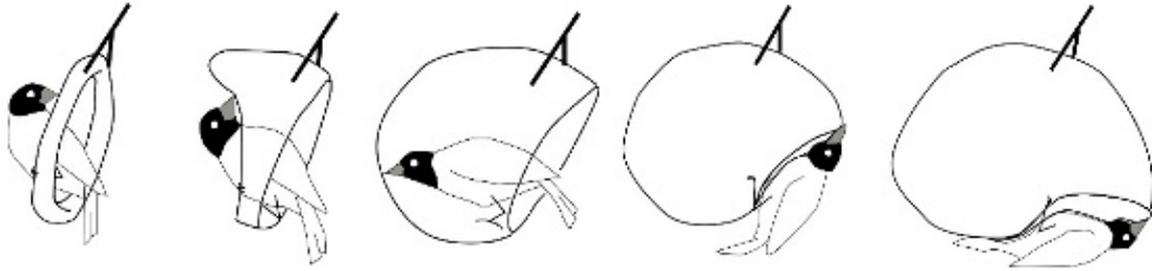


Figure 135 – Architecture générale d’un nid de tisserin de Baya selon Quader [41] au stade du casque et au stade final, et schémas de principe des principales étapes de construction du nid [Guidou H., Bento M., Camail A. – CTA EE1].

Le nid sert avant tout à protéger l’oiseau, ses œufs et ses petits des prédateurs et du climat. Il est donc logique qu’il soit rendu nécessaire lors de la période des moussons. L’emplacement de l’arbre (en surplomb de l’eau pour limiter l’entrée de rongeurs), son espèce (les arbres épineux sont privilégiés), la position du nid sur celui-ci (du côté protégé du vent qui est unidirectionnel), et son orientation sont ainsi judicieusement choisis.

Le nid est composé de 1.000 à 1.500 brins longs de 20 à 60 cm. Les nids sont tressés à des fins de reproduction, le tisserin de Baya peut d’ailleurs en construire plusieurs, généralement entre trois et cinq afin de se reproduire avec plusieurs femelles. Il commence par fabriquer un nid incomplet en trois étapes qui durent au total treize jours : le *wad stage* ou étape de la liasse (deux jours), l’étape de l’anneau (*ring stage* – cinq jours), et le *helmet stage*, l’étape du casque (six jours). À ce stade, l’oiseau cherchera alors une femelle et, durant l’attente (jusqu’à deux jours), il améliorera le casque en le rembourrant. Si le nid en forme de casque rembourré est choisi par une femelle, il sera alors achevé : la confection de la chambre à œufs lui demandera un jour et, enfin, le tunnel d’entrée sera ajouté au cours des deux derniers jours de construction. Au total, la construction de son nid complet lui aura donc pris dix-huit jours.

Tableau 17 – Étapes de construction du nid selon Crook [8] [Guidou H., Bento M., Camail A., Bauduret M., Boukili S., Salinas J. P. – CTA EE1].

Étape	Étape de la liasse (<i>wad stage</i>)	Étape de la liasse avec des cornes (<i>advanced wad stage</i>)	Étape de l'anneau initial (<i>ring stage</i>)
Illustration			
Nœuds utilisés			
Description	<p>L'oiseau noue le premier brin (fines bandes de feuilles de palmier ou d'autres matériaux fibreux), soit à une feuille de palmier, soit à une branche pendante.</p> <p>Dans le premier cas, l'oiseau fait un trou dans la feuille du palmier à travers lequel il passe son premier brin.</p> <p>Dans le second, il peut alors se servir d'une branche fourchue ou non. Si la branche est fourchue (cas le plus courant), il tisse des brins autour de chaque élément formé par le Y. Ainsi le nid et la branche sont complètement solidaires et se meuvent ensemble. Si la branche est droite, il doit d'abord réaliser une petite entaille ou s'aider d'un défaut de la branche pour faire tenir le premier brin qu'il maintient contre la branche à l'aide de sa patte et se sert de son bec pour passer le brin derrière la branche et sous le premier brin.</p> <p>Le tisserin de Baya confectionne ensuite une liasse, un ruban en forme de cercle qui lui servira de perchoir pour nouer les autres brins sans être obligé de voler en statique autour de son nid.</p> <p>Lorsque la branche est droite et que le perchoir provisoire devient désuet car situé trop en hauteur pour travailler, il peut alors le fixer autour de la branche afin de consolider l'accroche à l'arbre.</p>	<p>L'ajout continu de brins par l'oiseau permet d'étendre la liasse vers le bas tout en augmentant l'épaisseur et la longueur du ruban qui lui sert de support. Il tresse ensuite de part et d'autre deux excroissances en forme de cornes qu'il reliera aux extrémités, formant ainsi un anneau autour de lui-même.</p> <p>Positionné sur l'extrémité du perchoir qu'il vient de confectionner, le tisserin de Baya se met à tresser autour de l'anneau pour l'élargir et lui ajouter une ouverture vers le bas.</p> <p>La base du nid est alors constituée d'un premier ruban assez épais formant un cercle et qui servira de perchoir à l'oiseau à partir duquel il poursuivra le tressage durant toutes les étapes ultérieures. Il s'agit donc, en quelque sorte, d'un échafaudage provisoire pendant la construction. La base de l'anneau divisera ensuite la chambre en deux moitiés égales.</p>	

Étape	Étape du casque (<i>helmet stage</i>)	Étape du casque rembourré	Finitions
Illustration			
Nœuds utilisés			
Description	<p>L'oiseau, perché dans l'anneau initial, ajoute, brin par brin, de la matière au bord arrière de la partie supérieure de l'anneau et le façonne pour confectionner une bride qui se développe lentement pour former le toit de la chambre à œufs. En même temps, le bord avant est également agrandi, mais n'est pas complètement refermé afin de former un toit en forme de porche qui deviendra plus tard le toit de l'antichambre. L'oiseau forme deux ouvertures dans l'anneau : l'une pour le tunnel d'entrée et l'autre pour l'accès à la chambre à œufs. La forme du nid évoque alors celle d'un casque. Le mâle se pose alors sur la bride du toit et tresse des brins sur sa surface extérieure. Le travail est réparti entre la perche annulaire initiale et la surface extérieure du nid.</p> <p>Le mâle appelle alors, via des sifflements, les femelles. Celles-ci inspectent tous les nids en leur faisant passer des tests de solidité : elles poussent sur les parois avec leur bec et tirent sur quelques fibres pour vérifier la qualité de l'ouvrage. Chaque femelle choisit ensuite le meilleur nid, le constructeur de celui-ci devenant d'office son compagnon. À ce stade, le mâle a conçu et structuré la chambre à œufs. Celle-ci sera ensuite élargie et connectée avec l'autre moitié du nid.</p> <p>Un certain temps peut s'écouler avant qu'une femelle ne soit attirée par un nid au stade de casque. En attendant, la structure est cependant soigneusement entretenue et des ajouts constants aux surfaces extérieures et intérieures augmentent l'épaisseur des parois et renforcent le point de fixation. La structure a un aspect bien rembourré, cependant, jusqu'à l'arrivée de la femelle, la chambre à œufs n'est pas terminée.</p>		<p>Dès qu'une femelle accepte un nid au stade de casque (qu'il soit rembourré ou non), le mâle étend rapidement la paroi de la chambre à œufs vers le bas puis en tresse le fond depuis le perchoir de l'anneau initial (un jour de travail). Il rembourre encore l'intérieur tandis que la femelle apporte une doublure très clairesemée composée de fibres et de quelques plumes composant le plancher de la chambre à œufs. Les œufs peuvent alors être pondus.</p> <p>Elle ajoute des gouttes de boue, d'argile ou de bouse de vache aux parois, peut-être dans le but de lester le nid vis-à-vis du vent. Pendant ce temps, et durant deux jours, le mâle ajoute un long tunnel tubulaire vertical à l'ouverture formant l'entrée du nid qui protégera les œufs contre l'entrée des rongeurs.</p>

Les nœuds décrits pour chaque étape dans le tableau ci-avant ont été déduits de l'observation de vidéos de confection du nid par des tisserins de Baya et d'un essai de réalisation en maquette par nos soins.

Figure 136 – Nid de tisserin de Baya ayant servi à nos études expérimentales et essai de reproduction en maquette d'un nid de tisserin de Baya par Léger C. et Royannais B. – CTA EE1.



5.8.2. Étude du nid et comparaison aux résultats de l’algorithme BAYA

L’objectif de cette partie de l’étude est de répondre à la question suivante : le tisserin de Baya suit-il, lorsqu’il confectionne son nid, de façon consciente ou inconsciente, les lois de tressage optimal que nous avons définies ? Afin d’y répondre nous avons, dans un premier temps et avec l’accompagnement du docteur et professeur François Guéna, directeur scientifique du laboratoire MAP-MAACC (Modélisation pour l’Assistance à l’Activité Cognitive de Conception) et François Goussard et Delphine Brant, chercheurs au Muséum National d’Histoire Naturelle, réalisé un relevé par scanner surfacique laser et par photogrammétrie du nid.

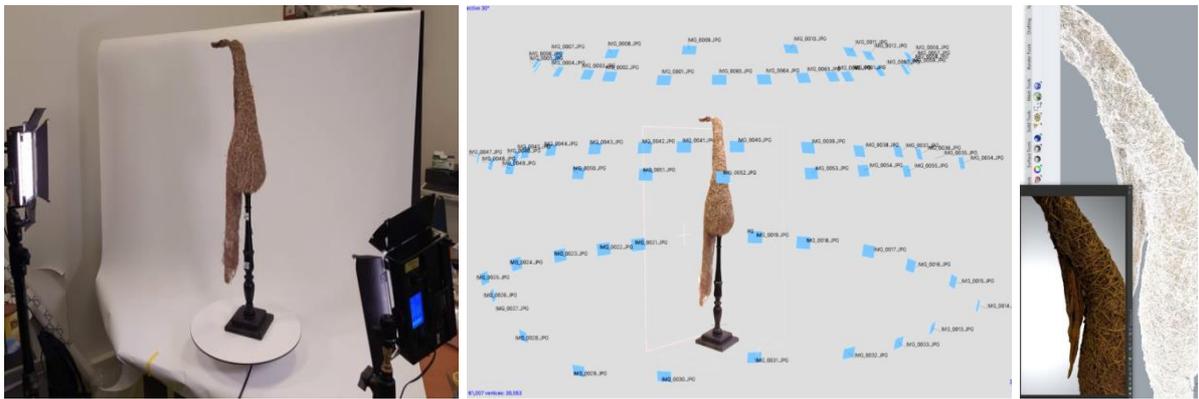


Figure 137 – Modélisation du nid par photogrammétrie [Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].



Figure 138 – Modélisation du nid par scanner surfacique laser [Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].

Grâce aux données de saturation de la couleur et de reliefs obtenues, nous avons bâti un algorithme de reconnaissance d'image capable d'isoler sur la surface du nid la plupart des brins et de reconnaître leur diamètre. Nous en avons déduit les directions principales et la densité des brins sur chaque zone du nid. Les résultats semblent trahir le fantôme de l'échafaudage provisoire utilisé par le tisserin de Baya pour confectionner son nid à partir de l'étape de l'anneau. Cependant, les données étant surfaciques, nous avons ensuite souhaité accéder au tressage à l'intérieur même de l'épaisseur de la paroi pour le confirmer, en privilégiant une méthode non destructive du nid.

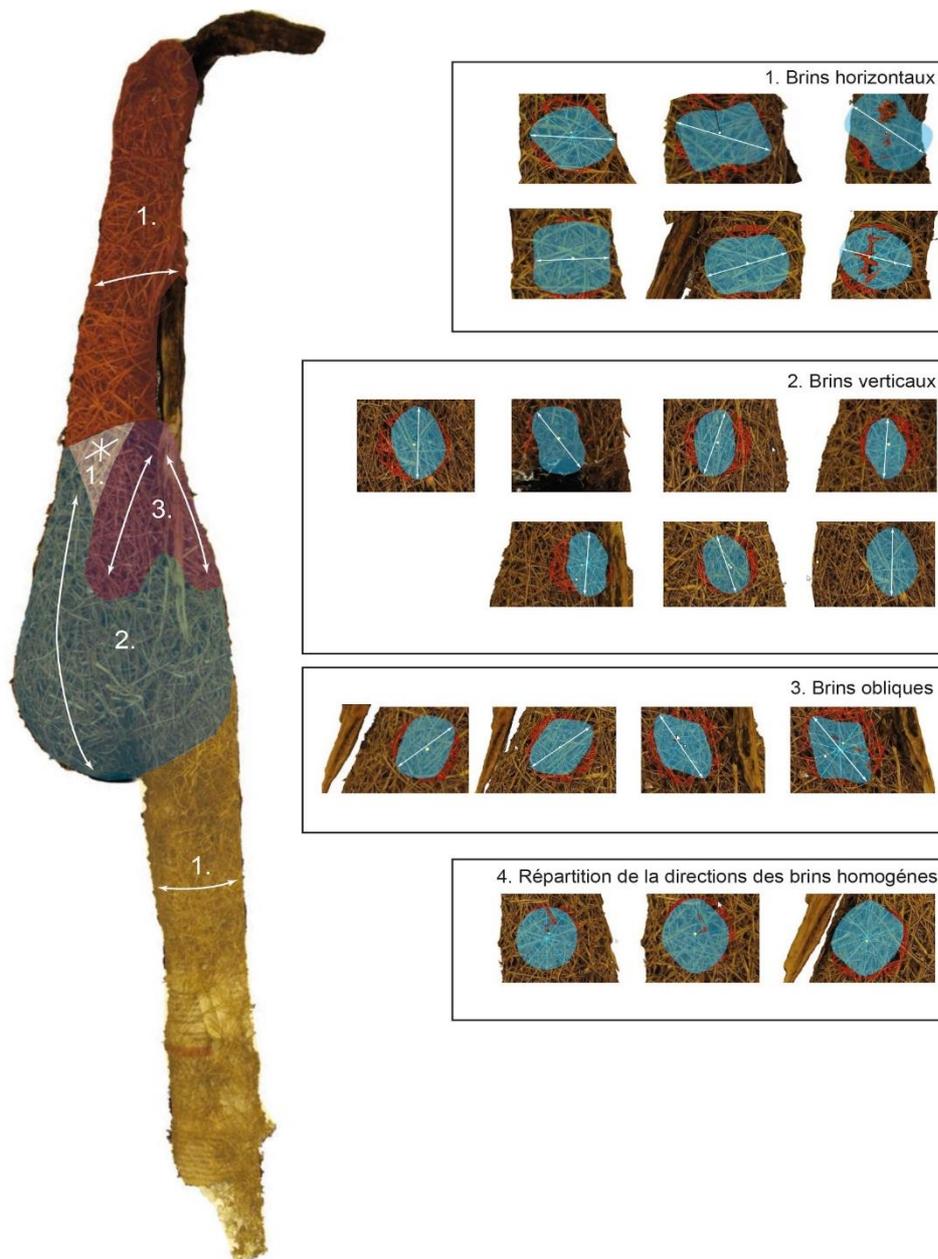


Figure 139 – Directions privilégiées et densité de tressage en surface du nid [Pauvarel L., Bardy V., Leyral M. – CTA EE1].

Pour cela, nous avons passé le nid au scanner à rayons X grâce à l'aide du docteur Jean-Robert Blondeau, chef de service de radiologie de l'hôpital de Pont-l'Abbé.

