L'architecture cinétique déformable. Une structure en mouvement. Recherche par l'expérimentation

Colomban de Mascarel

▶ **To cite this version:**

Colomban de Mascarel. L'architecture cinétique déformable. Une structure en mouvement. Recherche par l'expérimentation. Architecture, aménagement de l'espace. 2017. dumas-01568301

HAL Id: dumas-01568301

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01568301

Submitted on 25 Jul 2017

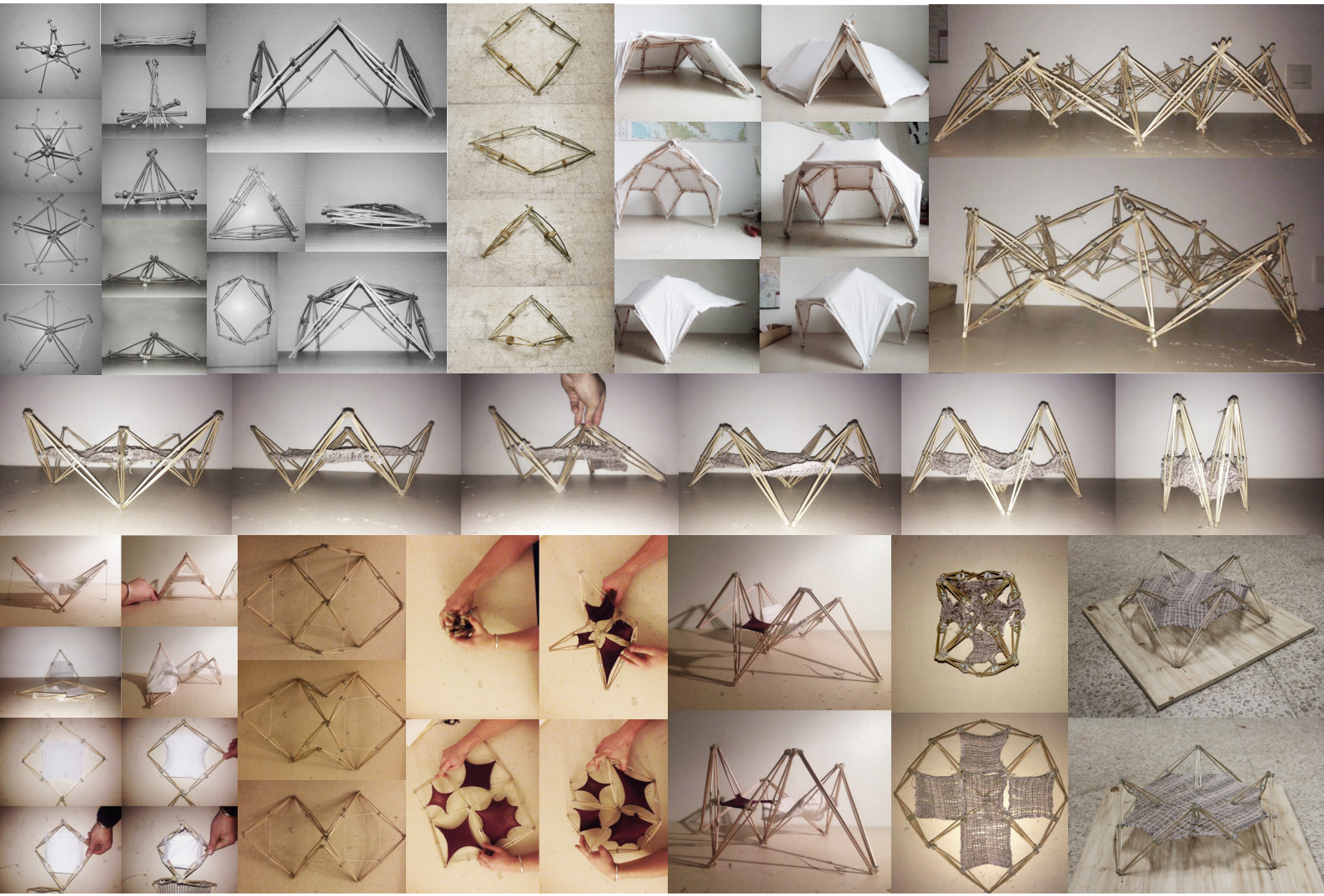
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

L'ARCHITECTURE CINÉTIQUE DÉFORMABLE

UNE STRUCTURE EN MOUVEMENT

RECHERCHE PAR L'EXPÉRIMENTATION



Professeurs: Gille Ebersolt, Stéphane Berthier

Mémoire: Colomban de Mascarel

EXPÉRIMENTATION DE STRUCTURES CINÉTIQUE DÉFORMABLES

Comment faire varier la forme et la fonction d'une architecture, en expérimentant l'association de différents principes constructifs ?

Des yourtes mongoles, au vélum du Colisée romain le principe d'objet transformable a été appliqué à l'architecture tout au long de l'histoire. Actuellement, les domaines d'application principaux sont l'industrie aérospatiale, nécessitant une architecture légère et compacte ou encore les abris temporaires et mobiles.

Bien que de nombreuses applications aient été proposées, en raison de leurs complexités mécaniques, peu ont été construites à grande échelle. Le but est de développer de nouvelles possibilités de structure déployable facile à mettre en œuvre, inspirées de concepts existants.

Le point de départ à été de mettre en application dans l'architecture des assemblages de structure hypostatique mobile, et d'utiliser l'instabilité du système constructif pour en faire varier sa taille et sa forme de manière tridimensionnelle.

Le point essentiel à été d'intégrer un système secondaire de contraintes internes ou externes, permettant de maintenir la stabilité de la structure et d'en contrôler son mouvement.

Ce mémoire présente donc la manipulation de structures légère, flexible, articulé, déformable, déployable, pliable, par une approche expérimentale.

SOMMAIRE

INTRODUCTION 4

1 DÉFINITION ET RÉFÉRENCE SUR LE SUJET 6

1.1 Le Bambou, Véritable matière à projet 8

1.2 Architecture déformable, définitions 10

1.3 Références et Inspirations 14

2 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL, LA RÉFLEXION PAR LA MAQUETTE 24

2.1 Suivi de dix Expérimentations 26

2.2 Prototype final, la conclusion des différentes réflexions 36

3 EXPÉRIMENTATION A L ÉCHELLE 1 40

3.1 De la maquette à l'échelle 1, mise en place du projet 42

3.2 Suivi de chantier 44

3.3 Réalisation finale, photos

CONCLUSION 50

INTRODUCTION

Dès le départ l'objectif de ce mémoire était d'expérimenter un système constructif et de le mettre en application sur un prototype à l'échelle 1.

Mon voyage en Asie du Sud Est et au Népal m'a amené à m'intéresser à l'architecture en bambou, et particulièrement au rôle que peut jouer un tel matériau dans les constructions parasismiques et l'architecture d'urgence.

C'est à travers ces axes que j'ai démarré mes recherches, pour finalement, axer entièrement mon travail sur l'expérimentation d'un système structurel flexible, déformable, déployable.

- Dans un premier temps, il s'agira de comprendre et définir les notions d'architecture déployable, puis de présenter quelques réalisations de tout genre qui ont guidé et orienté mon travail.

- Une seconde partie permettra ensuite d'étudier ces systèmes en maquette, afin de guider mes recherches par l'expérimentation et faire émerger une réponse structurelle d'architecture en mouvement.

- La dernière partie abordera un travail sur les détails et les choix structurels adéquates à la réalisation du prototype, ainsi que le suivi de la construction échelle une.

Ce travail de recherche permettra d'obtenir une base de données sur les possibilités et les avantages que propose un système d'architecture déformable.

1 DEFINITION ET REFERENCE SUR LE SUJET

1.1 Le Bambou, Véritable matière à projet

1.2 Architecture déformable, définitions

1.3 Références et Inspirations

Les recherches sur le parasismique et l'architecture d'urgence, m'ont amené à m'intéresser aux structures légères, rigides, flexibles, stables.
Le bambou semble parfaitement adapté à ces problématiques, mais pour maîtriser la stabilité d'une structure, il faut en comprendre sa mobilité. Il est donc nécéssaire de bien cibler les notions dondées sur les mouvements mécaniques dans l'architecture.

1.1 Le Bambou, Véritable matière à projet

Le Bambou est un matériau inexploité en Europe alors que de nombreuses bambouseraies de taille importante démontrent la capacité d'adaptation de certaines espèces à notre climat. C'est donc pour cela que je souhaite manipuler cette matière en particulier, afin de mieux comprendre ses caractéristiques constructives et de favoriser l'émergence de nouvelle architectures à faible impact écologique.

QUALITÉ ENVIRONNEMENTAL

Le bambou est une herbe géante avec la croissance la plus rapide du monde végétal. C'est donc une ressource renouvelable rapidement et à l'infini. En comparaison à une forêt classique, son rendement au mètre carré est 20 fois supérieur et son feuillage persistant lui permet de filtrer jusqu'à 150 fois plus de CO2/hectare/an. Les bambouseraies adultes sont particulièrement à l'aise en milieu humide, elles gèrent elle-même leurs hydrométries et consomment donc très peu d'eau. Pour finir le bambou est une espèce qui favorise la dépollution des sols par phyto-épuration tout en limitant leurs érosions.

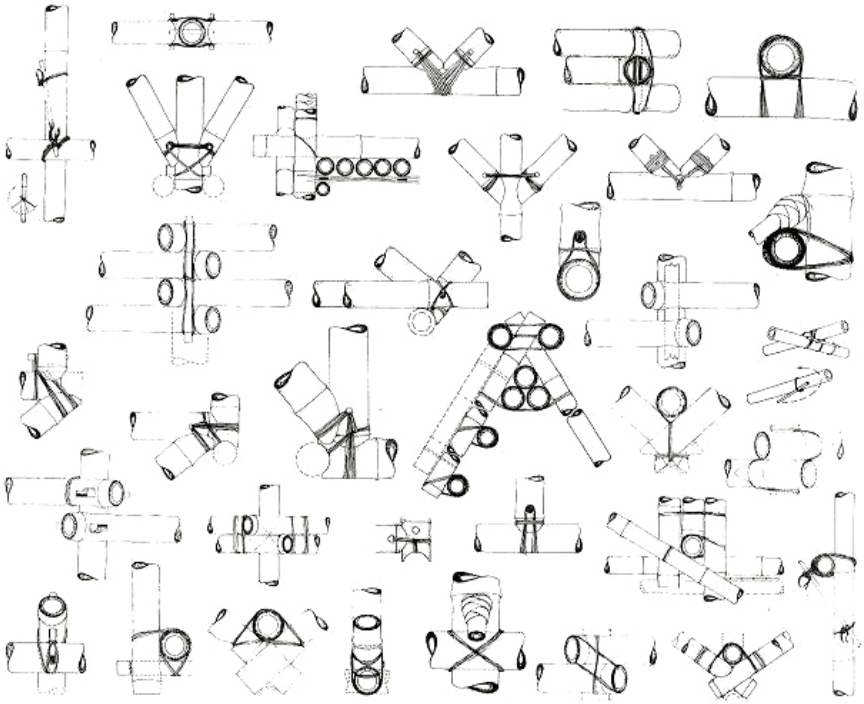
QUALITÉ MÉCANIQUE

Ses qualités mécaniques en font un matériau parfaitement adapté à la construction. Sa résistance par unité de masse est plus élevée que les essences de bois classique et sa capacité d'absorber les énergies par sa souplesse en font un matériau idéal pour la construction parasismique. *Beraldo,1994*

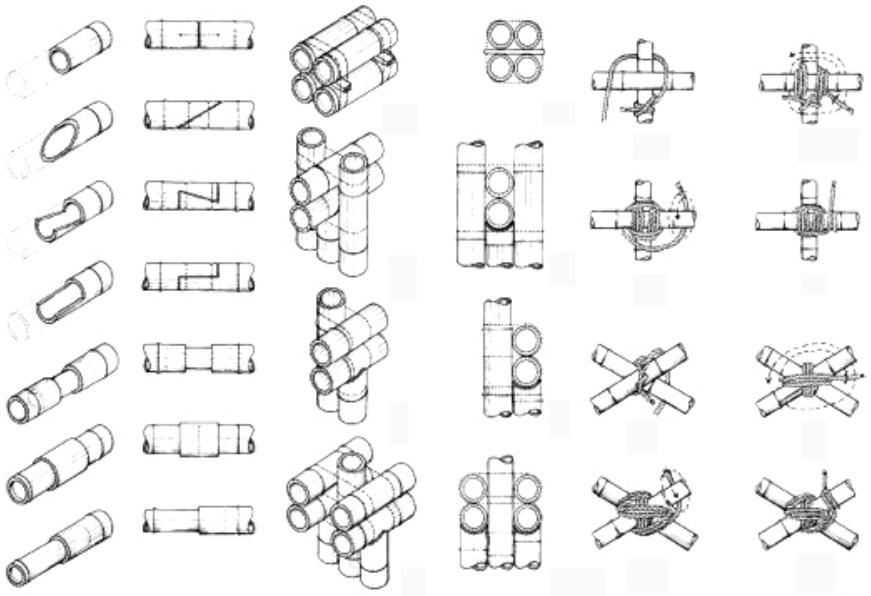
Sa grande souplesse d'utilisation, son faible poids et sa rapidité de mise en œuvre, permettent de créer facilement des formes et des volumes variés. Le bambou semble donc parfaitement adapté à l'expérimentation d'architecture déformable.

C'est donc les caractéristiques écologiques et l'impact que le bambou joue dans un écosystème durable qui me pousse à m'intéresser au rôle qu'il peut jouer dans l'architecture, car si sa culture et son développement ne génèrent aucune pollution, sa transformation artisanale n'induit qu'un impact écologique très faible.

L'objectif de ce mémoire n'est pas de rentrer dans le détail sur ce sujet, mais d'aborder un questionnement parallèle sur l'utilisation du bambou et les techniques structurelles et constructives liées à ce matériau.



Connexions du Pavillon ZERI, Simón Vélez (2000)



Manuel de la construction en bambou, Oscar Hildalgo López

1.2 Architecture déformable, définition

Un solide n'est jamais parfaitement rigide, il est soumis à des forces internes et externes qui le déforment. Ces forces interagissent sous l'effet de contraintes de traction, compression, flexion, cisaillement ou encore torsion.

Le schéma statique d'une structure permet de définir sa stabilité dans son ensemble, en modélisant les actions internes, les appuis au sol, les éléments structuraux qui la constituent, ainsi que leurs épaisseurs et dimensions.

STABILITÉ / MOBILITÉ

Pour faire varier la forme d'une architecture, il faut pouvoir jongler entre différents états de stabilité qui sont présentés ci dessous.

L'état hyperstatique est la situation d'un assemblage fait avec plus de contraintes qu'il est nécessaire pour le maintenir, ce qui signifie qu'au moins un degré de mobilité d'une pièce peut être supprimé.

Dans un état isostatique, le fonctionnement se fait sans contrainte excessive. La dynamique de l'assemblage est donc parfaitement réglée et pensée pour que chaque élément de la structure soit indispensable à sa stabilité.

Pour finir, l'état Hypostatique apparaît quand l'assemblage possède trop de mobilité. D'un point de vue mécanique, une pièce conserve au moins une possibilité de mobilité. La structure n'est donc pas stable mais c'est précisement cette instabilité qu'il serait intéressant de maîtriser pour guider la déformation d'une architecture.

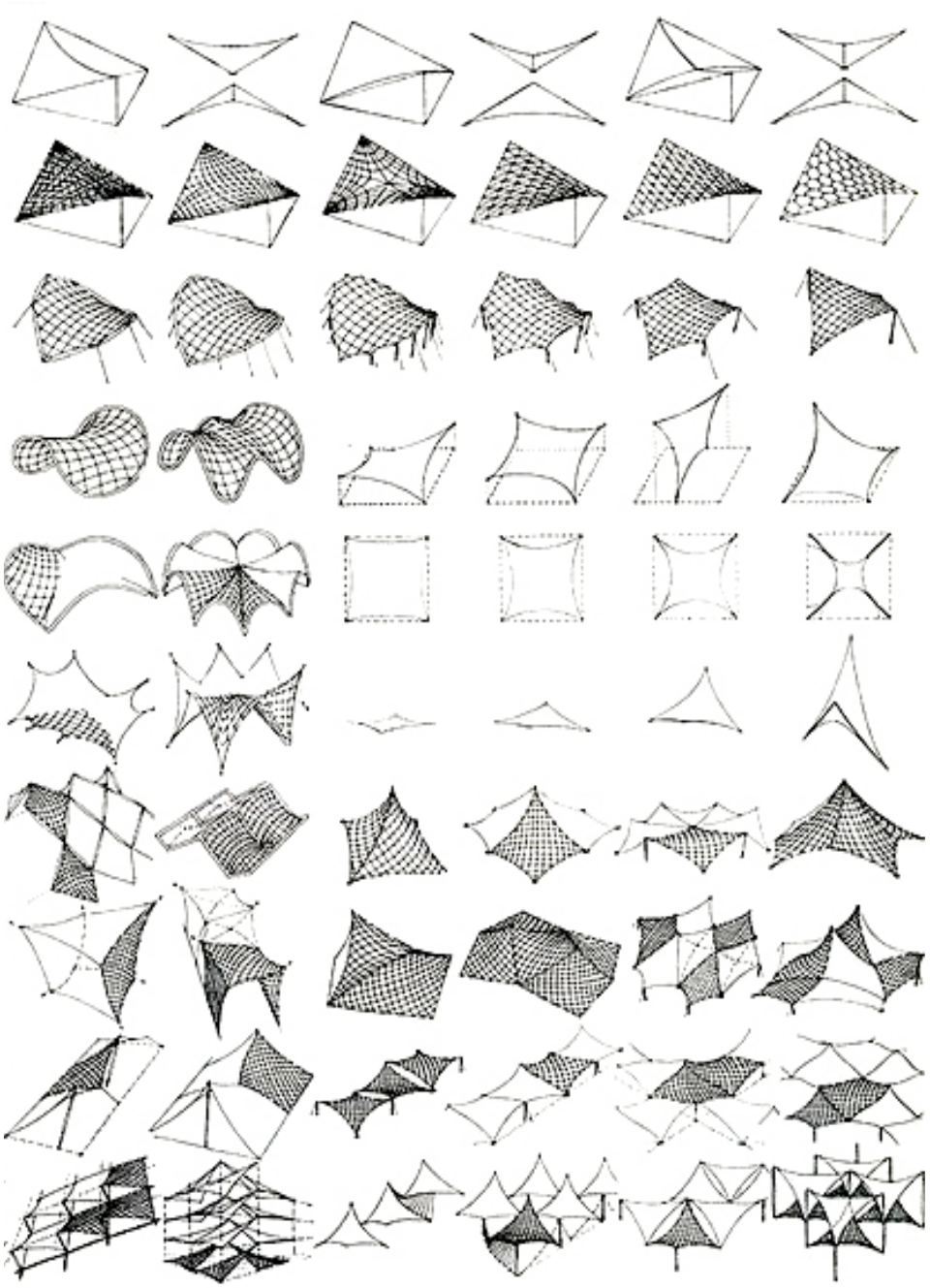
STRUCTURE DÉFORMABLE

On peut donc obtenir des architectures déformables par la flexibilité de la matière utilisée, par la déformation de la composition structurelle, ou encore par le choix des nœuds de liaison.