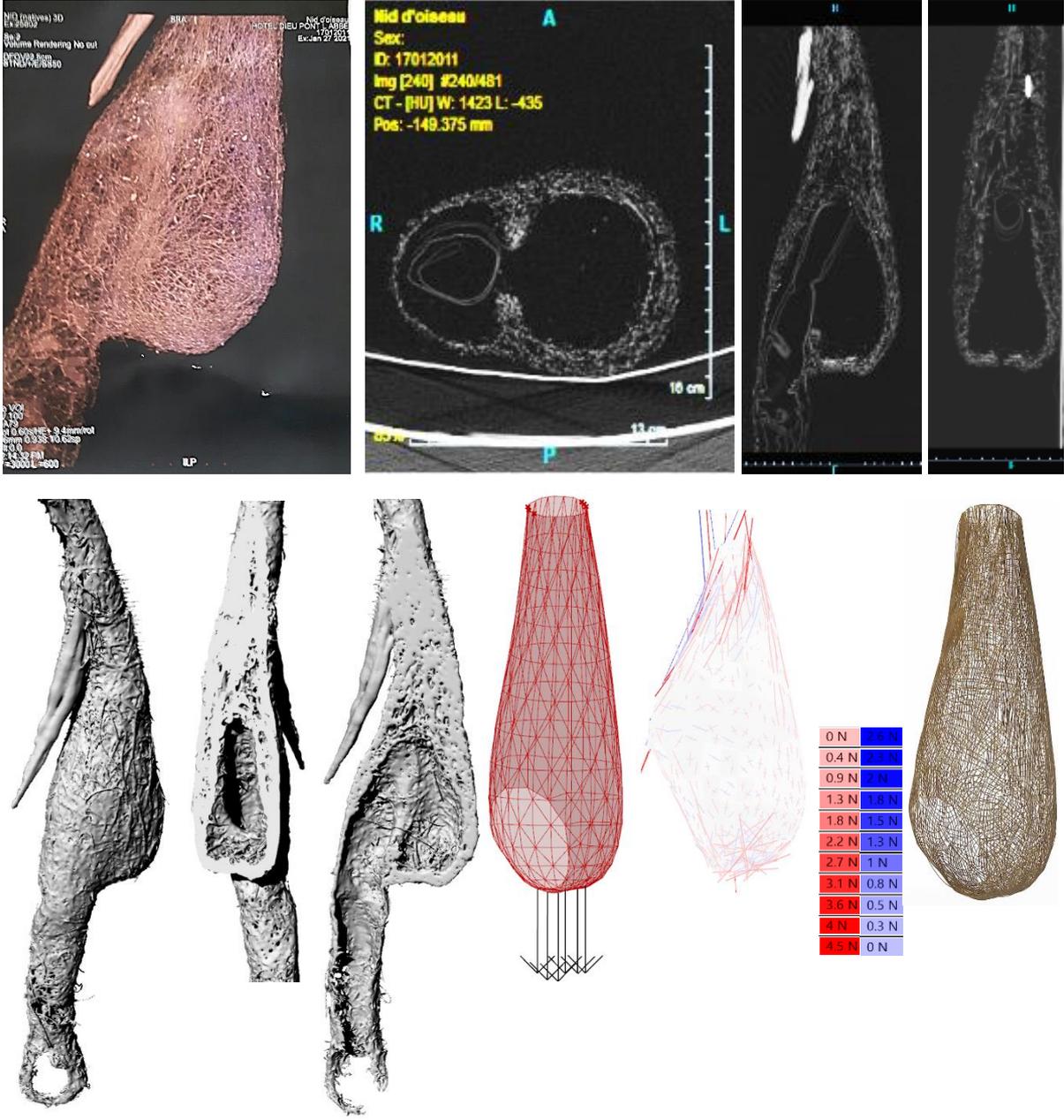


Figure 140 – Coupes du scanner RX et modèle 3D reconstruit comparés avec les prévisions de l'algorithme BAYA.

Cette étude nous a permis de mieux cerner le schéma statique du nid de tisserin, qui fonctionne en « balançoire » avec les deux faces perpendiculaires au trou de l'entrée qui sont beaucoup plus sollicitées. Cela a permis de mettre en évidence que le tressage du nid, qui suit dans sa globalité celui de son perchoir temporaire utile à la construction, n'est pas

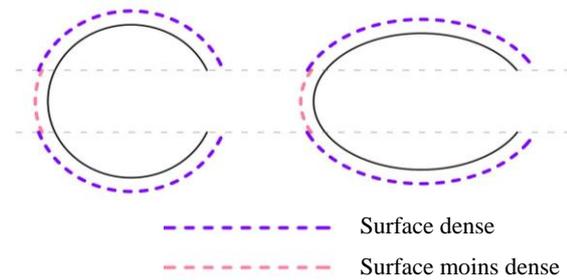


Figure 141 – Zones les plus sollicitées du nid, telles que prévues par l'algorithme BAYA [Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].

justifié par la seule raison de la simplification de la mise en œuvre : c'est également le schéma structurel le plus efficace pour l'objet.

Cette constatation est confirmée par la proximité frappante entre le tressage optimal du nid fourni par l'algorithme BAYA et celui réellement mis en œuvre par l'oiseau. Outre le fait de constituer une validation intéressante de la pertinence des lois de tressage optimal que nous avons proposées, et donc plus globalement de celle de l'algorithme BAYA, cette étude a donc permis de mieux comprendre et déterminer le schéma statique final de notre projet d'application à l'échelle 1.

5.8.3. Recherche de forme : la goutte d'eau et le bas lesté

Plusieurs auteurs font référence à la forme de la goutte d'eau au moment de son détachement pour caractériser celle du nid du tisserin de Baya. D'autres, comme Newton, préfèrent la comparaison avec un bas suspendu et lesté. Ces deux formes ont pourtant leurs spécificités, pour certaines similaires à notre objet d'étude, pour d'autres s'en éloignant. Le bas suspendu, à l'instar du nid du tisserin de Baya et de notre projet architectural, présente un chargement ponctuel vertical dirigé vers le bas. Cependant sa surface est un tissage, c'est-à-dire que, contrairement à notre tressage, elle ne peut reprendre aucun effort de compression, ce qui explique que le volume libre à l'intérieur est fortement réduit. La goutte d'eau présente un beau volume galbé. Sa surface est synclastique et toujours tendue : cela provient d'un champ de forces en pression qui diffère de celui de notre projet.

Nous avons donc utilisé l'algorithme BAYA pour effectuer une étude de recherche de forme comparative sur les deux objets (la goutte d'eau au moment de son détachement du support et le bas suspendu lesté) afin de pouvoir les comparer à la forme de la coque tressée par le tisserin de Baya.

Lorsqu'on étudie les structures à membranes chargées, comme notre projet et le nid du tisserin de Baya, par un champ de forces verticales dirigées vers le bas, on en déduit que seule une

forme anticlastique, c'est-à-dire présentant deux courbures inverses, permet d'obtenir une membrane parfaitement tendue. Pour qu'une forme synclastique (deux courbures dans le même sens) soit parfaitement tendue, il faut introduire une autre force : dans l'architecture ce sont par exemple les structures gonflables.

C'est par exemple le cas du linteaire qui est défini comme le profil d'une bâche remplie d'eau suspendue à ses deux extrémités par des poutres parallèles. La question de la forme que prend la section de la bâche fut soulevée et théorisée par les mathématiciens Bernoulli et Euler respectivement au XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle. Elle tire son nom du fait que Bernoulli fut le premier à réaliser l'expérience à l'aide d'un drap : en effet linteaire vient du latin *lintheum* qui signifie le linge.

On démontre que lorsque les bords de la bâche se rejoignent, la forme obtenue, qui correspond à celle de la goutte d'eau en coupe, est celle d'une élastica, courbe qui caractérise également la forme naturelle des gridshells élastiques. La forme d'une goutte d'eau est toutefois différente.

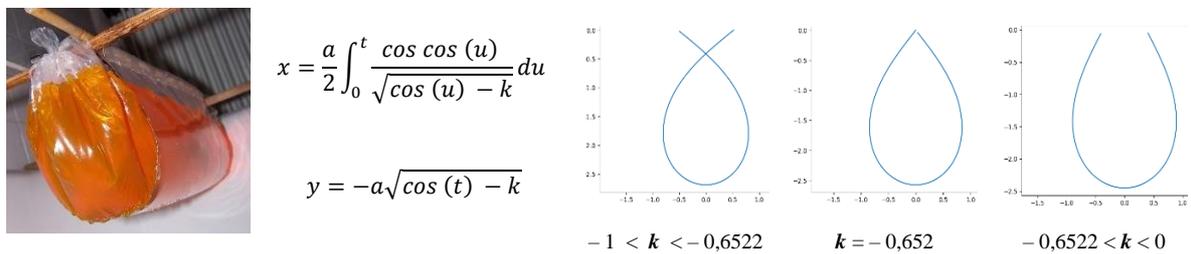


Figure 142 – Expérience du linteaire de Bernoulli [mathcurve.com], équation paramétrique et solutions de l'élastica [Villate de Peufeilhox A. – CTA EE1].

Comme tout modèle basé sur la relaxation dynamique, quelques petits ajustements permettent à l'algorithme BAYA d'effectuer une recherche de forme minimisant l'énergie en jeu dans un système donné. La première expérience menée sur une coque sphérique maintenue ponctuellement à son sommet a consisté à supprimer les diagonales du maillage afin de laisser les quadrilatères se déformer librement, à supprimer les forces de compression sur la surface de la coque, et à y appliquer un champ de pressions d'un fluide : $\vec{f} = -\rho * g * h * S * \vec{z}$ (ρ est la masse volumique du fluide, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ l'accélération de la pesanteur terrestre, h la hauteur par rapport à la base et S la surface d'application). forme converge vers celle d'une goutte d'eau au moment de son détachement. La proximité de cette forme à celle du de tisserin de Baya est de 91,54 %. La deuxième simulation, réalisé à l'aide de

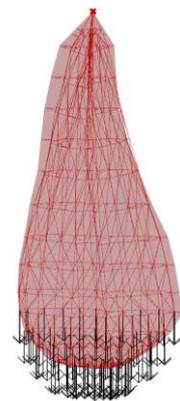


Figure 143 – Forme idéale issue d'une recherche de forme sur un nid de tisserin de Baya.

membrures très souples, sans rigidité à la compression, en forçant un maintien du volume en bas de la coque soumise à un champ de force vertical, simule la forme d'un bas lesté. La proximité avec le nid du tisserin de Baya est de 97,02 %. Cette dernière forme est donc plus proche, donnant raison à Newton. C'est à peine moins bien que la forme qui décrit selon nous le mieux le nid et qui est obtenue en réactivant la possibilité de la surface à reprendre des forces de compression (97,34 %). Cette dernière recherche de forme nous a permis de statuer sur la forme idéale de notre projet. Notons que nous n'avons pas simulé le caractère orthotopique du nid mis en évidence par la précédente étude, cette amélioration de l'expérience constituant une piste de développement futur de nos études.

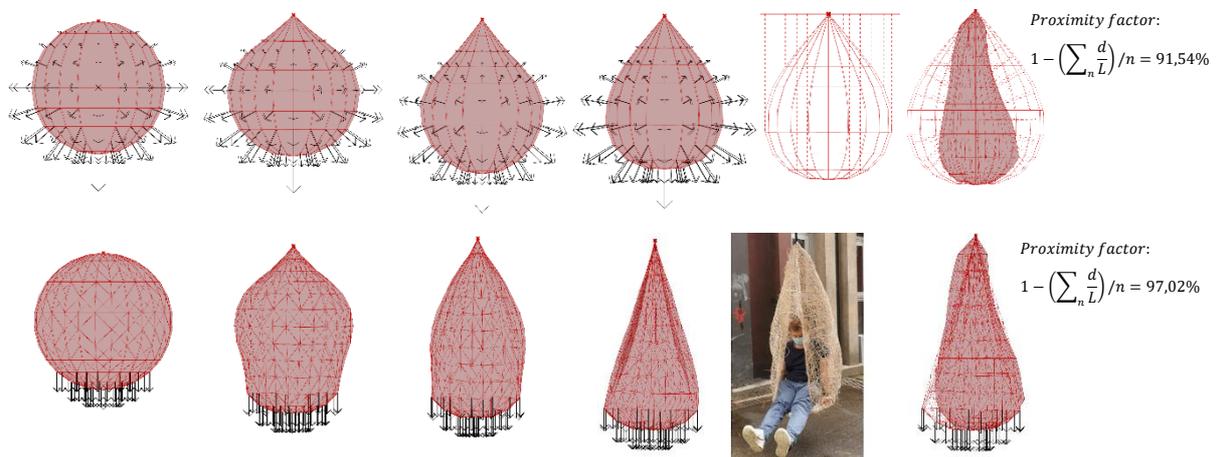


Figure 144 – Recherches de formes sur un modèle de goutte d'eau et sur un modèle de bas lesté, les résultats sont comparés avec la déformation d'une maquette du projet Baya à l'échelle ½.

5.8.4. Projet Baya : application à un pavillon suspendu à l'échelle 1

C'est au cœur du même parc de la Butte du Chapeau Rouge, à côté du projet Élastica décrit au paragraphe 4.6 *Projet Élastica : application à un pavillon échelle 1*, que notre application architecturale prendra place.

À l'instar des colonies des nids de tisserins de Baya, nous avons opté pour la réalisation de plusieurs pavillons implantés dans le chemin de ronde, cette balade périphérique en contrebas de l'esplanade et bordée de part et d'autre de tilleuls et de platanes. Un seul sera réalisé pour des raisons de moyens.

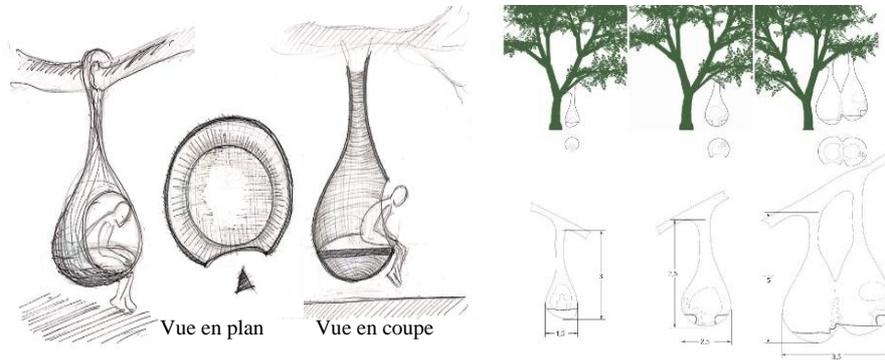
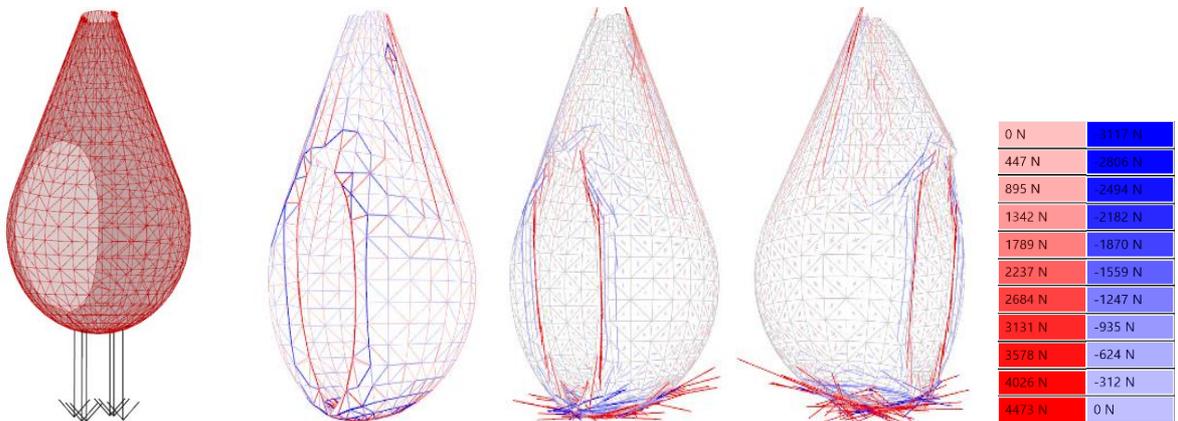


Figure 145 – Plan masse, esquisses et coupes des nids de la colonie du projet Baya [Bauduret M., Pauvarel L., Bardy V. – CTA EE1].



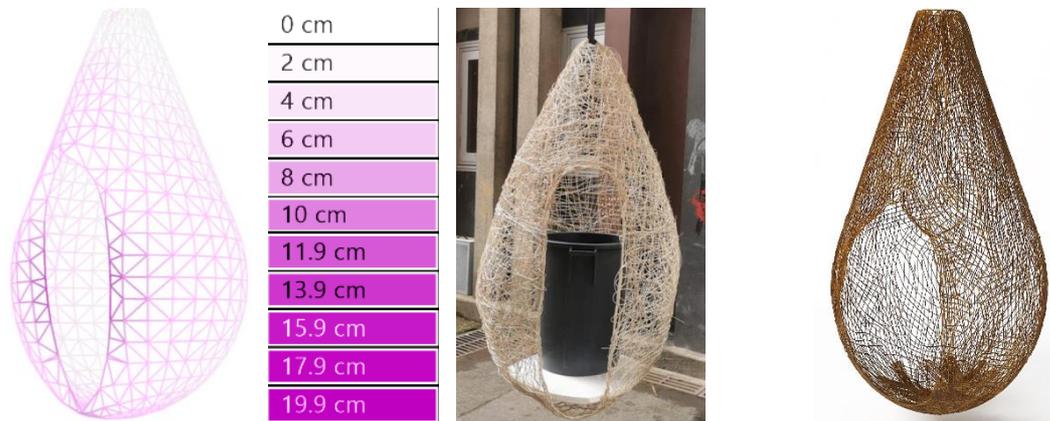
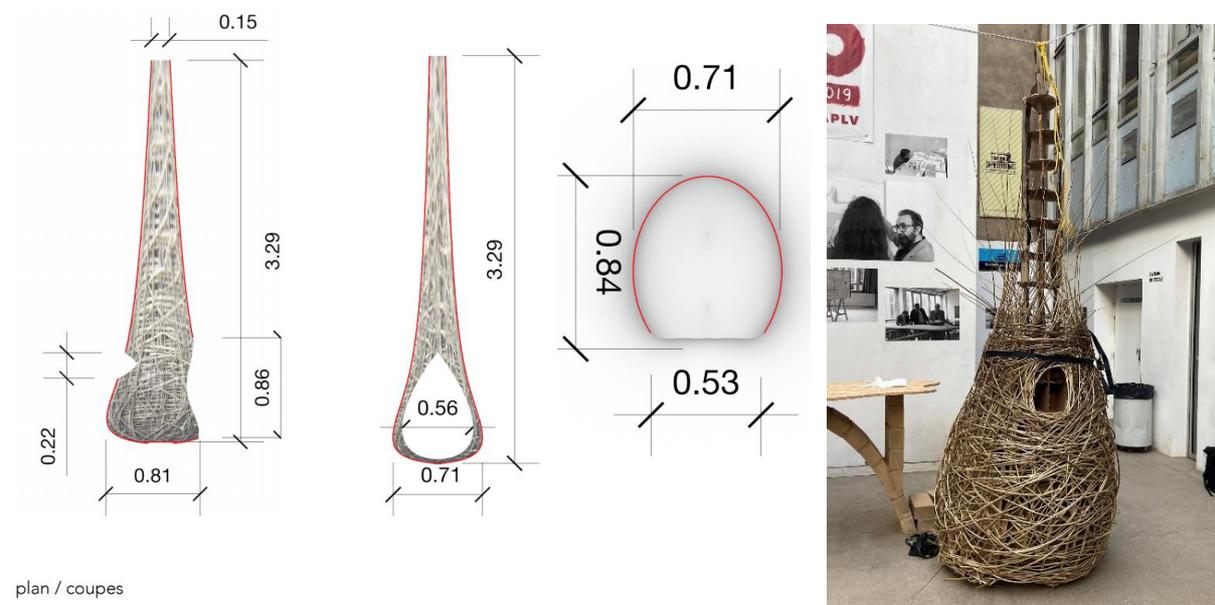


Figure 146 – Résultats de l’algorithme BAYA sur le projet, comparaison des déplacements calculés avec ceux mesurés sur une maquette échelle 1/2, et tressage optimal du projet [Breugnot A. – CTA EE1].



plan / coupes

Figure 147 – Dimensions en mètres du projet BAYA reportées par Marius Bauduret, étudiant du CTA EE1, et photographie du nid pendant sa construction sur un ensemble de supports en carton alvéolé.



Figure 148 – Photographies du pavillon Baya [Par Quentin Chef (tressage en cours) et Olivier Leclerc (les autres)].

5.9. Conclusion sur le second axe de recherche

Les tressages de fibres naturelles telles que l'osier, permettent de fabriquer des surfaces et de délimiter des volumes à bas coût (autant économique qu'écologique). Ces surfaces sont capables de reprendre des charges à petite échelle (paniers en osier issus de la vannerie par exemple). A plus grande échelle, en architecture par exemple, ils sont toutefois presque toujours utilisés à des fins de remplissage non structurels. Très peu d'études touchent à ce sujet, nous avons donc voulu savoir s'il était possible de réaliser une coque à échelle architecturale ayant un usage structurel, et donc de résister à des charges d'exploitation. Les projets de l'artiste Laura Ellen Bacon sont à ce titre une grande source d'inspiration. Nous en proposons une approche scientifique. Nous avons également voulu déterminer s'il était possible d'optimiser le tressage d'une telle coque en fonction d'un cas de charge donné.

Pour y répondre, nous avons réalisé un grand nombre d'essais sur des éprouvettes numériques de tressages, en faisant varier les forces, les densités des brins et leur orientation. Nous avons produit des relations préliminaires entre la géométrie du tressage et son comportement mécanique au sein d'un champ de forces. Ces relations doivent encore être confrontée à des essais sur des éprouvettes physiques qui seront réalisés dans les années à venir.

En application de ces résultats théoriques, un algorithme, appelé BAYA, a été produit à des fins de conception et de design. En fonction de la géométrie d'une coque dessinée par le designer ou le concepteur, et grâce aux relations définies précédemment, BAYA est capable de fournir un plan de tressage optimisé. Les résultats ont été confrontés avec succès à la réalité, à la fois en comparant les tressages de nids d'oiseaux comme le tissierin de Baya à ceux de l'algorithme, mais aussi en construisant des projets à grande échelle selon les plans fournis par BAYA et en les testant par leur mise en charge réelle.

La faisabilité des coques de grande taille réalisées en tressage de fibres naturelles et supportant des charges telles que le poids d'utilisateurs a ainsi été démontrée, tout en donnant l'accès à leur optimisation terme de quantité de matière.

Aujourd'hui, je travaille avec Quentin Chef, co-auteur des articles publiés, sur la caractérisation mécanique de l'osier, car à ce jour seul un nombre réduit d'études apporte des données sur le sujet. Avec Marc Hymans, co-auteur de l'article sur une application du procédé à une passerelle, nous préparons d'autres applications comme la réalisation de bancs d'une portée de 3 mètres durant la Semaine Design de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.



Conclusion

Une thèse en VAE est l'occasion de présenter un ou plusieurs travaux conduits dans le cadre d'un domaine de recherche. Chacun de ces travaux peut être thématique, toutefois j'ai tenté de les sélectionner afin d'en faire ressortir une cohérence autour d'un thème commun : **l'amélioration de la conception et de la fabrication des structures spatiales grâce à l'évolutivité de leur raideur, du souple – pour faciliter la phase d'érection – au raide – pour un bon usage en phase de service.**

Dans le cadre d'un enseignement mené à l'ENSA-Paris la Villette qui intersecte directement le domaine de la recherche – Explorer à l'échelle 1 –, nous avons ainsi :

1. Étudié le procédé évolutif de conception des gridshells élastiques post-formés.
2. Mis au point un outil par relaxation dynamique, l'algorithme ELASTICA, capable d'effectuer facilement et de façon ergonomique la recherche de forme et les diverses vérifications de l'intégrité de l'objet formé.
3. Confronté les résultats des modèles numériques avec ceux d'essais de chargement sur modèles réduits physiques, analysé les écarts et proposé des actions à mettre en œuvre afin d'augmenter la fiabilité des résultats obtenus.
4. Étudié l'évolutivité de rigidité au sein d'un matériau naturel, l'osier, afin de réfléchir à comment le mettre en œuvre dans les structures qui composent l'architecture.
5. Produit, au terme d'études expérimentales, un ensemble de « lois » qui modélisent le plus fidèlement possible le fonctionnement optimal de la matière tressée en fonction des sollicitations qu'elle subit.
6. Mis en œuvre un algorithme capable de fournir par relaxation dynamique les champs des contraintes principales d'une coque quelconque soumise à un chargement donné. Nous avons ensuite nourri cet algorithme avec les « lois » de tressage optimal obtenues au point précédent pour que celui-ci soit capable de donner un plan de tressage optimal de l'ensemble de la coque structurelle étudiée sous un chargement donné. Ce nouvel outil algorithmique a été nommé BAYA.
7. Confronté les résultats obtenus à l'expérience, et notamment par la comparaison de la fabrication d'un nid du tisserin de Baya au tressage « optimal » suggéré par l'algorithme BAYA.

Ce travail a apporté son lot de réponses à certaines questions que nous nous posions (et même à certaines que nous ne nous posions pas !). Mais, dans le même temps, il a surtout soulevé un nombre encore plus grand d'interrogations qui restent à ce jour à étudier. De plus, la situation sanitaire du pays a fortement limité notre capacité à réaliser des expériences physiques, et la majeure partie du travail réalisé à ce jour reste encore numérique.

De ces constatations, nous pouvons faire émerger trois grands axes de travail à mener pour les études en cours et celles des années à venir. Ils sont décrits dans la suite.

Amélioration des outils produits d'un point de vue de l'usage (formel)

L'usage des outils réalisés soulève de nombreux points à améliorer. Il s'agit ici – principalement – plus de questions de bon usage que de recherche théorique, mais nous croyons que c'est justement la capacité des outils disponibles à être ergonomiques qui permettra la démocratisation de ces typologies :

- L'algorithme ELASTICA est ergonomique (et nous devons travailler à ce qui le soit plus encore), mais il est demeuré long en temps de calcul. Nous avons déjà mené 3 « vagues » successives d'améliorations sur ce point spécifique, mais il ne fait nul doute qu'il faille encore améliorer cet aspect-là.

Nous voudrions à ce titre également mieux définir le paramètre λ qui pondère la formule de calcul de Δt par Barnes-Han-Lee [2]. Douthe, Baverel et Caron disent à son sujet [16] *“In this expression, λ is a parameter slightly higher than 1 that insures the stability of the algorithm and an acceptable time of convergence.”* Rappelons que cette variable a un impact significatif sur le nombre d'itérations nécessaires avant convergence de l'algorithme.

L'intégration d'une interface graphique est aussi une réflexion à mener, il s'agit d'aider à l'ergonomie sans toutefois recréer un fonctionnement « en boîte noire » comme celui de la suite Kangaroo. L'idée permettrait en outre de hiérarchiser le niveau d'utilisation de l'outil en fonction des besoins de l'utilisateur. Cette interface pourrait par exemple avoir deux ou trois niveaux d'utilisation : un accès « architecte » pour la poursuite efficace d'une recherche de forme du projet, une entrée « ingénieur » qui donne accès aux paramètres mécaniques de vérification des structures et un autre accès « constructeur » pour la réalisation des plans de fabrication et de montage.

- Quelques parties ne sont pas encore abouties en termes d'automatisation.

Les gridshells à simple lattage nécessitent par exemple encore des manipulations non automatisées qui réduisent l'autonomie de l'algorithme conçu.

Autre exemple, les plans de fabrication et de montage pour un gridshell formant une longue voûte ne fonctionnent pas bien et nécessitent une modification particulière difficile à manipuler pour quiconque n'a pas directement conçu l'outil.

- Si l'algorithme ELASTICA est ergonomique, ce n'est pas du tout le cas de l'algorithme BAYA qui est aujourd'hui très complexe à utiliser pour quelqu'un qui n'a pas participé à sa conception. Étant donnée la richesse promise par un possible usage de la vannerie pour les structures en architecture, il nous semble très important d'améliorer ce point-là.

- Lors de nos applications à l'échelle 1, nous avons constaté que les sorties graphiques de BAYA (plans de tressages), reproduisant le tressage réel, étaient extrêmement compliquées à lire et à mettre en œuvre. Nous travaillons sur la mise au point de plans plus utilisables, en nous basant sur la méthode de tressage qu'appliquent les vanniers lorsqu'ils réalisent leurs projets.
- Ouvrir la voie à de nouvelles possibilités, en créant des sortes de *plug-in* : nous cherchons par exemple cette année à vérifier la validité des résultats obtenus par une modification de l'algorithme qui permet le calcul des gridshells élastiques post-formés et tressés ou entrelacés.

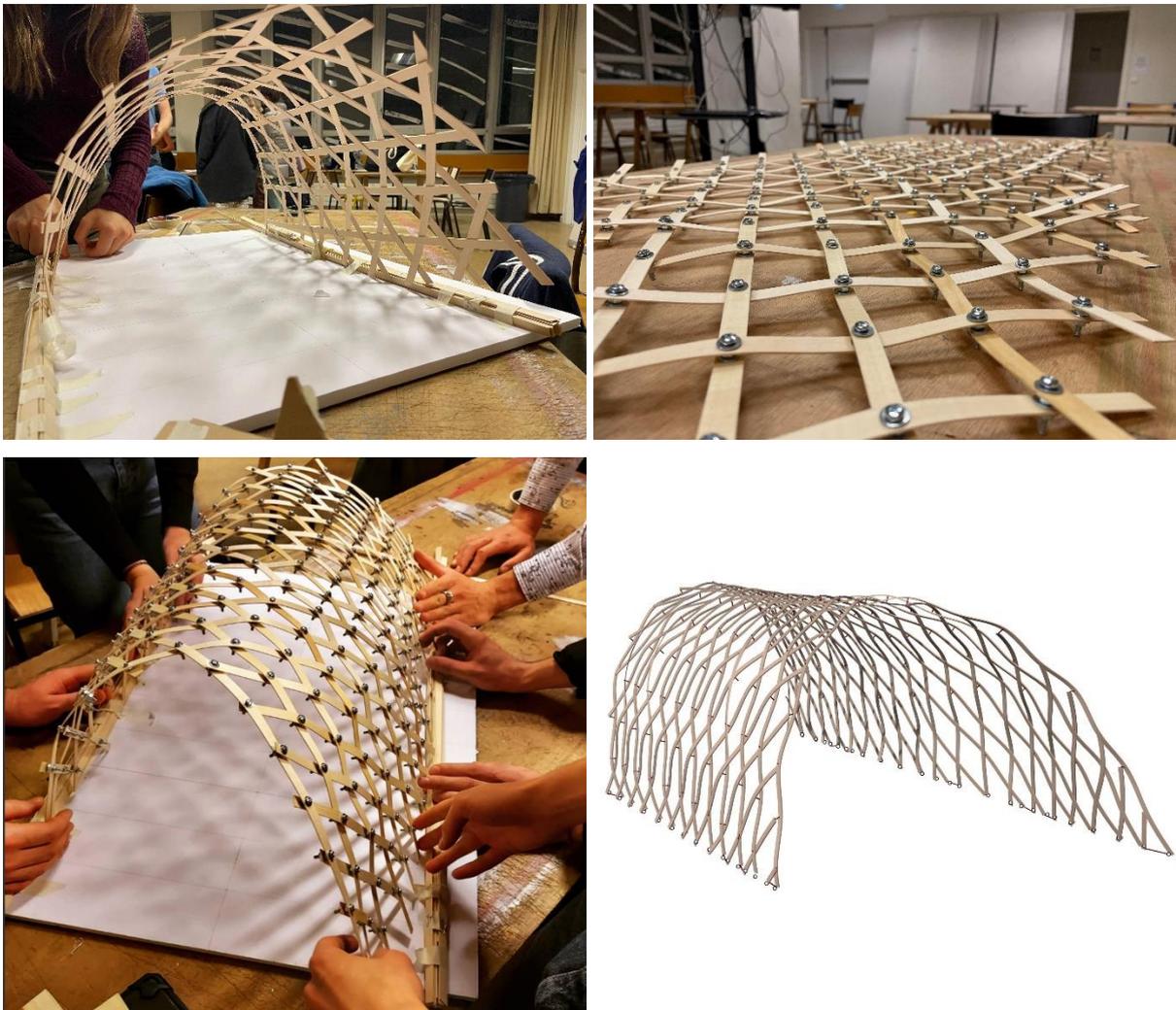


Figure 149 – Études sur les gridshells entrelacées et algorithme ELASTICA modifié.