Le point essentiel est le passage de l'état hypostatique instable à une position isostatique stable. L'enjeu de l'architecture déformable est d'arriver à contraindre la structure et stabiliser plus ou moins sa position en fonction de la forme recherchée.

Une structure peut être globalement isostatique mais posséder des mécanismes locaux, qui la rend déformable.

Cette contrainte peut se faire par un système de mise en tension par câble, toile, maillage, etc, ce qui permet un contreventement en traction. Pour un contreventement en compression il faut intégrer des éléments rigides.



Frei Otto, Casabella, 301 1966

STRUCTURE DÉPLOYABLE

Une architecture déployable est une structure , qui de par sa configuration structurelle, a la capacité de se transformer. Elle passe d'une configuration fermée, rangée à un état ouvert déployé. Ces structures sont appelées aussi étirables, extensibles, développables.

Dans toutes les applications, l'enveloppe et la structure doivent pouvoir être déplacées, réutilisables et facilement transportables, ce qui exige un système de construction simple et rapide à assembler sur un site non préparé.

Cependant, le système d'articulation est associé à une complexité mécanique et un coût de conception plus élevés par rapport aux systèmes classiques. Cette augmentation du coût doit être compensée par le potentiel de la structure à s'adapter au différentes situations en proposant différentes fonctions.

Malgré le caractère mobile de ces structures, elles sont stables, solides et durables, et dans de certains cas, peuvent avoir un emplacement permanent, où son état déployé est maintenu.

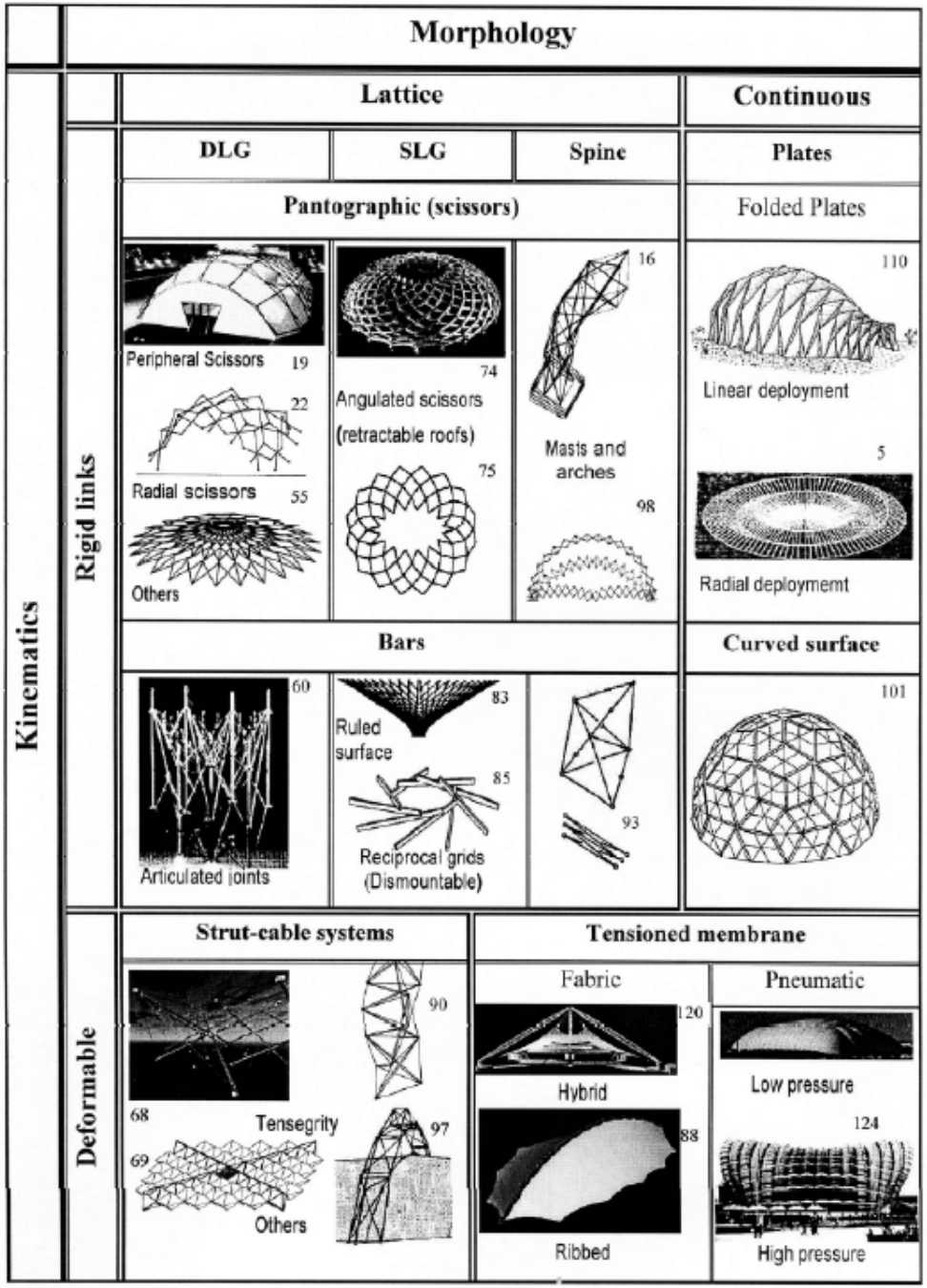
CLASSIFICATION

Quatre groupes principaux de structures déployables se distinguent, classées selon leur système et composants structurel: Les structures de barres articulées, de plaques pliables, d'éléments en tenségrité et de membranes.

Les différentes caractéristiques morphologiques et cinétiques permettent d'aboutir à des réponses architecturales variées, adaptées aux besoins. Par l'application d'une force sur un ou plusieurs points, l'architecture se transforme de manière fluide et contrôlée.

Deux sous-catégories sont particulièrement appliquées à l'architecture:
- Les structures à ciseaux qui sont des structures extensibles constituées de barres reliées entre elles par des charnières, permettant de les replier dans un faisceau compact,
- Les structures de plaques pliables, qui sont constituées d'éléments de plaques rigides, reliées par des joints continus permettant un degré de liberté de rotation.

Les notions développées précédemment, montrent qu'il existe de nombreuses techniques de travaille sur le mouvement dans l'architecture. Chaque système constructif propose des possibilités de déformation plus ou moins grande, répondant ainsi à des fonctions et programmes variés.

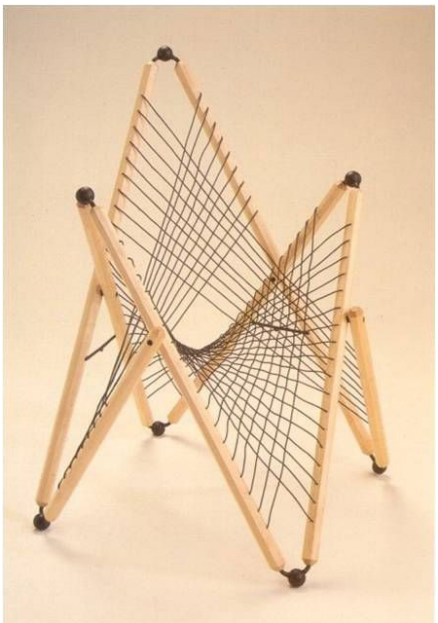


Classification de système structurelle déployable par leurs caractéristiques morphologiques et cinétiques, Hanaor, 2001

1.3 Références et Inspirations

Les références qui suivent présentent différentes réponses originales d'architecture déformable. Certains de ces projets s'inscrivent dans une vraie réflexion expérimentale basée sur la manipulation d'architecture cinétique.

Entre performances artistiques, structures de recouvrement ou encore abris d'urgence, ces dispositifs utilisent des systèmes constructifs variés pour répondre au mieux à la fonction recherchée.



MOBILIER DÉFORMABLE
Berin Nelson, Hyperbolic Parabolid inspired chair

Ce mobilier met en pratique la juxtaposition de systèmes géométriques différents pour former un système constructif stable. Les barres rigides induisent des surfaces planes tandis que le câblage fait apparaître des surfaces paraboliques.

Berin Nelson développe ainsi une structure extensible à ciseaux, où les barres sont reliées entre elles par des charnières non pas articulées mais flexibles. Le maillage de corde se met en tension sous le poids de l'utilisateur et permet de stabiliser la structure en état ouvert.

STRUCTURE VIVANTE
Théo Jensen, «Animaris umerus»

Theo Jansen est un artiste, ingénieur, inventeur, sculpteur néerlandais du courant de l'art cinétique. C'est à travers le biomimétisme que ses structures, qu'il appelle Créature, s'inspirent de la nature et notamment des mouvements anatomiques.

Cette structure articulée mobile, se déplace grâce à la voile sur le dessus qui capte le vent et ondule, l'énergie ainsi captée est stockée sous forme de pression dans les bouteilles qui la restitue aux pattes et permet à l'ensemble de bouger.

Cet exemple met en avant la possibilité de concevoir des structures qui interagissent avec leur environnement. Ici c'est toute une construction articulée qui se met en mouvement et se déplace par un simple transfert d'énergie.

https://www.youtube.com/watch?v=HSKyHmjyrkA

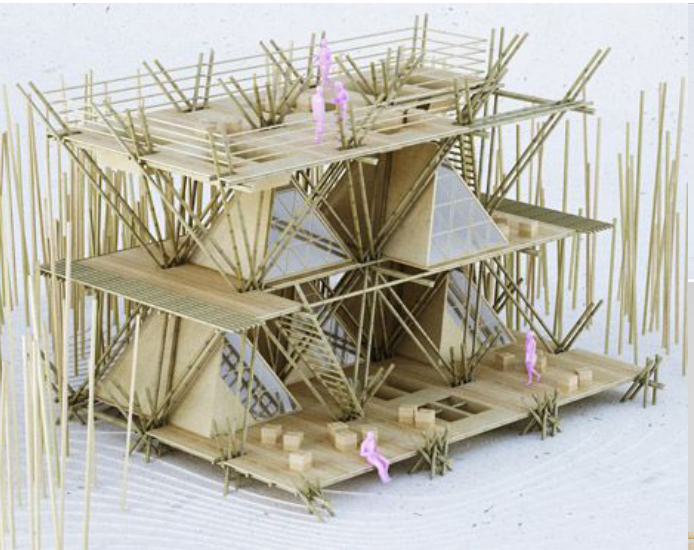
ASSEMBLAGE PAR ENTRELACEMENT
Penda's Fastener-Free, «One With the Birds»

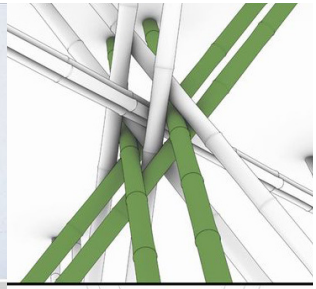
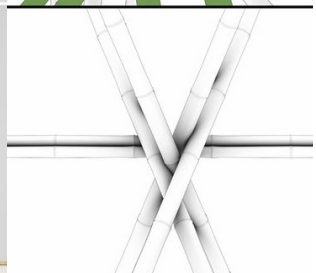
Penda, une firme d'architecture basée à Pékin, a imaginé une réponse à l'habitat d'urgence inspiré des systèmes d'échafaudage et d' assemblage de tipis amérindiens.

C'est ainsi que ce projet «One With the Birds» utilise un matériau local et noble, le bambou et avec de la corde, le lie dans un modèle de matrice triangulée. L'absence de fixations pénétrantes signifie que les pôles peuvent être réutilisés indéfiniment, ce qui facilite aussi le montage et démontage du projet.

Ce système de plug triangulé laisse envisager la construction de ces structures hôtels sur plusieurs étages.

http://www.core77.com/posts/27327/Pendas-Fastener-Free-Re-usable-Bamboo-Structural-System



CHAPITEAU AUTOPORTE EN BAMBOU

François Puech

Ce chapiteau à mâture bambou est le premier chapiteau 100% autoporté, nécessitant donc aucun ancrage au sol.

Les 8 bambous, qui constituent un poteau, sont contraints par flexion en leur centre ce qui donne à l'ensemble une très grande rigidité.

Conçu comme une sculpture monumentale de 15 x 30 mètres pour une hauteur de 10 mètres, l'armature extérieure est réalisée en bambou issu de bambouseraies françaises.

http://www.bambouconcept.com/

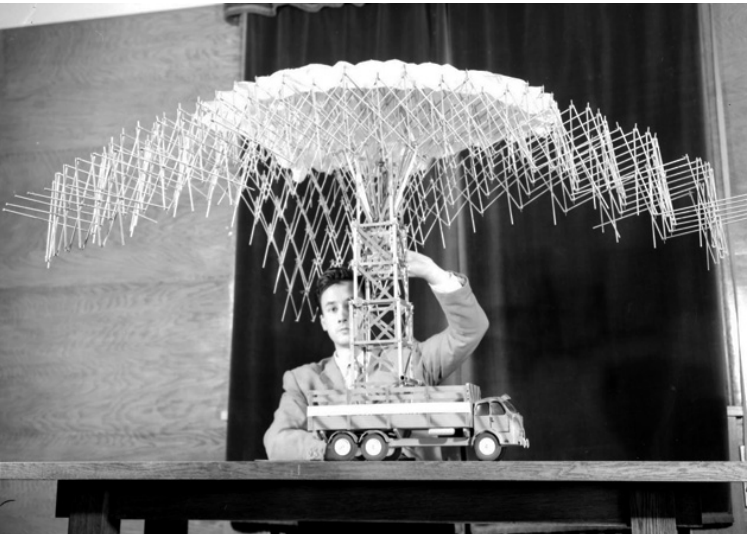
GRILLE TRIDIMENSIONNELLE DÉPLOYABLE
Emilio Pérez Pinero, 1960

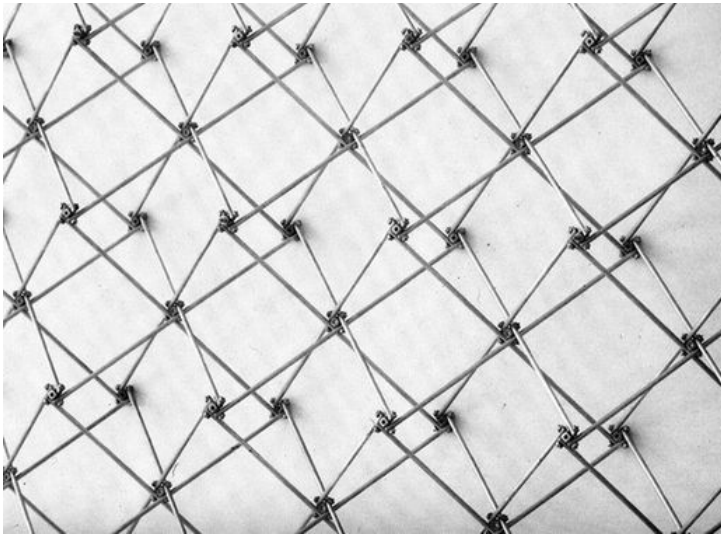
L'architecte espagnol Emilio Perez Piñero a étudié un mécanisme à ciseaux pour un théâtre mobile. Il a été parmi les premiers à utiliser le principe du pantographe pour les structures architecturales déployables.

Ce modèle particulier consiste en des barres rigides et des câbles métalliques, qui deviendraient tendus pour fournir à la structure la stabilisation nécessaire.

Une courbure peut être introduite dans une telle grille en variant l'emplacement de la charnière intermédiaire des unités de ciseaux.

http://www.perezpinero.org/



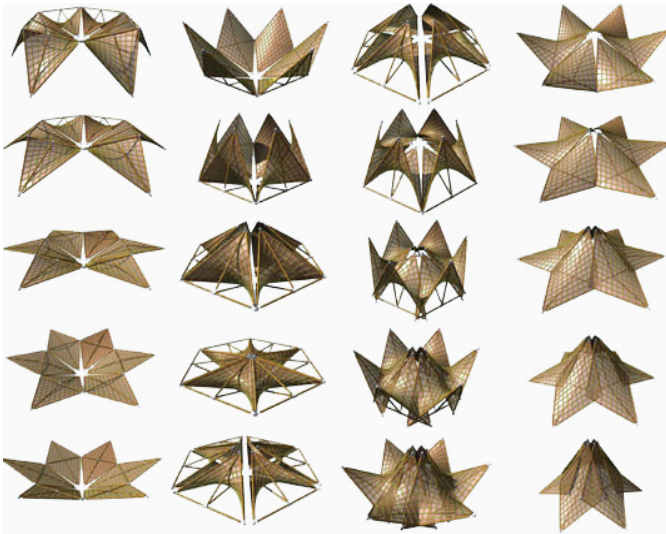


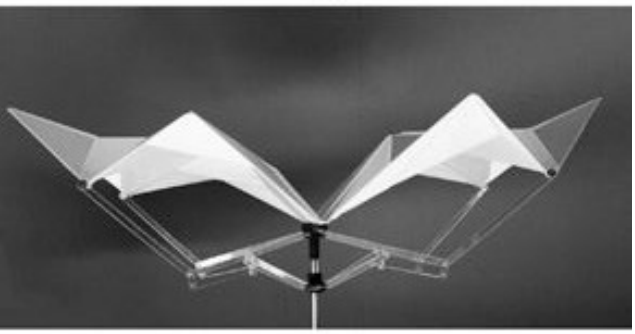
Après le tremblement de terre de 2007 en Chine, Ming Tang a été amené à pensé une réponse d'abri d'urgence déployable, facile à mettre en œuvre et à bas cout. Ces maisons pliables en bambou sont directement inspirées des principes de l'origami.

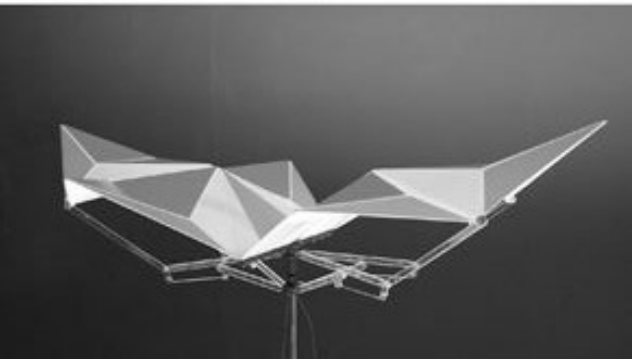
Les différentes possibilités de forme et de fonction dépendent de l'assemblage de plusieurs modules identiques, par fixation articulée ou par entrelacement.

Ce module articulé de manière unidirectionnelle est recouvert d'une grille tressée qui contrevent le système tout en laissant la flexibilité nécessaire.

http://webecoist.momtastic.com/2011/06/20/building-with-bamboo-13-super-sustainable-structures







Ce projet de thèse présente les possibilités de transformation dynamique d'une structure d'un état plat en un objet tridimensionnel.

La géométrie et les méthodes de pliage créés par cette combinaison parfaitement pensée, permettent à la structure par son comportement, de générer une multitude de formes différentes.