Poursuite de la mise à l'épreuve expérimentale de la validité des modèles produits

Comme nous l'avons évoqué progressivement dans ce document, nous avons déjà mené toute une série d'expériences pour vérifier la validité de nos modèles numériques, mais il reste encore de nombreux essais à conduire. En outre les résultats de certains tests que nous avons menés ont soulevé d'autres questions auxquelles nous souhaitons apporter des éléments de réponses dans les années à venir :

- Concernant ELASTICA, nous avons pu en 2021 et en 2022 confronter les résultats obtenus sur des maquettes numériques à ceux issus d'essais de chargement de maquettes physiques. Cependant, nous avons mis en évidence la sensibilité des résultats avec un certains nombres de biais :
 - Biais de conception (asymétrie, etc.)
 - Biais de chargement (charge répartie vs. ponctuelle, décalage à l'accroche de la charge, symétrie du chargement, etc.)
 - Biais géométriques liés à la mise à l'échelle, en particulier au niveau des assemblages. Quasi-impossibilité de mettre à l'échelle la raideur des assemblages.

Nous avons souligné que nos essais, bien que significativement cohérents entre eux, n'étaient pas encore assez nombreux pour pouvoir quantifier précisément l'influence de ces biais dans chaque résultat. Il conviendrait de continuer ces essais comparés dans le futur afin de la déterminer, et de conclure en conseillant les concepteurs sur les actions qu'ils doivent prendre vis-à-vis de cela.

- Concernant BAYA, nous poursuivons – notamment avec les étudiants et encadrants de l'école CentraleSupélec de Paris – les tests sur l'éprouvette numérique ayant permis de tirer les premières lois de tressage optimal en fonction du champ des contraintes : corrections de bogues, affinement du pas de variation des paramètres étudiés, étude plus poussée de la cohésion des nœuds.

En effet, l'algorithme BAYA a été nourri par une série d'expériences sur une éprouvette numérique de tressage afin de trouver le tressage optimal correspondant à un ensemble de forces donné. Lors de cette première recherche, nous n'avons jamais réussi à traduire de façon suffisamment satisfaisante la cohésion en translation et en rotation des nœuds, avec parfois des taux de travail de près de 500% pour des tressages très denses.

Nous pensions à une éventuelle erreur dans les calculs. Cependant le pavillon à échelle 1 a montré que les nœuds n'étaient pas tout à fait cohésifs et que le pavillon subissait

une relaxation à long terme sous chargement cyclique (= à chaque chargement les nœuds glissaient un peu et le pavillon suspendu s'allongeait).

De cet enseignement, il est licite de penser qu'une explication peut être qu'à cette échelle architecturale, la cohésion de certains nœuds d'un tressage structurel ne peut pas être assurée sans ligaments au niveau de ceux-ci... ou d'une autre force. Nous reviendrons sur ce dernier point dans le dernier paragraphe de cette conclusion.

- L'expérience identique mais sur une éprouvette physique entamée en séminaire PCPA de l'ENSA Paris la Villette avec Morgan Dannenmüller est en cours, en partenariat également avec l'école CentraleSupélec de Paris.
- L'étude sur l'efficacité de la poutre tressée obtenue avec BAYA comparée à une poutre treillis de type Pratt utilisant la même quantité de matière est en cours et nous projetons d'en publier les résultats début 2023.
- D'autres expériences sont en cours de réalisation, notamment afin de caractériser mieux les modules d'élasticités et les contraintes limites élastiques des matériaux (rappelons que nos simulations ont été construites sur des moyennes bibliographiques de valeurs réparties dans un spectre très large).
- Enfin, des applications à l'échelle 1 sont mises en place. Elles nous permettent d'observer à échelle humaine les effets de certains paramètres que BAYA ne prend – pour l'instant – pas encore en compte :
 - Déformées instantanée et long terme des coques tressées.
 - Instabilités globales et voilement de ces coques.

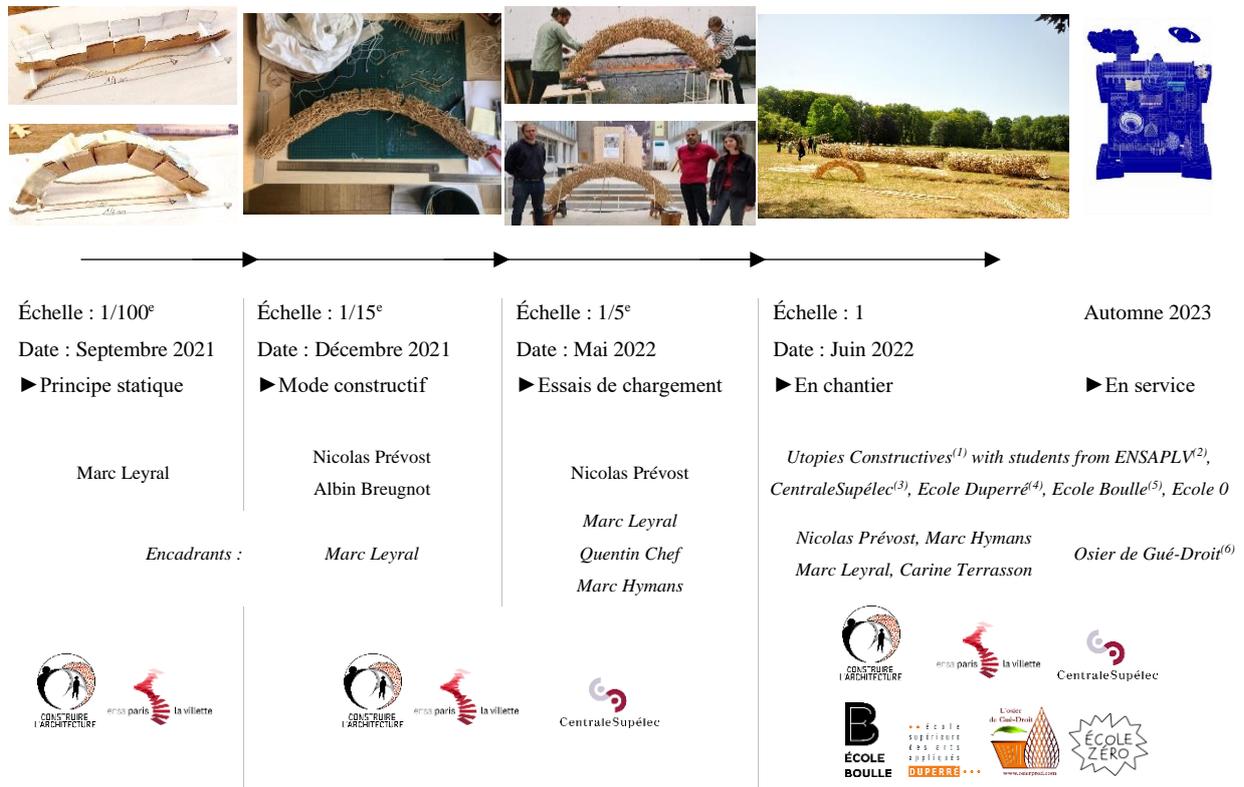
Nous aimerions réussir à caractériser ces paramètres dans l'outil numérique de conception. Il s'agit d'une tâche assez complexe étant donné la nature même de la conception de cet outil.

Mettre en œuvre des synergies dans l'évolution du souple au raide sur d'autres types de structures.

Il s'agit ici d'étudier, à travers divers projets, comment les acquis du souple au raide sur le mode constructif (gridshells élastiques post-formés) et sur le matériau (coques structurelles tressées en osier) peuvent s'accorder ensemble dans de nouvelles typologies architecturales.

J'aimerais conclure sur cet axe en citant un sujet d'études en cours, notamment avec Nicolas Prévost en séminaire PCPA et en collaboration avec Albin Breugnot, Victor Bardy, Mélanie

Bento, Quentin Chef et Marc Hymans : la réalisation d'une passerelle en osier de 12,80 mètres dans le parc du château de Richelieu dans le cadre du festival Utopies Constructives.



⁽¹⁾Utopies Constructives : Marc HYMANS, Geoffrey CLAMOUR, Camille SINEAU, Camille DE BROISSIA, Anna DANIELSSON, Benjamin MAROLLEAU (La Teinturerie) ; ⁽²⁾ENSAPLV : Nicolas PREVOST, Albin BREUGNOT, Victor BARDY, Mélanie BENTO, Salomé CHANTOB ; ⁽³⁾ CentraleSupélec : Emmanuel BERREBI, Maggy ZHOU, Ethan AZERAD, Théodore TARRIDE ; ⁽⁴⁾Ecole Duperré : Léa ROUSSEL, Ines TOUAMI, Emma BULANT, Garance BASSEPORTE, Emma ANGE, Flavie THIBAUD, Marion LEANDRE, Manon POUJOLY, Sharleen SIVAC ; ⁽⁵⁾Ecole Boulle : Anouchka BURON, Svetlana GOLUNSKI, Anouk JOURDAN-DORSTER, Ines MACIA, Arnaud BOURGANEL, Jeanne FAUST-DEKEUWER, Enzo AUDION, Renan LHONOREY, Celia BANYIK, Charlotte TIRARD, Coline JOUSSET ; ⁽⁶⁾Osier de Gué-droit : Matthieu BOYER, Séverine BOYER, Patrick BOYER

*Encadrement séminaire ENSAPLV : Suzel Balez, Nazila Belkadi, Dalil Hamani, avec la participation de Sylvain Ebode.

Figure 150 – Frise en ordre chronologique de la conception du projet et de la participation des différents acteurs [photo chantier : Inès Macia].

Les Utopies Constructives sont un festival organisé par le BETA qui se déroulera en septembre 2023 dans le cadre prestigieux du parc de la ville de Richelieu. Il est organisé par le BETA, la Teinturerie et La Chancellerie des Universités de Paris, en partenariat avec le Campus des Métiers d'Art et du Design. Il se divise en trois temps :

1. Construction de passerelles expérimentales.
2. Cycle de conférences et ateliers participatifs.
3. Pédagogies développées en parallèle avec des écoles (ENSAAMA, Duperré, école Boulle, CentraleSupélec, Université de Stuttgart, ENSA-Paris la Villette, etc.). Les travaux des étudiants seront exposés lors du festival.

Dans ce cadre, une passerelle expérimentale pérenne sera réalisée au terme d'une collaboration entre le BETA et l'ILEK. L'idée est de franchir environ 12,80 m avec 1 m³ de béton seulement grâce au fruit des recherches poursuivies à l'ILEK sur l'optimisation de matière avec ce matériau.

Lui faisant face, notre passerelle sera temporaire (elle durera le temps du festival, soit environ 2 semaines). Elle sera réalisée en osier, ce qui particulièrement innovant. Nous avons réalisé fortuitement à l'issue de la phase de conception qu'elle serait constituée exactement d'un 1 m³ d'osier, ce qui renforce le dialogue avec celle en béton. Les études de cette passerelle ont été présentés et publiés au symposium international de l'IASS et de l'APCS 2022 [39].

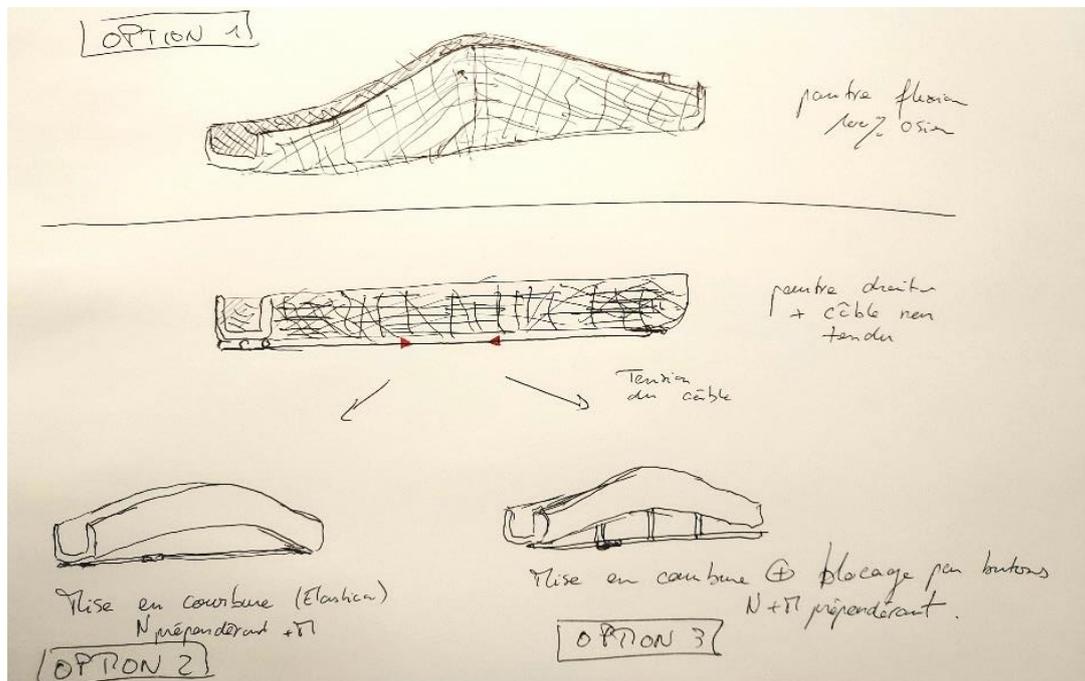


Figure 151 – Premiers croquis d'intention de la passerelle en osier du festival Utopies Constructives [Leyral M.].

Une première réflexion esquissait trois pistes :

1. Fonctionnement en poutre 100% osier.
2. Réalisation inspirée du mode constructif des gridshells élastiques post-formés : tablier construit à plat puis mis en précontrainte par deux tirants en corde positionnés en dessous, avant de retresser l'élastica obtenue pour la rigidifier. Fonctionnement en phase de service en funiculaire.
3. Idem 2, mais on place en plus des boutons : on construit comme un gridshell élastique post-formé mais le fonctionnement en phase de service est plutôt celui d'une passerelle sous-tendue.

La question posée précédemment de la cohésion des nœuds des coques tressées, et mise en évidence sur le pavillon Baya, nous a conduits à choisir l'option de conception n°2 : à ce stade, les coques tressées réalisées (Baya) avaient une cohésion nodale uniquement assurée par la flexion locale des brins de tressage. Ajouter une flexion globale par la précontrainte pourrait résoudre le problème de glissement au niveau des nœuds. De plus cette solution est bien plus raide et nécessitera beaucoup moins de matière qu'une solution 100% osier.

La passerelle projetée est assez originale car, en plus d'être en osier, on imagine de la construire et de la faire fonctionner comme un gridshell élastique post-formé : elle sera construite souple et à plat, puis sera mise en forme par la prétention d'une corde qui relie ses pieds avant d'être raidie définitivement. Elle fonctionnera comme un pont bow-string élastique et post-formé. La souplesse évolutive de l'osier devrait nous apporter une aide significative dans sa réalisation. Cependant la légèreté du matériau jouera contre le fonctionnement en funiculaire de la passerelle, qui devra probablement être couverte d'un mortier de terre afin de la lester, de sorte que son poids propre soit suffisamment élevé par rapport aux charges variables qu'elle reprendra.

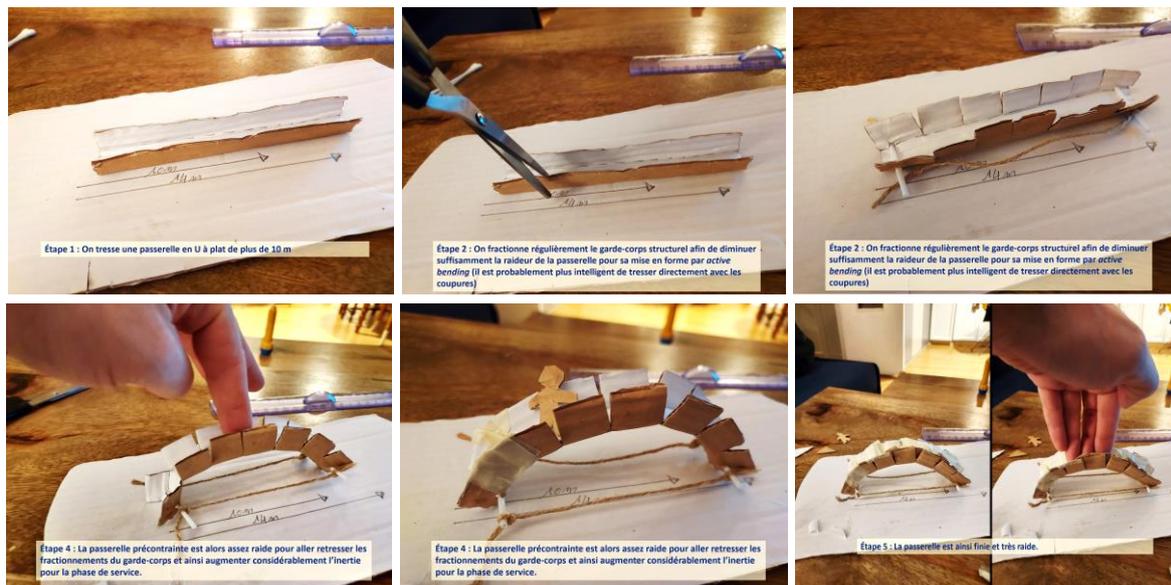


Figure 152 – Intention de cinématique de réalisation d'une passerelle en osier sur maquette préliminaire [Leyral M.].

Cette passerelle requiert l'utilisation conjointe des algorithmes ELASTICA (phase de mise en forme – forme élastica) et BAYA (phase de service, fonctionnement funiculaire).

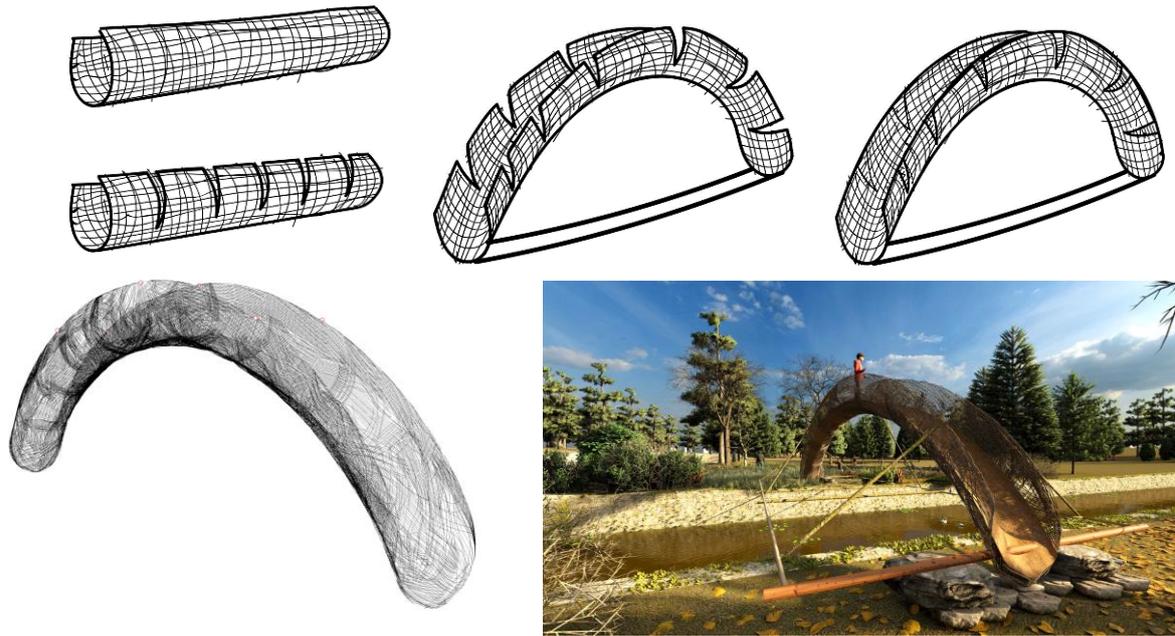


Figure 153 – Phasage de la construction et tressage préliminaire par l'algorithme BAYA de la passerelle en osier des Utopies Constructives [Breugnot A., Prevost N., Leyral M.].

Nous espérons tirer beaucoup d'enseignements de cette aventure constructive. Notamment par l'observation du mode de ruine de l'ouvrage, qui est déterminant puisque BAYA ne sait anticiper que les modes locaux.

Tableau 18 – Modes de ruptures pressentis pour la passerelle [croquis par Nicolas Prévost].

Mode M1 <i>Rupture de l'osier par traction.</i>	Mode M2 <i>Rupture en contrainte de l'osier par compression.</i>	Mode M3 <i>Rupture locale de l'osier par flambement</i>	Mode M4 <i>Rupture par flambement global de l'arc.</i>	Mode M5 <i>Rupture des cordes en traction.</i>

Les modes de rupture **M1**, **M2** et **M3** sont normalement pris en compte par BAYA. Nous les avons calculés avec une charge limite équivalent au poids de quatre personnes réparties sur la passerelle. **M4** est très simple à évaluer. Enfin **M5** peut être critique et nous avons décidé d'observer sa survenue ou non par des essais de chargements sur des maquettes échelle 1/5.

Le mode de rupture qui eu lieu a effectivement été **M5** (pour le poids d'un peu plus d'une personne à échelle 1). Ce constat a conduit à l'ajout d'anti-dévers. Nous comprenons ainsi que poursuivre les études pour prévoir les modes de ruptures globaux semble une évolution essentielle à nos travaux.



Figure 154 – Essais de chargements sur modèle réduit à échelle 1/5^{ème} avant et après l’ajout d’anti-dévers.



Figure 155 – Chantier de la passerelle en osier des Utopies Constructives.

Note sur la contribution des étudiants et des co-auteurs

Contributions des étudiants. J'ai régulièrement cité le travail effectué dans trois différentes années du CTA Explorer à l'échelle 1 (2019-2020, 2020-2021 et 2021-2022), les noms des étudiants sont cités en introduction des parties, respectivement pour chaque années en 4 *Évolutivité du souple au raide dans le mode constructif : concevoir, modéliser et étudier les gridshells élastiques*, 5 *Projet Baya : évolution du souple au raide dans la matérialité des coques structurelles réalisées grâce au tressage de fibres végétales* et 4.7 *Validité des résultats issus de l'étude de modèles numériques et de modèles physiques*. J'ai également mentionné celui d'encadrement du mémoire de Master de Nicolas Prévost en 2020-2021.

Les contributions des étudiants reposent entre autres sur des recherches bibliographiques, et des présentations en cours sur les états de l'art et certains développement des projets, la participation à la construction des maquettes et des pavillons échelle 1. Ils sont également chaque année co-auteurs de manuscrits (à ce jour non publiés) et réalisent les illustrations (leur nom est cité en légende des figures et je présente mes excuses aux étudiants que j'aurais pu omettre ou mal référencer).

Je tiens à souligner particulièrement les contributions de Geoffrey Louison sur le projet du pavillon *Elastica*, Mohamed Zitouni pour la mise en page des notices de l'algorithme et l'organisation du chantier du même projet, Wided Cherif pour son travail sur l'état de l'art, les illustrations et la communication autour des projets, Anastasia Komisarova pour le travail illustratif, Victor Bardy, Léo Pauvarel, Marie Merle et Marius Bauduret pour le projet *Baya* et l'organisation du chantier, Albin Breugnot pour l'aide précieuse dans l'implémentation les relations « forces – tressages » dans *BAYA* et l'application sur les projets (pavillon *Baya* et passerelle en osier), Alexis Meyer qui a travaillé sur l'implémentation de la flexion dans le plan dans *ELASTICA* et qui a corrigé des erreurs dans *BAYA*, les étudiants de l'école CentraleSupélec qui conduisent les tests de caractérisation de l'osier, Tom Bardout et Romain Antigny pour les constructions avec leurs camarades des (nombreuses) maquettes et du projet *Kagome*. Nicolas Prévost a mené le projet architectural de la passerelle et réalisé les maquettes testées à l'échelle 1/5, il coorganise aussi la logistique de cette application de *Baya*. Evidemment cette liste n'est pas exhaustive car les étudiants sont nombreux et leur participation à l'obtention de ces résultats revêt des formes très diverses.

Contributions des co-auteurs (hors étudiants). Quentin Chef a corrigé le premier modèle d'éprouvettes numériques de tressages puis effectué et analysés les résultats afin de tirer les relations « forces – tressages » utiles à BAYA, il encadre les étudiants de CentraleSupélec où il dirige actuellement les essais de caractérisation mécanique de l'osier et m'assiste dans le cours à La Villette, il a participé à la rédaction et à la correction des articles, ainsi qu'à leur présentation. Avec lui et Marc Hymans nous coorganisons les études et les chantiers de la passerelle en osier, ainsi que prochainement la Semaine Design aux Ponts et Chaussées. Pierre Guerold et Sylvain Ebode ont relu et corrigé les contenus formels et scientifiques des publications.

Bibliographie

- [1] Barnes M. R., Form-finding and analysis of tension space structures by dynamic relaxation, PhD thesis. City University London, 1977.
- [2] Barnes M. R., *Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation*. International Journal of Space Structures 14, 2, 1999, 89-104.
- [3] Bernoulli J., Quadratura curvae, e cujus evolutione describitur inflexae laminae curvatura. In *Die Werke von Jakob Bernoulli*, pages 223–227. Birkhäuser, 1692. Med. CLXX; Ref. UB: L Ia 3, p. 211–212.
- [4] Bernoulli J., Curvatura laminæ elasticæ, Acta Erud. 262-275 (juin 1694) repris in Opera, T1, § LVIII, 576-600, Cramer & Philibert, Genève (1744).
- [5] Bouhaya L., Thèse de doctorat – *Optimisation structurelle des gridshells*. École doctorale science ingénierie et environnement, 2010.
- [6] Born M., Untersuchungen über die Stabilität der elastischen Linie in Ebene und Raum, under verschiedenen Grenzbedingungen, Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, 1906.
- [7] Coker E. G. and Filon L. N. G., *A Treatise on Photo-Elasticity*. Cambridge University Press, 1931.
- [8] Crook J. H., Field experiments on the nest construction and repair behavior of certain weaver birds. Journal of Zoology 142, Août 2009, 217-255.
- [9] D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., *Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, The Institution of Structural Engineers, Published by Elsevier Ltd, 2015.
- [10] Danz C., Reciprocal Frames, Nexorades and Lamellae: An investigation into mutually supporting structural forms. University of Washington / Prof. Brian R. Johnson, Advising, 2014.
- [11] Davis T. A., *Mud and dung plastering in baya nests*. Biological Sciences, 1973.
- [12] Day A. S., An introduction to dynamic relaxation (Dynamic relaxation method for structural analysis, using computer to calculate internal forces following development from initially unloaded state). The engineer, 1965, 219, 218-221.
- [13] De Rycke K., Leyral M., Pierre A., Connecteurs architecturaux pour ossatures en bambou, fabricA n°13, LéaV, Versailles, 2019.
- [14] De Rycke K., Covillault P., Architectural connectors for bamboo structures, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Janvier 2022.

- [15] Douthe C., Thèse de doctorat – *Étude des structures élancées précontraintes en matériaux composites : application à la conception des gridshells*. École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- [16] Douthe C., Baverel O., Caron J.-F., Form-Finding of a Grid Shell in Composite Materials. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures : IASS*, 2006.
- [17] Duchesnes R., Ferrand H. and Thomas J., *La Vannerie, l'Osier*. Éditions Dominique Guéniot, nouvelle édition, 2009.
- [18] Du Peloux de Saint Romain L., Thèse de doctorat – *Modeling of bending-torsion couplings in active-bending structures: application to the design of elastic gridshells*. UMR Navier, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2017.
- [19] Dyvik S.H., Manum B., Rønnquist A. *Gridshells in Recent Research—A Systematic Mapping Study*. *Applied Science* 2021, 11, 11731. <https://doi.org/10.3390/app112411731>
- [20] Euler L., *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes (Additamenta 1 De curvis elasticis & 2)*. Bousquet, Lausanne & Genève, 1744.
- [21] Ghys E., *Sur la coupe des vêtements. Variation autour d'un thème de Tchebychev*. *L'Enseignement Mathématique*, Volume 57, 2011, 165-208.
- [22] Gros P., *L'architecture romaine du début du III^e s. av. J.-C. à la fin du Haut-Empire, tome 1 : les monuments publics*, Picard, 2002, (ISBN 2708406736).
- [23] Gründ, *Rome antique, une civilisation qui a conquis le monde*, p. 122-127.
- [24] Happold E. and Liddell W. I., *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*. *The Structural Engineer*, Vol. 53, No. 3, London, 1975, 99-135.
- [25] Hérisset R., *La Vannerie en Bretagne : Nouvelle approche de l'ethnologie de la vannerie et contribution à l'étude des composantes culturelles*. Presses Universitaires de Rennes, 2014.
- [26] Hooke R., *A Description of Helioscopes, and some other Instruments*. T.R. Londres, 1676.
- [27] Labbé C., *Quoi de neuf / le gridshell (des jours meilleurs) ?* Archistorm, février 2018.
- [28] Le Corbusier, *Vers une architecture*. G. Cres, Paris, 1923, p. 53.
- [29] Leyral M., *Faire Tenir – Structure et architecture*. Éditions de la Villette, coll. *Savoir faire de l'architecture*, Paris, 2021. ISBN 978-2-37556-037-2.
- [30] Leyral M., Ebode S., Guerold P. and Berthou C., *Elastica project: dynamic relaxation for post-formed elastic gridshells*. *Proceedings of the IASS Annual Symposium*, Surrey, 2021.
- [31] Leyral M., Chef C., Guerold P. et Ebode S., *The Baya Nest pavilion project: braided pattern optimization for hanging shell structures by dynamic relaxation*. *Proceedings of the IASS Annual Symposium*, Surrey, 2021.

- [32] Leyral M., Chef C., Bardout T., Antigny R. et Meyer A., Kagome Project: Physical and Numerical Modeling Comparison for a Post-formed Elastic Gridshell, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 16 Vol.4, 04/2022 DOI: 10.17265/1934-7359/2022.04.004
- [33] Leyral M., Vendeville J., Reynaud E., *Una torre Montparnasse contemporanea*, tesi di Master, Politecnico di Milano, 2011, <https://issuu.com/ml08/docs/tesi/93>.
- [34] Levien R. L., *The elastica: a mathematical history*, Technical Report No. UCB/EECS-2008-103, University of California, Berkeley (2008) (Extrait de *From Spiral to Spline: Optimal Techniques in Interactive Curve Design*, PhD Thesis, 2009).
- [35] Mellgren J., *Vannerie au fil des saisons*. L'inedite, Paris, 2011.
- [36] Mutschler C., in Bauwelt, 1974.
- [37] Otter J. R. H., Computations for prestressed concrete reactor pressure vessels using dynamic relaxation. Nuclear structural engineer, 1964.
- [38] Philippart de Foy G., *Les Pygmées d'Afrique centrale*. Éditions Parenthèse, Paris, 1984.
- [39] Prevost N., Leyral M., Hymans M., Breugnot A., Chef Q., Ebode S., Cherif W., Building crossings in wicker: flexible construction of a post-formed footbridge in active bending stiffened during service phase, September 2022, *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2022 & the 13th Asian-Pacific Conference on Shell and Spatial Structures: Innovation, Sustainability and Legacy*, Beijing, China.
- [40] Prevost O., *Comment construire une charpente réciproque*. <https://terrepaille.fr>, 2014.
- [41] Quader S., Nesting and mating decisions and their consequences in the Baya weaverbird, *Ploceus philippinus*. Université de Floride, 2003.
- [42] Roland, C., *The Work of Frei Otto*, Longman, 1970.
- [43] Rombouts J., Thèse de doctorat – *Optimal design of Gridshells*. Université des sciences de l'ingénieur de Bruxelles, 2019.
- [44] Reclus É., *L'Homme et la Terre*. Volume 1 : Les ancêtres. – Histoire ancienne. Librairie Universelle, Paris, 1875.
- [45] Tayeb, F. Thèse de doctorat – *Simulation numérique du comportement mécanique non linéaire de gridshells composés de poutres élancées en matériaux composites et de sections quelconques*. École Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité Mécanique - Structures et Matériaux, 2015.
- [46] Tchebychev P. L., *Sur la coupe des vêtements*. Association française pour l'avancement des sciences, Congrès de Paris, 1878.
- [47] Van Beek G. W., *Archi e volte nell'antico Vicino Oriente*, Le Sienze, Milano, sept. 1987.
- [48] Viollet-le-Duc E.-E., Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle, tome IX, article Voûte.