Basée sur les principes de l'origami, cette méthode montre la possibilité de construire des structures auto-organisées originales,.
Ce système peut être appliqué pour contrôler la distribution de la lumière d'une toiture, ou plus simplement la surface de recouvrement.

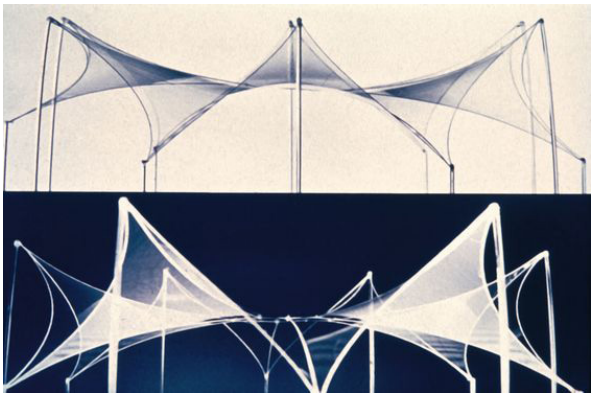
https://maadm.wordpress.com/example-projects/

STRUCTURE SUSPENDU, CONTRAINTE
Frei Otto, Dance Pavillion, Colonia, 1957.

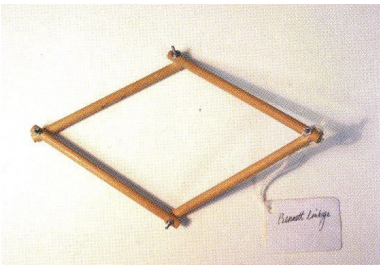
Ce pavillon de danse révèle la perfection de l'art minimal des structures tendus. Frei Otto a toujours cherché à faire coïncider forme et structure. Avec minimum de matière ce système permet une portée de 33 m et une surface couverte de 684 m²

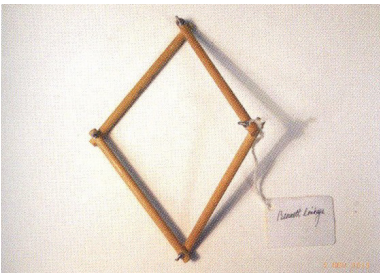
La membrane en fibre mixte coton-polyester est suspendue sur quatres pylônes, puis tendue par un système de câble qui rend la composition isostatique.

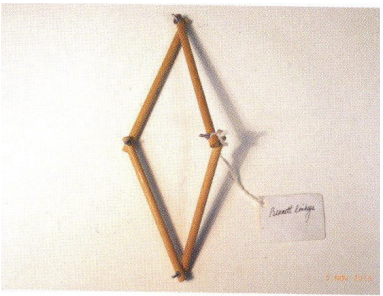
L'application des points de tension suit la courbure du tissu qui est simultanément courbé dans des directions opposées pour créer une construction en forme de selle ou de tente.



BENNETT LINKAGE
Geoffrey Thomas Bennett, 1903







La liaison de Bennett est un mécanisme sur-contraint qui se compose de quatre barres reliées par quatre joints articulés, à une mobilité. C'est un ensemble particulier de contraintes dimensionnelles qui rendent le lien de Bennett mobile.

La déformation dépend de l'orientation de l'axe de rotation de la liaison. Il existe donc une possibilité de déploiement qui varie en fonction des applications.

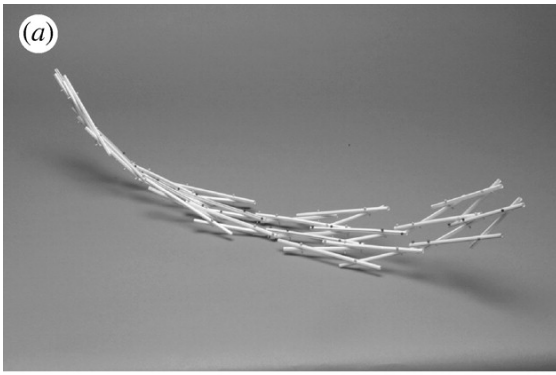
Les maillons sont assemblés de telle sorte que, pour deux maillons reliés entre eux, la perpendiculaire commune aux axes d'articulation du premier maillon croise la perpendiculaire commune des axes d'articulation du second maillon.

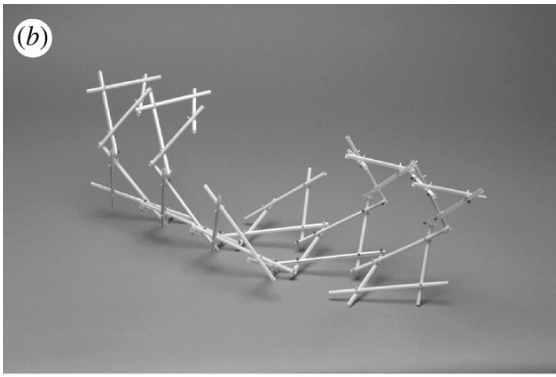
STRUCTURE DEPLOYABLE
Zhong You et Yan Chen

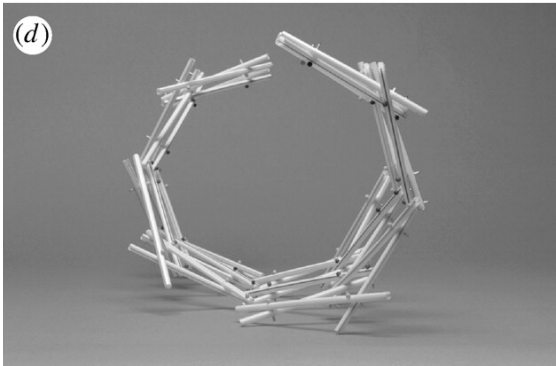
Ces recherches exposent la déformation d'une structure déployable, et mettent en application le principe des liaisons de Bennett.

Les liaisons sont articulées mono-directionnellement ce qui dessine une seule possibilité de déformation de la structure. Elle passe donc d'un état fermé et plat, à un état ouvert et courbé.

Avec leurs flexibilités géométriques, ces types de système peuvent s'appliquer sur les toits rétractables, les antennes spatiales, les dispositifs médicaux pliables et bien d'autres domaines.







Déployable Structures: Forme+Tehnique, Esther Rivas Adrover

2 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL, LA RÉFLEXION PAR LA MAQUETTE

2.1 Suivi de dix Expérimentations
2.2 Prototype final, la conclusion des différentes réflexions

Après avoir bien saisi ces différentes notions, il est essentiel de les mettre en application. L'enchaînement de ces dix expériences présente l'évolution libre d'une recherche par l'expérimention. Chaque manipulation à son importance car elle induit un questionnement qui implique une réponse.

Ainsi les expériences sélectionnées présentent un objectif de départ, une description de la structure mise en place, une analyse des observations et une ouverture qui nous amène à l'expérience suivante.

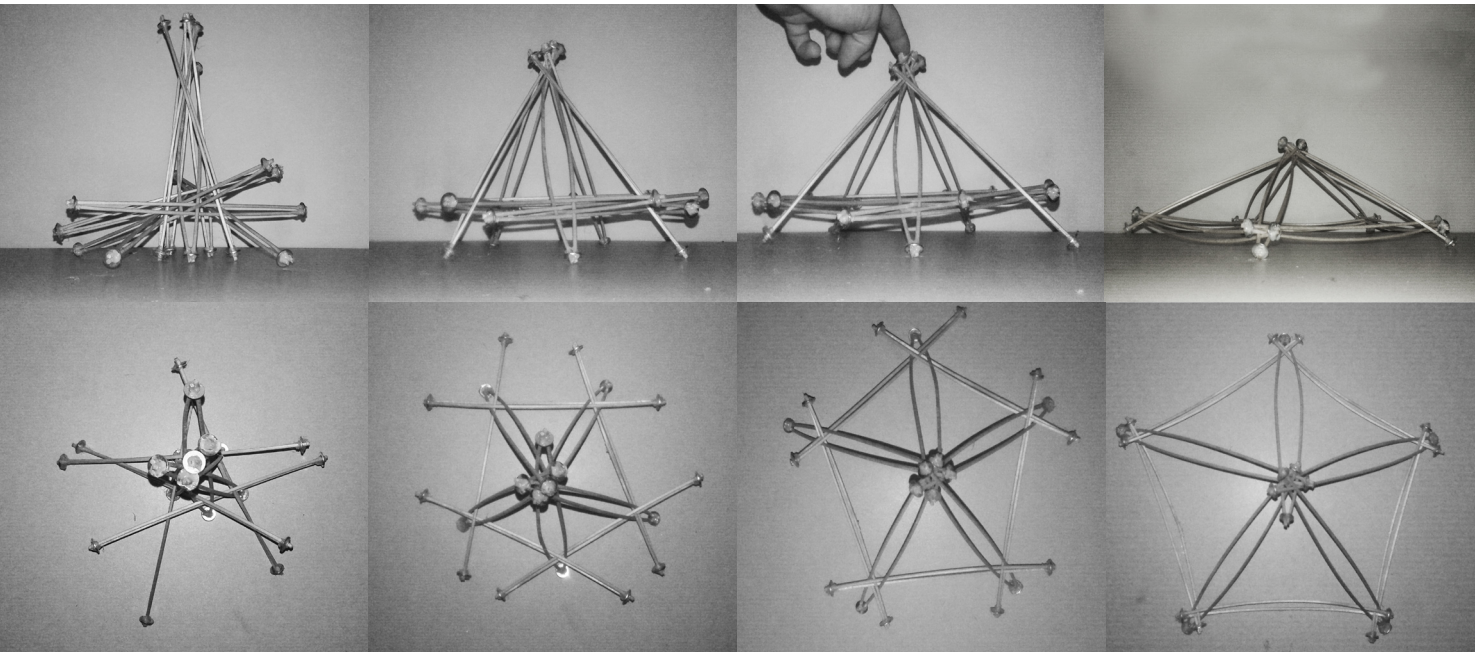
2.1 Suivie de 10 Expérimentations

STRUCTURE PLIABLE PAR ENTRELACEMENT

L'objectif est de tester un premier système de structure déployable en maquette. Cette composition mise en place de manière instinctive est une structure pliable et déployable en chapiteaux à base hexagonale, articulée par l'entrelacement de modules bi-dimensionnels entre eux.