[49] Viollet-le-Duc E.-E., *Histoire de l'habitation humaine*. J. Hetzel et C^{ie}, Paris, 1875.

[50] Vitruve, *De l'architecture*. Livre II, Tome premier, Chapitre 9. Des bois de construction. trad. nouvelle par M. Ch.-L. Maufra. C. L. F. Panckoucke, 1847.

[51] Watzky A. and Bueno M.-A., *L'elastica revisitée sous l'angle des efforts*. 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, 2011.

Annexes

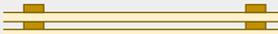
Annexe 1 – État de l’art de la conception des gridshells élastiques post-formés

Les types de membrures

Description

On distingue plusieurs types de membrures en fonction de la forme des éléments, de leur nombre et de la façon dont ils sont reliés. On peut toutefois citer trois grandes familles :

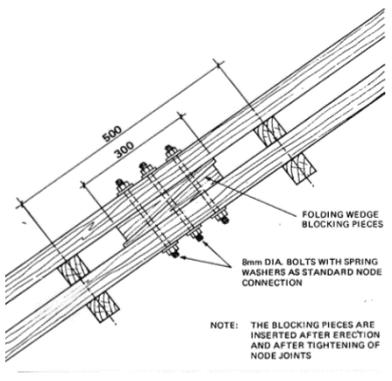
Tableau 19 – Les trois grandes familles de lattages des gridshells élastiques post-formés.

Type de membrures	Description	Schéma	Avantages	Inconvénients
Simple lattage	Chaque réseau de la grille est composé des éléments simples et assemblés généralement via un boulon dans un trou normal.		<ul style="list-style-type: none"> • Très peu de matière. • Très simple et rapide à fabriquer, pas de trou oblong. 	<ul style="list-style-type: none"> • Très souple.
Double lattage non solidarisé	Chaque réseau de la grille est composé de deux lattes. Les réseaux sont généralement assemblés entre eux via un boulon dans un trou oblong au niveau des nœuds. L’assemblage des deux lattes entre elles se fait à cet endroit uniquement. Le faible nombre d’assemblages et la présence des trous oblongs assurent une complète désolidarisation des deux lattes. Dans ce cas, la grille est inchangée entre la phase d’érection et la mise en service (mise à part l’ajout des contreventements).		<ul style="list-style-type: none"> • Assemblage assez rapide, cependant moins que celui du simple lattage du fait des trous oblongs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Souplesse élevée, même si deux fois moindre qu’un simple lattage. • Consommation de matière multipliée par 2.
Double lattage solidarisé	Chaque réseau de la grille est composé de deux lattes. Les réseaux sont généralement assemblés entre eux via un boulon dans un trou oblong au niveau des nœuds. L’assemblage des deux lattes entre elles se fait de façon rigide via des blocs de cisaillement à intervalles réguliers. Cela assure une parfaite solidarisation des deux lattes qui fonctionnent comme un unique élément rigide de façon assez similaire à une poutre échelle ou Vierendeel. Cette raideur est trop grande pour la phase d’érection, il faut donc ajouter les blocs de cisaillement une fois le gridshell formé et avant la mise en service.		<ul style="list-style-type: none"> • Très rigide (26 fois plus qu’un simple lattage). 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation de matière multipliée par environ 2,5 par rapport à un simple lattage. • Long à mettre en place, travail en hauteur pour l’ajout des blocs de cisaillement. • Insertion des blocs difficile sur une grille déjà courbée.

État de l'art

On peut distinguer ces diverses méthodes dans l'état de l'art des gridshells :

Tableau 20 – État de l'art sur les diverses façons de réaliser le lattage des gridshells élastiques post-formés.

Projet	Auteurs	Type de lattage	Photographie générale du projet	Photographie rapprochée ou détail
Multihalle Mannheim	<p>Carlfried Mutschler, Frei Otto, Joachim Langner</p> <p>Source : [24]</p>	Double solidarisé		
L'Ombrelle	<p>ENSAPLV (M. Leyral, A. Dubois, T. Morlé-Devès, J. Bèlart, & co.)</p> <p>Source : www.construire-l-architecture.com/04-l-ombrelle</p>	Double non solidarisé		
Waitomo Glowworm Caves Visitor Centre	<p>Architecture Workshop</p> <p>Illustration : Kristina D.C. Hoepfner from Wellington, New Zealand</p>	Double solidarisé		
Gridshell au parc Travis de San Antonio	<p>CoA</p> <p>Illustration : The Architect's Newspaper</p>	Double solidarisé		

Projet	Auteurs	Type de lattage	Photographie générale du projet	Photographie rapprochée ou détail
Weald and Download Gridshell	Dunning Thornton Consultants et Architecture Workshop	Double solidarisé		
Cathédrale éphémère à Créteil	Caron, Baverel (Laboratoire NAVIER, ENPC) et TESS. Source : [45]	Simple		
Pavillon allemand à l'Exposition universelle de 1967 à Montréal	Frei Otto et Rolf Gutbrod	Simple		

Les aboutages

Description

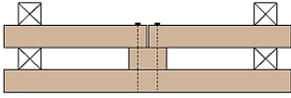
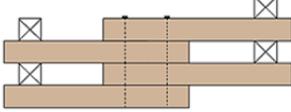
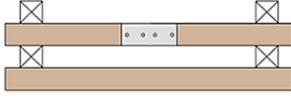
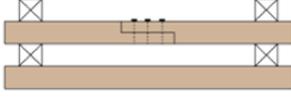
Les bois bruts de scierie font généralement 3 à 4 mètres de longueur et sont donc généralement bien plus courts que les éléments constituant chacune des nappes orthogonales. Il est donc nécessaire d'abouter les lattes les unes à la suite des autres pour obtenir une membrure continue de la longueur souhaitée.

L'assemblage d'aboutage doit être suffisamment solide pour que les lattes résistent en flexion, tout en préservant au maximum leur capacité à se déformer. Afin de maintenir la section de bois pouvant travailler, l'aboutage est généralement réalisé en quinconce (l'aboutage d'une latte de la nappe supérieure est suffisamment décalé de celui de la nappe inférieure afin d'éviter que deux sections ne soient interrompues au même endroit).

Toutes les solutions d'assemblages doivent permettre de tolérer un jeu centimétrique sur la longueur de la latte (et donc la position relative des deux abouts à assembler).

État de l'art

Tableau 21 – Quatre procédés pour abouter les lattes des gridshells élastiques post-formés.

Type d'aboutage	Schéma	Avantages	Inconvénients
Par bloc de continuité		<ul style="list-style-type: none">• Simple à mettre en œuvre.• Peu onéreux.	
Par chevauchement		<ul style="list-style-type: none">• Très simple à mettre en œuvre.• Très peu onéreux.	<ul style="list-style-type: none">• Aspect visuel impacté.
Par plat métallique		<ul style="list-style-type: none">• Aspect visuel peu impacté.• Mise en œuvre simple.	<ul style="list-style-type: none">• Augmentation ponctuelle de la rigidité en flexion à l'aboutage.• Assez onéreux.
Par assemblage à mi-bois		<ul style="list-style-type: none">• Aspect visuel très peu impacté.	<ul style="list-style-type: none">• Fragilité sur le bois.• Réalisation complexe.

Les nœuds

Description

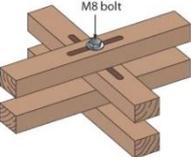
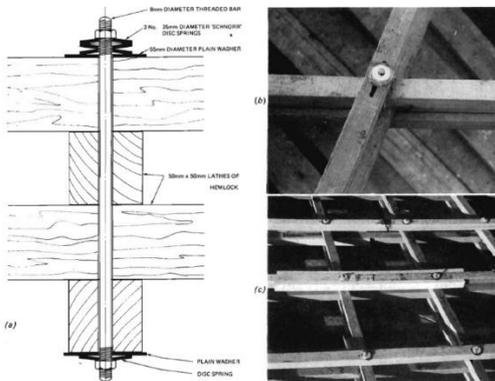
Il s'agit des zones d'intersection entre les deux nappes orthogonales de lattes, ils permettent de donner à l'ensemble son fonctionnement global et membranaire.

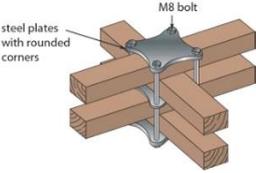
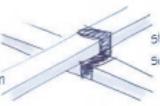
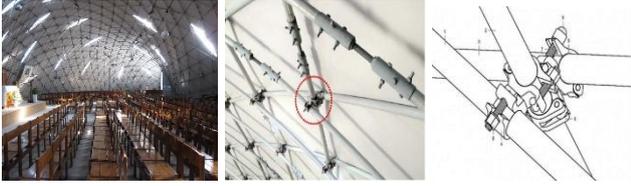
Il est nécessaire que les nœuds maintiennent l'écart des lattes constant au sein de la structure, mais qu'ils puissent également permettre une rotation de celles-ci autour de la normale à la surface afin que le gridshell puisse prendre sa forme finale au moment du levage. Le non-respect de cette condition est toutefois possible sous réserve de respecter des règles géométriques complémentaires comme de travailler sur une surface développable. Ce type de conception n'est toutefois pas celui que nous traitons ici.

Le détail des nœuds est celui qui est le plus important pour la faisabilité du gridshell. En effet, multipliés par les centaines, voire les milliers, de nœuds sur la grille, son coût et son temps de fabrication doivent être optimisés.

État de l'art

Tableau 22 – État de l'art sur les diverses façons de réaliser les nœuds des gridshells élastiques post-formés.

Type de nœud	Description et schéma / Références	Avantages	Inconvénients
Nœuds ligaturés	 <p>Les lattes de chacun des réseaux de la grille sont solidarisées au niveau des nœuds par un cordage, un fil de fer ou encore un tissu passant en croix au niveau du nœud avant d'être noué.</p> <p><i>Illustration</i> : Tectornic Design of Elastic Timber Gridshells, J. G. Fernandes, P. H. Kirkegaard, J. M. Branco</p> <p><i>Référence</i> : Pavillon du Japon à l'Expo 2000 de Hanovre, par Shigeru Ban et Buro Happold.</p>  <p>Figure 156 – Pavillon du Japon à l'Expo 2000 et zoom sur un nœud.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Solution peu onéreuse. • Ne nécessite que du matériel de base (cordage). Low Tech. • Très rapide à mettre en œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nœuds très lâches, solidarisation peu efficace. • Ne fonctionne qu'en simple lattage (pas de glissement possible entre les lattages en phase d'érection) • Risque de rupture (fragilité du nœud).
Nœuds boulonnés	 <p>[Illustration D. Naicu, R. Harris, C. Williams – Timber Gridshells: Design Methods and Their Application to a Temporary Pavilion]</p> <p>Les lattes de chacun des réseaux de la grille sont solidarisées au niveau des nœuds par un boulon. Une fois le gridshell en place, des rondelles de sécurité peuvent être serrées pour bloquer l'ensemble. Si le trou est normal dans le cas d'un simple lattage, il doit être oblong dans le cas d'un double lattage, afin de permettre le glissement de la partie supérieure du réseau par rapport à la partie inférieure, indispensable pour qu'il n'y ait pas de blocage lors du montage.</p> <p><i>Références en simple lattage</i> : Gridshell d'essai à Essen par Frei Otto ; Pavillon allemand à l'Exposition universelle de 1967 à Montréal par Frei Otto et Rolf Gutbrod.</p> <p><i>Références en double lattage</i> : Gridshell au parc Travis de San Antonio de CoA ; Multihalle de Mannheim par Frei Otto.</p>  <p>Figure 157 – Détail des nœuds de la Mutihalle de Mannheim [24].</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Solution peu onéreuse. • Ne nécessite que du matériel de base (perceuse, rondelles, boulons, écrous). 	<ul style="list-style-type: none"> • Dans le cas d'un double lattage, la réalisation des trous oblongs peut être chronophage. • Les trous peuvent concentrer ponctuellement les efforts et des fissures apparaître lors du montage. Celles-ci peuvent se prolonger sur toute la latte si le bois n'est pas assez tenace. Des lattes devront être changées lors du montage. • Les trous fragilisent la latte en réduisant sa section résistante. Les raideurs axiales et flexionnelles sont également réduites ponctuellement de façon proportionnelle à la largeur du trou.

Type de nœud	Description et schéma / Références	Avantages	Inconvénients
<p>Nœuds par plaques métalliques</p>	 <p>[Illustration D. Naicu, R. Harris, C. Williams – Timber Gridshells: Design Methods and Their Application to a Temporary Pavilion]</p> <p>Les nœuds sont réalisés par des plats métalliques. La solidarisation pouvant se faire par serrage des écrous des tiges filetées qui relient les plaques entre elles, le perçage du bois n'est pas obligatoire.</p> <p><i>Références</i> : Weald and Downland Gridshell de Edward Cullinan et Buro Happold, Waitomo Glowworm Caves Visitor Centre de Dunning Thornton Consultants et Architecture Workshop, Chiddingstone orangery dans le Kent (Royaume-Uni) par Peter Hulbert et Buro Happold.</p>  <p>Figure 158 – Détail des nœuds de la Weald and Downland Gridshell (à gauche) et du Waitomo Glowworm Caves Visitor Centre (à droite).</p>  <p>Figure 159 – Verrière de la Chiddingstone orangery (à gauche)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Solidité du nœud. • Solution pouvant permettre de ne pas percer le bois et, donc, de ne pas le fragiliser. • Les plats peuvent aussi servir à fixer les contreventements. • Peut servir de support à une couverture rigide, voire une verrière, très adapté aux gridshells non temporaires. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu <i>low-tech</i>, nécessite la fabrication des pièces métalliques, généralement sur mesure pour le projet. • Onéreux et peu économe en matière (jusqu'à trois plaques par nœud).
<p>Nœuds à bagues</p>	 <p>Une double bague, ou triple bague si elle relie aussi les contreventements, généralement métallique, vient enchâsser les deux lattes. Cet élément doit être montable en plusieurs morceaux sur site et permettre la rotation de la bague supérieure par rapport à la bague inférieure pour le réglage de l'angle.</p> <p><i>Illustration</i> : Tectormic Design of Elastic Timber Gridshells, J. G. Fernandes, P. H. Kirkegaard, J. M. Branco</p> <p><i>Références</i> : Soliday Pavilion (Paris 2011) par Olivier Baverel, Flying Dome (Berlin 2012) par E. Lafuente et C. Gengnagel, Cathédrale éphémère à Créteil (2013) par Caron, Baverel et TESS.</p>  <p>Figure 160 – Cathédrale éphémère de Créteil et détail des nœuds. Sources : [45] et www.thinkshell.fr</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptées aux gridshells à membrures tubiques. • Efficace pour la démontabilité de l'ouvrage en vue d'un éventuel remontage ultérieur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu <i>low-tech</i>, complexité de la pièce. • Solution onéreuse.

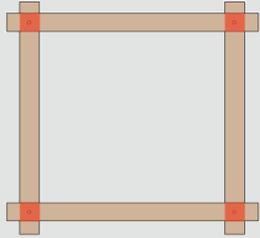
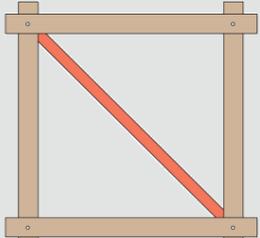
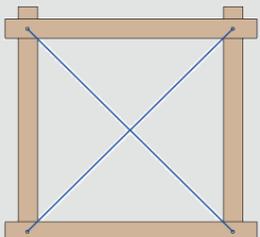
Le contreventement

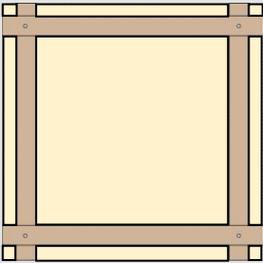
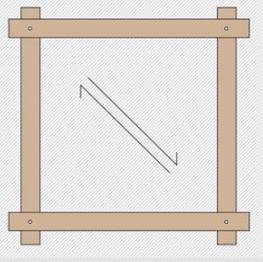
Description

Encastrement nodal, troisième direction de barres, plaque ou membrane surfacique, le contreventement remplit la fonction de rigidifier la structure après son érection dans sa forme finale. Il sert également à « bloquer » les angles entre les deux réseaux de lattes en position définitive afin que ceux-ci ne puissent plus s'ouvrir ou se refermer (comme un treillis de jardinage que l'on peut replier pour le ranger). Il doit en conséquence impérativement être positionné après l'érection, sans quoi la mise en forme de la grille serait impossible.

État de l'art

Tableau 23 – État de l'art sur les diverses façons de réaliser les contreventements des gridshells élastiques.

Type de contreventement	Description et schéma / Références	Avantages	Inconvénients
<p>Par encastrement</p> 	<p>Après érection, les nœuds sont rigidifiés et fonctionnent comme des encastrements.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Esthétique : absence de contreventement visible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexe à mettre en œuvre. • Risque de se dégrader dans le temps : le bras de levier du moment d'encastrement étant faible, les efforts y sont très importants.
<p>Par étais</p> 	<p>Après érection, des butons sont insérés dans une troisième direction. Ils reprennent à la fois les efforts de traction et de compression.</p>  <p>Figure 161 – Gridshell à Lecce (Italie, 2010).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Solution peu onéreuse. • Mise en œuvre simple. • Robuste/ • Peut être réalisé avec les mêmes sections de bois que les lattes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alourdissement visuel du gridshell.
<p>Par câbles</p> 	<p>Après érection, des câbles sont placés. Ceux-ci ne pouvant fonctionner qu'en traction, il est généralement nécessaire de les placer dans les deux diagonales (fonctionnement en croix de Saint-André : lorsqu'un câble est tendu, l'autre se relâche).</p>  <p>Figure 162 – Gridshell d'étudiants à Montpellier (à gauche, source Quaternion – M. Lambert, S. Hulin et M. Sudres), nœuds à plaque métallique avec fixation des contreventements</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre simple. • Robuste. • Léger, esthétiquement moins impactant que les étais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite généralement d'être « doublé » (un câble dans chaque diagonale).

Type de contreventement	Description et schéma / Références	Avantages	Inconvénients
<p>Par lattage ou par plaques</p> 	<p>de la verrière de la Chiddingstone orangery (à droite).</p> <p>Un lattage ou des plaques plus ou moins rigides sont placés sur un certain nombre de mailles. Reprenant à la fois compression et traction, ils permettent un fonctionnement en coque du gridshell final.</p>  <p>Figure 163 – Gridshell à Pishwanton (R.U., 2002)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Robuste. • Peu servir de support de couverture. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modifie le schéma structurel du gridshell. • Par plaques, la solution est complexe à mettre en œuvre (difficultés à courber les plaques rigides), impose au gridshell des efforts hors plan au niveau des fixations. • Peu économique. • Lourdeur visuelle, ne laisse pas passer la lumière.
<p>Par membrane</p> 	<p>Pendant en deux dimensions du système de câbles, la membrane reprend alternativement la traction dans l'une ou l'autre des diagonales.</p>  <p>Figure 164 – Prototype de gridshell contreventé par une membrane par E. Lafuente Hernández & C. Gengnagel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peut servir de couverture. 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de déchirement au niveau des nœuds.

Les blocs de cisaillement

Description

Destinés à rigidifier l'ensemble du gridshell après son érection, les blocs de cisaillement permettent de relier régulièrement les membrures supérieures et inférieures pour que celles-ci fonctionnent en treillis (ou plutôt en Vierendeel) plutôt que comme deux poutres séparées (voir Figure 72 – Principe d'augmentation de l'inertie par solidarisation des lattes avec des blocs de cisaillement (en gris), illustration Komisarova A. – CTA EE1.)

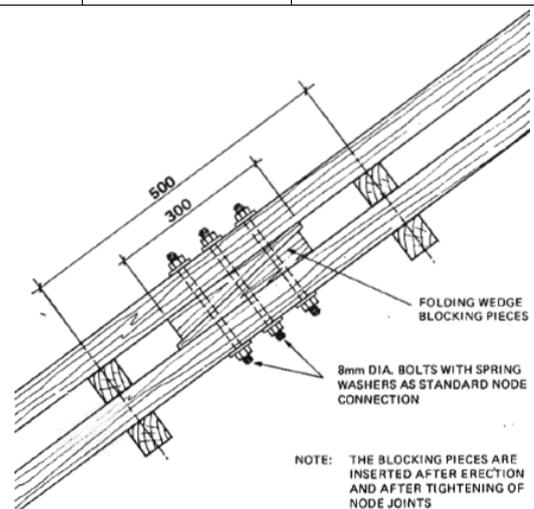


Figure 165 – Détail des blocs de cisaillement de la Multihalle de Mannheim [24]. Ceux-ci sont divisés en deux pièces de bois triangulaires pour faciliter leur insertion.

L'ancrage au sol

Description

La forme post-flambement, en flexion active, veut naturellement revenir à l'état à plat. L'ancrage au sol – avec le contreventement – sert à bloquer la structure aux appuis dans sa forme finale en l'empêchant de revenir à l'horizontale, la maintenant ainsi en flexion.

Les lattes de bois arrivant avec des angles, en plan ainsi que hors plan, différents, il est recommandé d'assurer la liberté en rotation de l'organe de liaison sur trois axes.

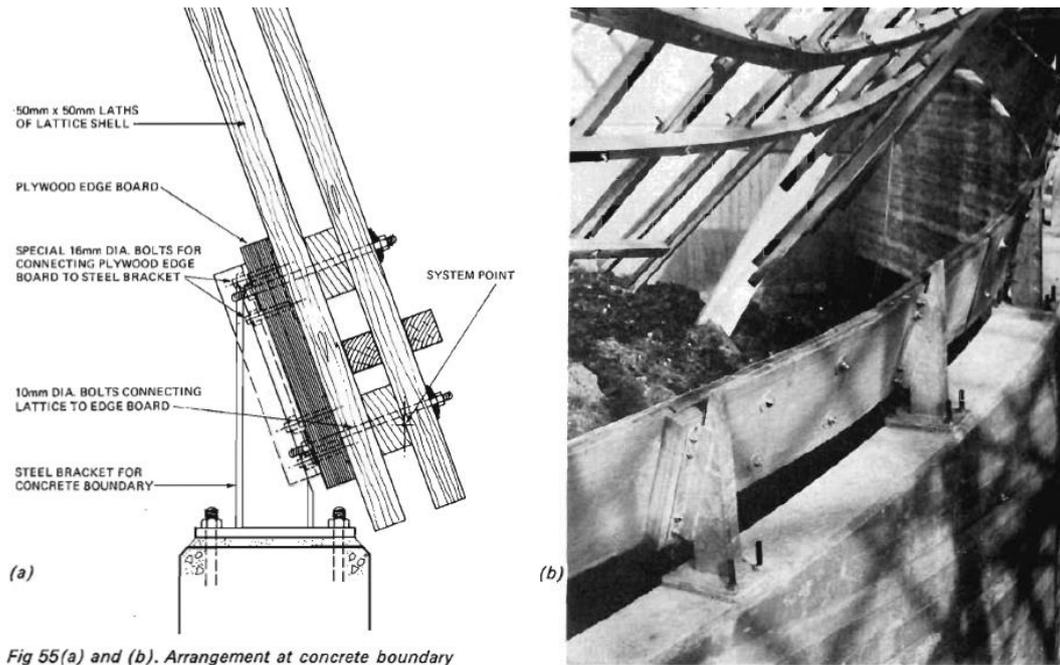


Figure 166 – Détail de l'ancrage au sol de la Multihalle de Mannheim [24].

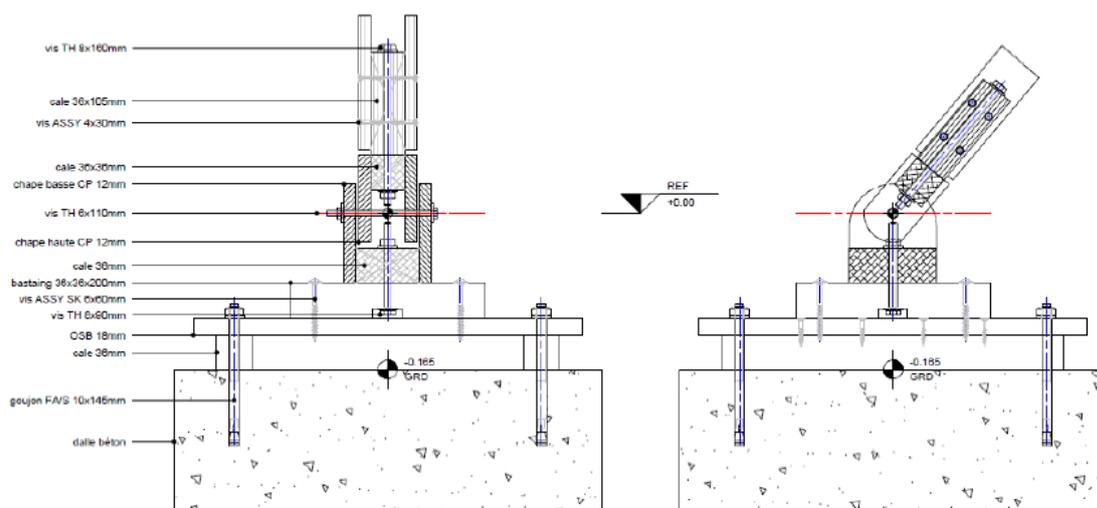
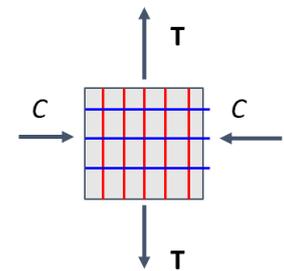
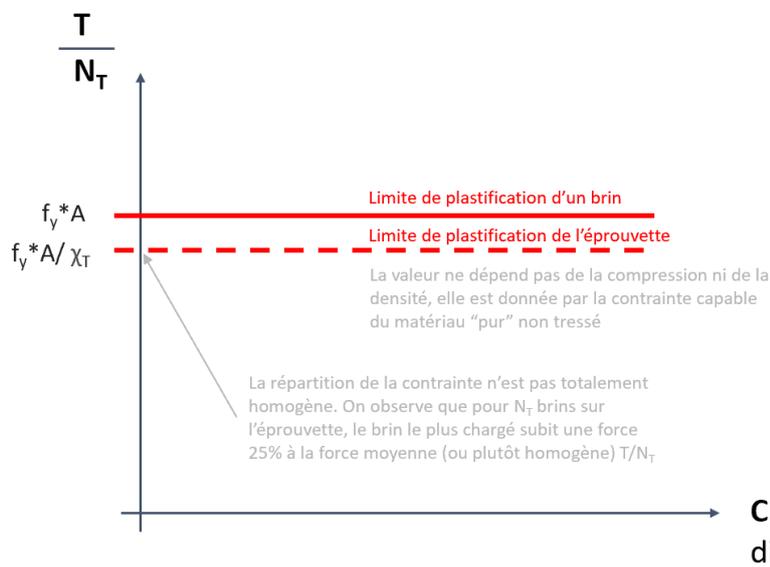
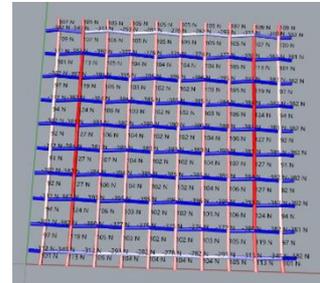


Figure 167 – Détail de principe de l'ancrage au sol du gridshell de Building Freeform 2016 à l'ENPC [www.thinkshell.fr].

Annexe 2 – Élaboration des principes du tressage optimal des coques structurales

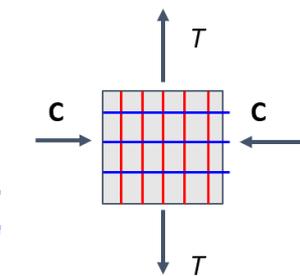
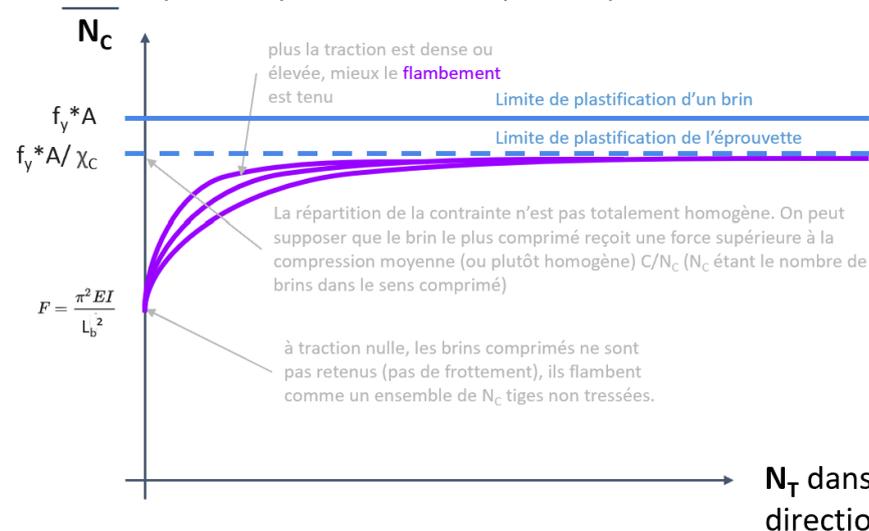
Comportement de l'éprouvette tressée

Nous partons du principe qu'une éprouvette tressée subissant une traction dans un sens et une compression dans l'autre se comporte différemment d'un ensemble de brins dissociés (qui se comporteraient alors tous de la même façon).



A = aire des brins (mm^2)
 N_T = densité sur T (u)
 N_C = densité sur C (u)
 f_y = limite élastique (N/mm^2)

C à laquelle l'éprouvette voile (flambe)



A = aire des brins (mm^2)
 N_T = densité sur T (u)
 N_C = densité sur C (u)
 f_y = limite élastique (N/mm^2)

Figure 168 – Modélisation du comportement mécanique des brins d'une éprouvette en comparaison avec des brins libres.