Le système d'entrelacement contraint aléatoirement la déformation et en position totalement ouverte, les forces exercées au niveau du nœud, déforment trop la barre, ce qui pose un problème.

De manière assez logique le module bidimensionnel n'est pas adapté à une structure tridimensionnelle, et l'entrelacement serait trop complexe à mettre en place.



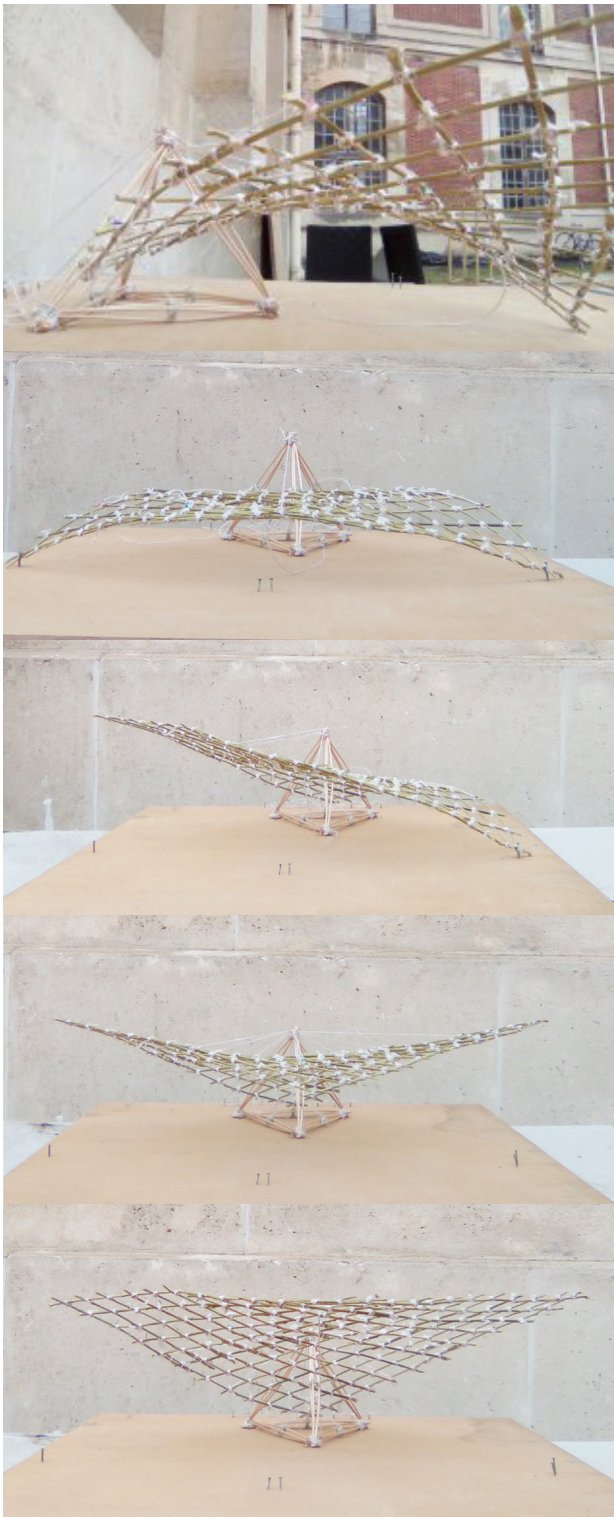
PARENTHÈSE DU GRIEDSHELL
DÉFORMATION PAR LA MATIÈRE

La transformation d'une structure peut se faire par la déformation directe de la matière qui la compose. Le bambou est une espèce qui se prête parfaitement à cet exercice de par sa flexibilité.

Le griedshell est un maillage rectangulaire permettant de couvrir de grande portée grâce à sa double courbure obtenue par déformation d'un grille plane. Les barres sont reliées par des nœuds flexibles qui permettent la déformation de la nappe.

Ici, le maillage est relié en un point et par tenségrité, à un module pyramidal stable et fixe. En appliquant des forces sur des points précis du maillage on peut diriger la déformation de l'objet. Il suffit de faire varier la tension des câbles de suspension en fonction de son emprise sur la grille, ou de contraindre la nappe.

A grandeur nature le bambou est bien moins flexible. Le passage à l'échelle une, induit des efforts bien plus conséquent, notamment pour suspendre la nappe. N'ayant pas de site précis il me semble plus judicieux de continuer sur des structures pliables articulées, et déplaçables



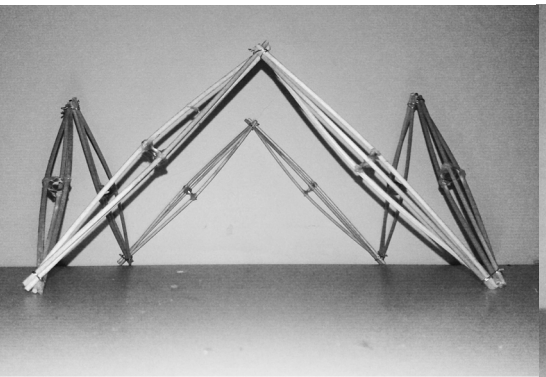
STRUCTURE ARTICULÉE

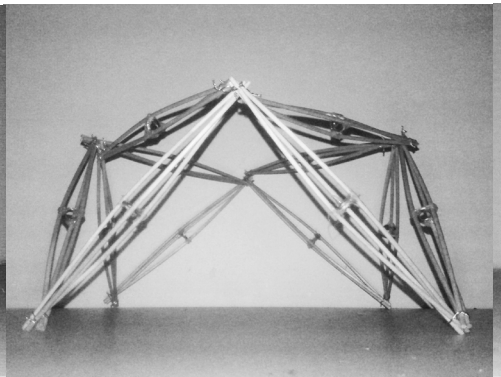
L'objectif est d'expérimenter par des nœuds articulés, des barres rigides constituées de trois tiges contraintes entre elles.

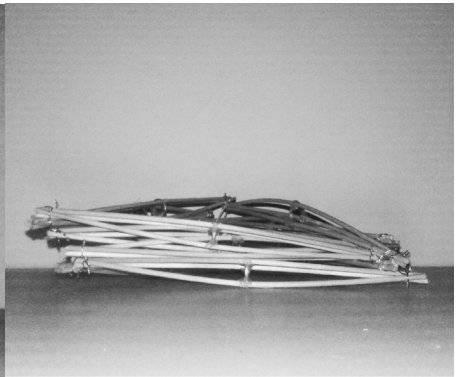
Le triangle isolé est une forme stable, tandis que le carré se déforme et se plie. Mixer ces deux géométries permet de cibler les zones de déformation de la structure.

En liant de différentes manières des barres entre elles, on remarque que la possibilité de composition est infinie et que chaque géométrie (Triangle, carré, octogone, hexagone ...) induit une déformation différente. Lorsqu'ils sont assemblés entre eux, la déformation d'une géométrie transmet des forces sur celles adjacentes et implique la déformation intégrale de la structure.

C'est donc ces différents comportements de déformation que je souhaite analyser dans l'étape suivante sur une trame plane de carrés articulés.