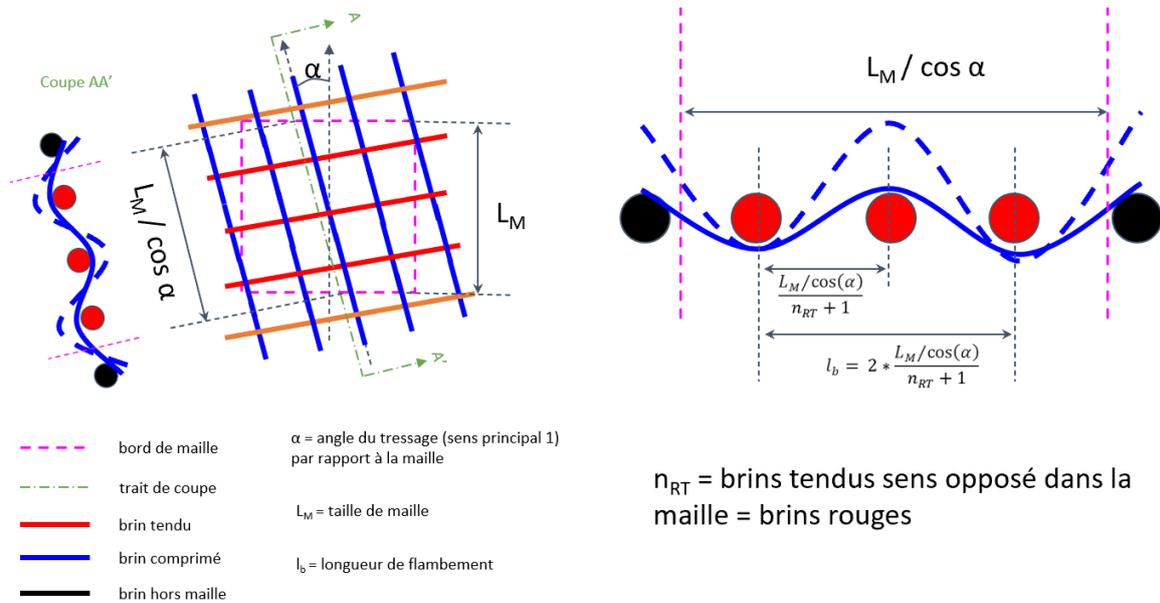


Figure 169 – Flambement des brins dans un tressage.

En première approche, on observe sur les éprouvettes numériques que :

- $\chi_T \approx 1,25$
- $\chi_C < 1,00$

Cela signifie que le brin le plus tendu est 25% plus tendu que si la répartition de la force de traction était homogène dans l'éprouvette tressée. Plus surprenant, le deuxième résultat signifie qu'une partie de la compression n'est pas retrouvée dans les réactions aux appuis des brins du sens comprimé.

Ce résultat, observé récemment, est en cours d'études pour le caractériser précisément. L'hypothèse que nous poursuivons aujourd'hui, et qui est propre aux tressages, est que la déformation (légère pour qui observe à l'œil nu) des brins rend la maille légèrement non orthogonale et qu'une partie de la compression est transmise dans le sens tendu (aggravant ainsi la traction des brins tendus).

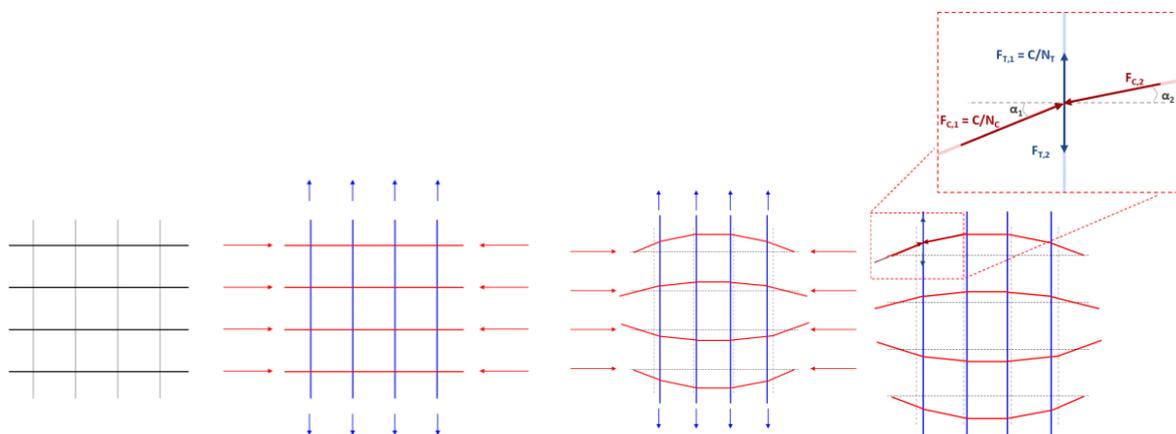


Figure 170 – Schéma exagéré de la déformée du tressage.

Principe Fondamental de la Statique sur les forces en Y :

$$F_{T,1} - F_{T,2} + F_{C,1} * \sin(\alpha_1) - F_{C,2} * \sin(\alpha_2) = 0$$

Principe Fondamental de la Statique sur les forces en X :

$$F_{C,1} * \cos(\alpha_1) - F_{C,2} * \cos(\alpha_2) = 0$$

$$F_{C,2} = F_{C,1} * \frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2)}$$

$\frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2)}$ est toujours compris entre 0 et 1 lorsque $15^\circ \geq \alpha_1 \geq \alpha_2$

donc $F_{C,2} \leq F_{C,1}$

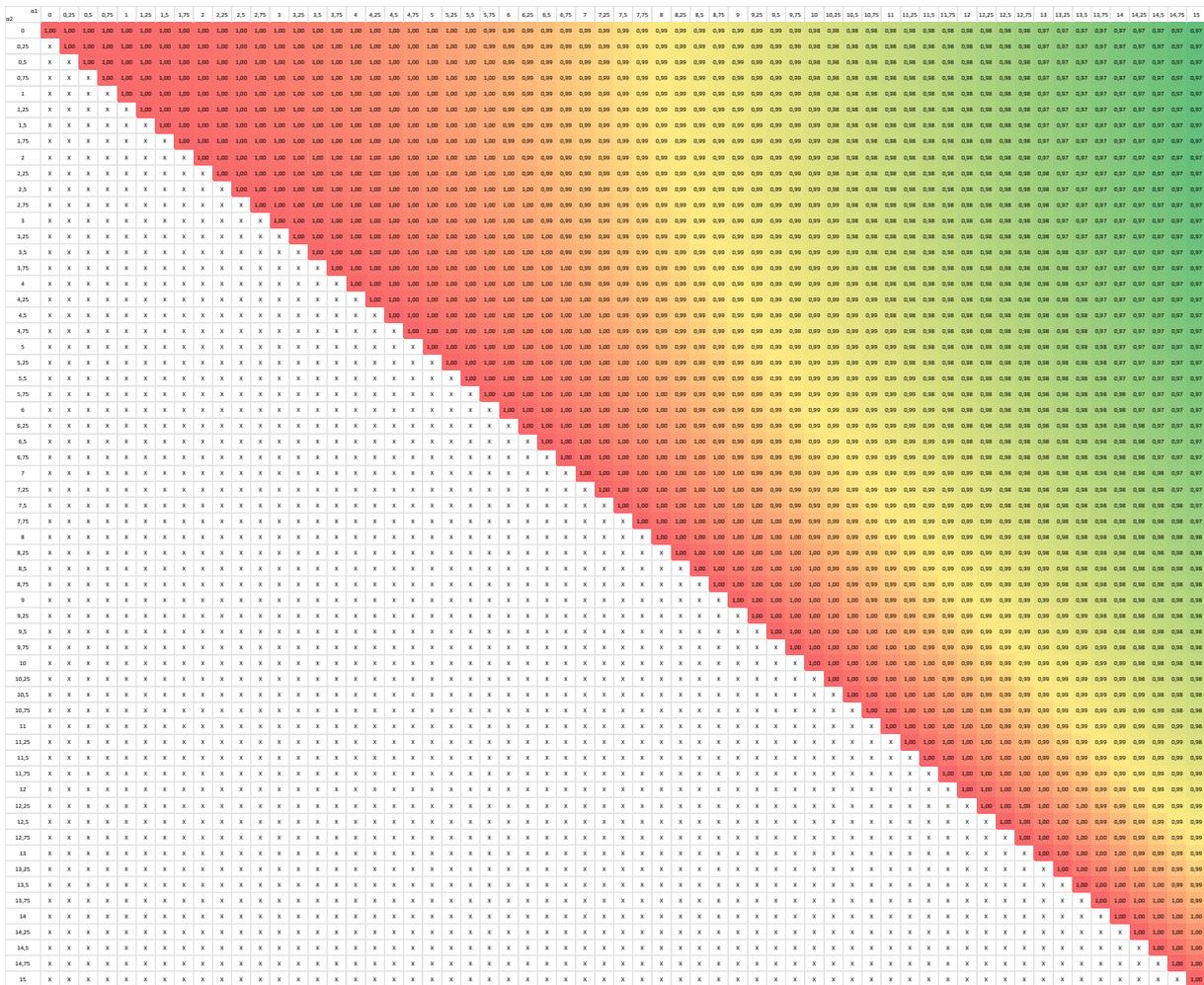


Figure 171 – $\frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2)}$ en fonction de α_2 (en abscisse) et de 1 (en ordonnées) – couleurs du vert (0,97) au rouge (1,00)

On obtient donc :

$$F_{T,2} = F_{T,1} - F_{C,1} * \sin(\alpha_1) + F_{C,2} * \sin(\alpha_2)$$

$$F_{T,2} = F_{T,1} - F_{C,1} * \sin(\alpha_1) + F_{C,1} * \frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2)} * \sin(\alpha_2)$$

$$F_{T,2} = F_{T,1} + F_{C,1} * \left(\frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2)} * \sin(\alpha_2) - \sin(\alpha_1) \right)$$

$\left(\frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2)} * \sin(\alpha_2) - \sin(\alpha_1) \right)$ est toujours négatif lorsque $15^\circ \geq \alpha_1 \geq \alpha_2$

donc $F_{T,2} > F_{T,1}$

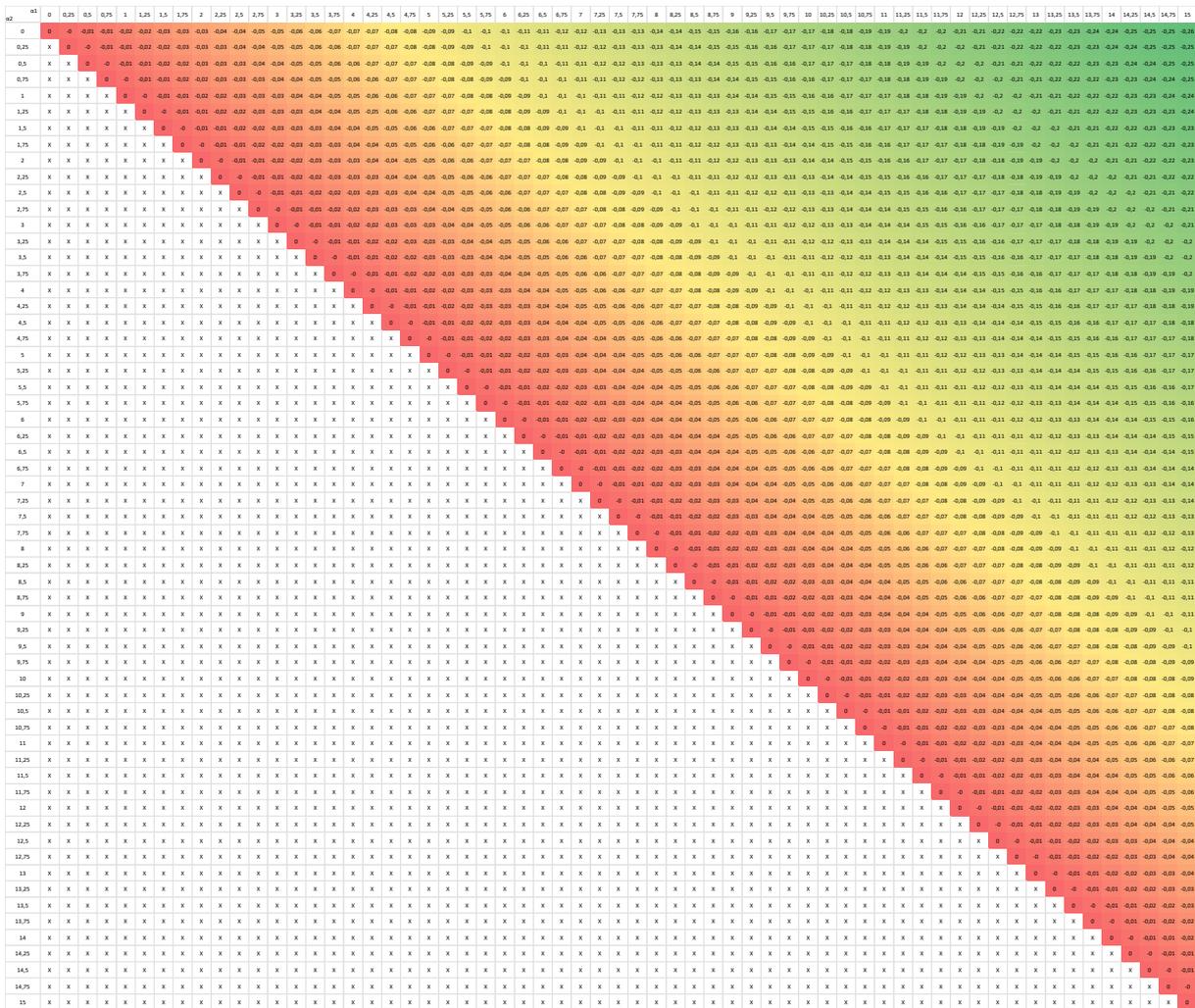


Figure 172 – $\left(\frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2)} * \sin(\alpha_2) - \sin(\alpha_1) \right)$ en fonction de α_2 (en abscisse) et de 1 (en ordonnées) – Couleurs du vert (-0,26) au rouge (0,00)

Cette hypothèse est proposée aujourd’hui sur la base d’observations récentes. Elle doit être confirmée dans les années à venir par de nouvelles études.

Du souple vers le raide : évolutivité entre les phases de construction et de service des structures de couverture et de franchissement en fibres végétales et en bois.

Conception et fabrication issues de la confrontation de résultats expérimentaux sur modèles réduits aux modèles numériques par relaxation dynamique.

Résumé

Un gridshell élastique est une typologie constructive efficace : une grille souple est construite à plat, mise en forme par flambement, et enfin raidie. Leur conception implique une recherche de forme menée grâce à un modèle physique ou un modèle numérique calculé en grandes déformations. Dans quelle mesure les résultats de ces modèles traduisent-ils le comportement réel de l'ouvrage ?

L'utilisation de fibres naturelles comme l'osier pour fabriquer des objets est écologiquement intéressante. En architecture, les tressages sont généralement limités à des éléments de remplissage. Est-il possible de concevoir et de construire des coques structurelles tressées en osier à des fins architecturales ?

Pour répondre à ces deux problématiques, des algorithmes de relaxation dynamique ont été développés et appliqués à des modèles numériques de coques. Les résultats sont comparés à ceux obtenus par essais de chargement de modèles réduits, menant à des analyses et conclusions utiles aux concepteurs.

Mots-clés : *gridshell élastique, bois, osier, fibres naturelles, coques, tressage, relaxation dynamique, modélisation numérique, modèles réduits, recherche de forme, optimisation.*

Résumé en anglais

An elastic gridshell is an efficient constructive typology: a flat elastic grid is built before buckling it into shape. Then, the structure is stiffened. Its design and structural analysis involve a stage of form finding that can be done with a physical model or with a numerical model calculated in large deflections. The question is: are the predictions of these models valid when extrapolated to the real-scale project?

The use of natural fibres, such as wicker, to make objects is ecologically virtuous. In the field of architecture, braiding are generally limited to non-structural filling elements. Is it feasible to design and build structural wicker braided shells for architectural purpose?

To provide an answer to both problematics, dynamic relaxation algorithms has been done and applied to numerical models of shells. Results are compared with loading tests on physical models at different scales. The analysis of this comparison provides useful conclusions to the designers.

Keywords: *elastic gridshell, timber, wicker, shells, braiding, dynamic relaxation, numerical modelling, physical modelling, form finding, optimization.*