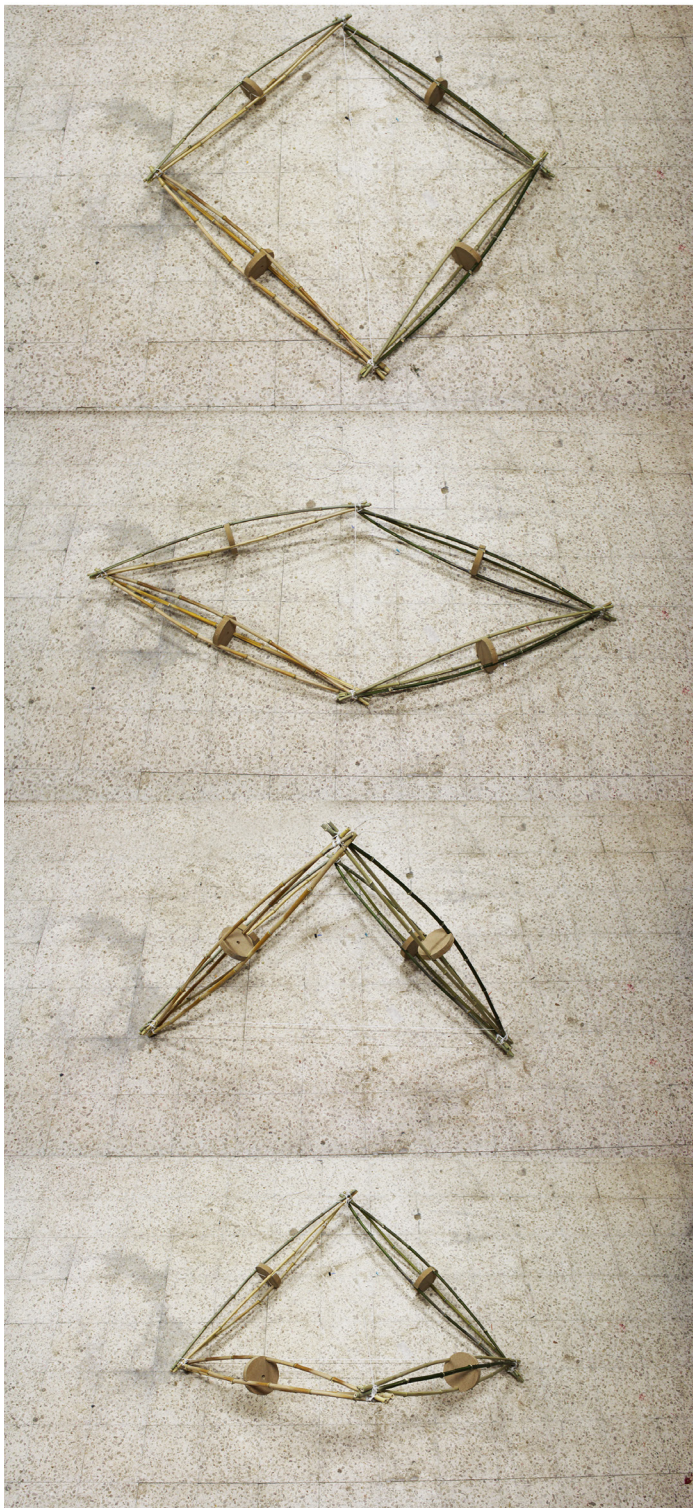
DÉFORMATION TRIDIMENSIONNELLE ET ARTICULATIONS MULTIDIRECTIONNELLES

L'objectif est de mettre en place un module de base, articulé et déformable dans les trois dimensions

Ce module est constitué de quatre barres rigides reliées entre elles par quatre liaisons articulées. En plan, la géométrie dessine un carré non contreventé. La structure hypostatique se déforme du carré au losange, et ce losange peut lui se plier et rendre la structure tridimensionnelle.

L'idée est de développer un assemblage simple et totalement articulé pour permettre une déformation sans limite du système, contrairement au liaison de Bennett.

Les expérimentations suivantes présentent l'assemblage de ses modules sur différentes tailles de trame et avec différentes techniques de liaison.



STRUCTURE CONTRAINTE PAR UN CÂBLE

L'objectif est de contraindre cette nappe par un système de câblage unique qui passe par le centre de chaque barre. Ce tressage fait apparaître un second quadrillage qui permet de contraindre la structure.

Les liaisons de cette grille sont fait par des nœuds de brêlage. La structure n'est donc pas totalement articulée mais flexible à la déformation. Il est intéressant de remarquer que les forces de tension des câbles s'opposent à la flexibilité limitée des nœuds de la structure, ce qui permet d'approcher un état stable lorsque le câble est tendu à son maximum.

Cependant cette structure permet de voir que la méthode du nœud par brêlage n'est pas assez rigoureuse et fiable pour l'appliquer à l'échelle 1 car elle limite la déformation de la nappe à l'exemple des structures en Griedshell.

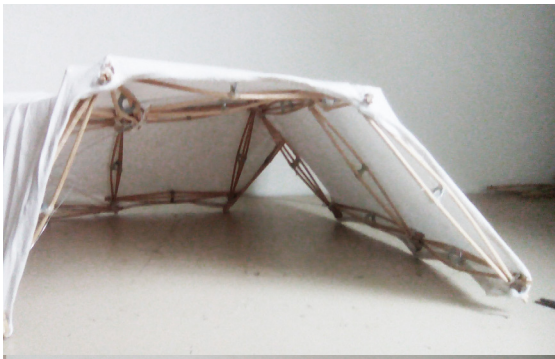
Pour manipuler des structures cinétiques, les prochaines expériences porteront sur des modules totalement articulées.

STRUCTURE CONTRAINTE PAR TOILE TENDUE
LIAISON PAR NŒUDS SEMI-FLEXIBLES

L'objectif est de travailler la déformation d'une trame plane de trois par trois, contrainte par une toile rigide. En démultipliant le module présenté précédemment on multiplie les possibilités formelles que peut proposer ce système.

Chaque déformation d'un quadrilatère induit la déformation de ses voisins et ainsi de l'intégralité de la structure.
La couverture contrevente et empêche la déformation en plan, laissant cependant la possibilité de déformation tridimensionnelle par pliage.

Par la suite il serait intéressant d'essayer de contraindre la trame par d'autre moyen.



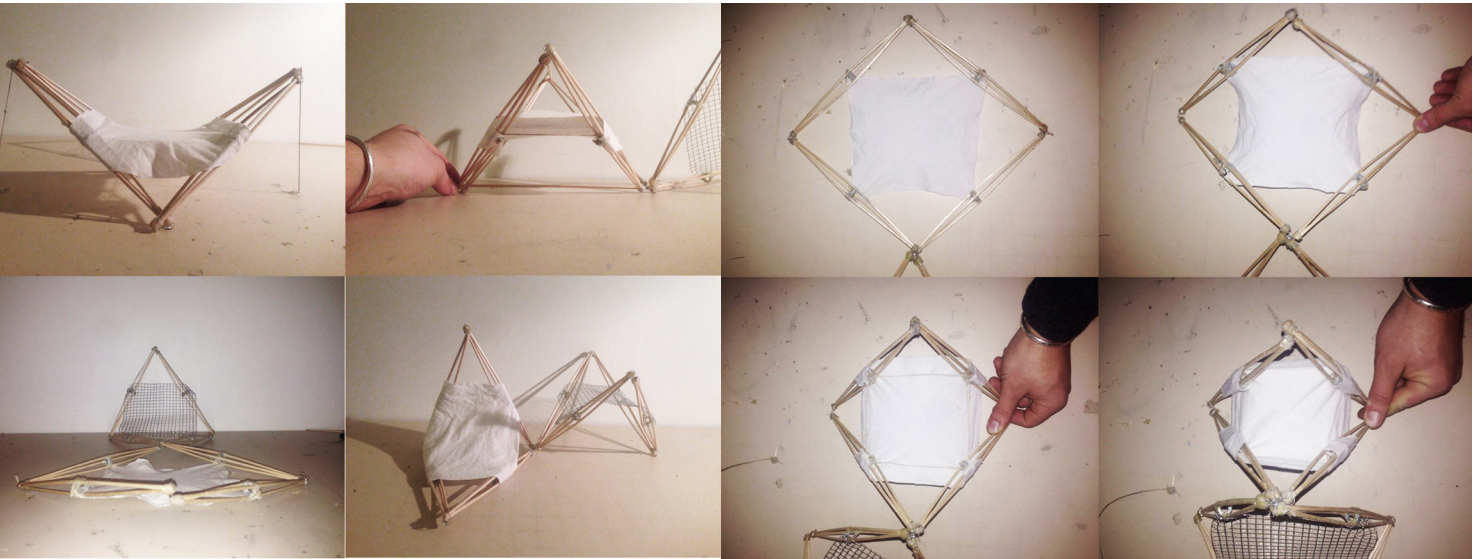
TOILE NON EXTENSIBLE SUR UN MODULE ARTICULE

L'objectif est d'intégrer un système supplémentaire de contrainte interne, susceptible de stabiliser ou déformer le module. Ce système ici est un carré de tissu non flexible.

En travaillant avec des matières qui ne réagissent pas à la compression, les forces extérieures appliquées à la structure doivent contribuer à mettre en tension les contraintes internes et réciproquement.

Ici quand le module se referme, le tissu se détend et s'enroule autour des barres, et quand le module s'ouvre, le tissu se tend et guide la déformation.

Ce principe d'enroulement du tissu implique un mécanisme supplémentaire un peu complexe, Il faut donc continuer de proposer d'autres système.



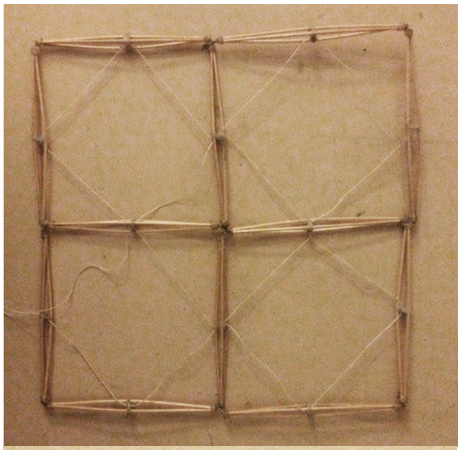
CONTRAINTE PAR CÂBLE UNIQUE
TRAME DÉFINITIVE DE 2 PAR 2

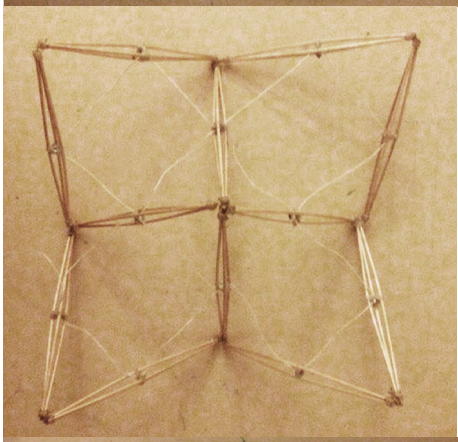
L'objectif est d'appliqur le système de câblage cette fois-ci sur un maillage totalement articulé.

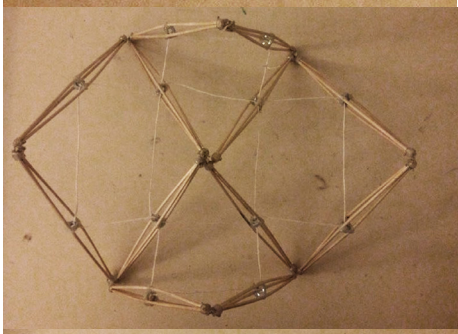
En l'absence de contrainte sur la structure à nu, celle-ci est ouverte à plat et forme une trame plane de deux quadrilatères sur deux.

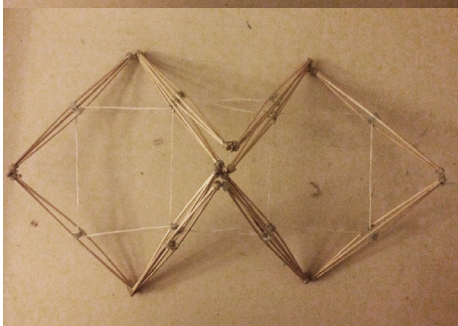
En intégrant dans chaque carré un autre quadrilatère désaxé de 45° on crée un maillage parallèle qui relie, par le centre, chaque barre entre elles. Ainsi lorsque la structure se déploie uniformément et se déforme tridimensionnelle, ce maillage lui se déforme uniquement en plan.

En variant la taille du câble on peut véritablement contrôler le mouvement de la structure, mais les forces de frottement impliquent l'intégration d'un système de roulement complexe.









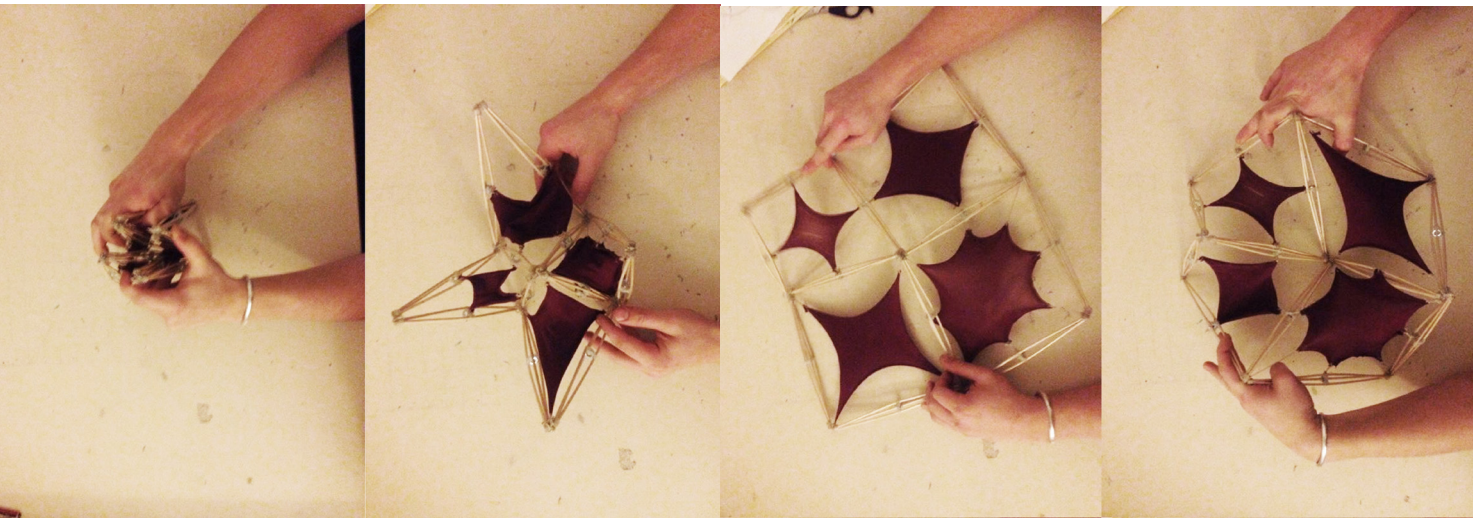
TOILE FLEXIBLE TENDU

l'objectif est de manipuler des membranes flexibles, inspiré des principes géométriques de Frei Otto.

Les toiles tendues sont intégrées chacune dans un quadrilatère avec une mise en tension différente. Par leurs géométries, chaque cas induit une contrainte, plus ou moins forte, sur le module, et la structure ne peut pas se déformer uniformément.

Ici la toile utilisée est un collant, mais à l'échelle une, cette technique implique une connaissance très poussée sur la déformation de la toile, pour venir stabiliser la structure.

Dans l'optique du prototype final, la dernière manipulation traitera un matériau non extensible.



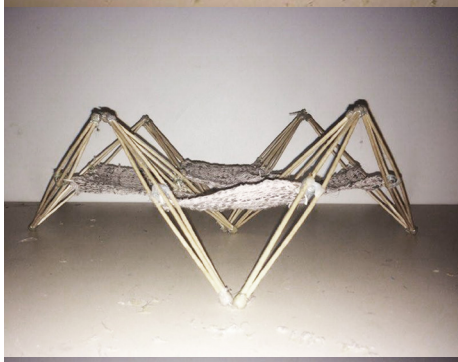
CONTRAINTE INTERNE PAR TRESSAGE
PROTOTYPE FINAL

L'objectif est à présent de définir l'option à mettre en place à l'échelle une.

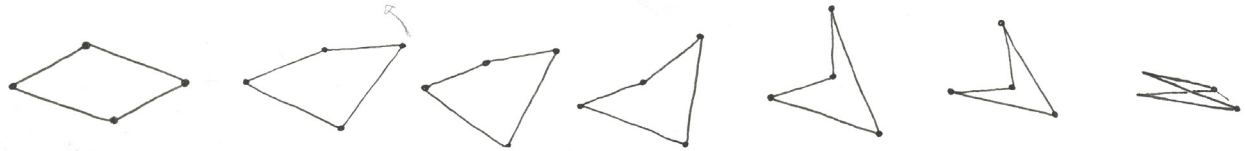
Ce prototype reprend le principe de contrainte de l'expérience 8, mais ici, la surface de carré intégré dans la structure, est en filet de pêcheur non extensible. La dimension des carrés induit donc la limite de déploiement.

Seules les forces extérieures exercées par le poids d'un corps, permettent la mise en mouvement de la structure. Lorsque ces forces sont appliquées de manière égale sur l'ensemble de la structure, elles se déploient uniformément. Si elles sont appliquées sur un seul des modules la déformation sera désaxée.

Le prototype final mettra en parallèle les observations des expériences 8 et 10 afin de pouvoir contrôler le déploiement par le câble et définir un état ouvert stable par les hamacs.



2.2 Prototype final, la conclusion des différentes réflexions

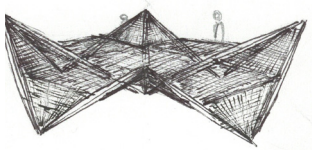


Ce prototype reste encore très conceptuel, il faut à présent détailler ces nombreux points par une étude cinétique interne de la structure dans ces différents états.

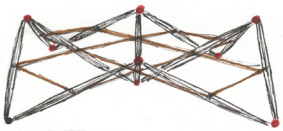
Cela permettra de comprendre l'action des forces internes et externes, nécessaire à la stabilité de la structure ainsi qu'aux variations formelles souhaitées.

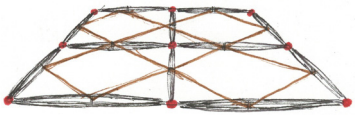
L'articulation totale de ce système permet de nombreuses possibilités formelles: Fermée, Ouverte, En mouvement de manière uniforme ou instable...
Ces nombreux état de déploiement ajoutés à la possibilité de démultiplication de la trame amènent à penser que cet type de structure peux s'appliquer à différentes fonctions: Toiture, Abris, Jeux, Installation.

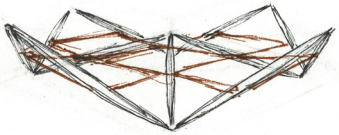
POSSIBILITÉ DE DÉPLOIEMENT DE LA STRUCTURE



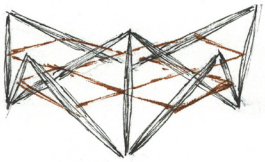
DEPLOYEMENT 1





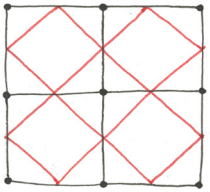


DEPLOYEMENT 2



En fonction de son déploiement, la structure propose différents espaces et donc peu réponde à plusieurs types de programmation.

DÉCOMPOSITION DES DIFFÉRENTS ETATS DE LA STRUCTURE



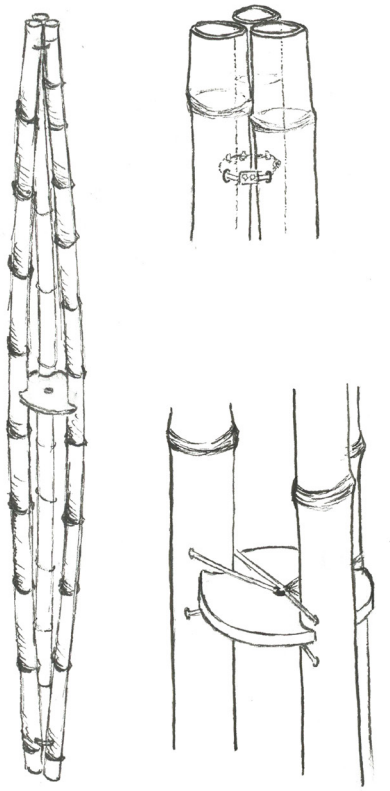
ÉTAT OUVERT

ÉTAT DÉPLOYÉE

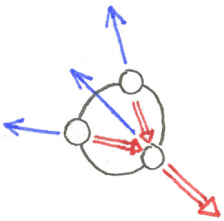
ÉTAT FERMÉ

Ces différents états représentent le mouvement possible de la structure. Ces positions dépendent du système de contrainte interne et des forces externes qui lui sont appliquées.

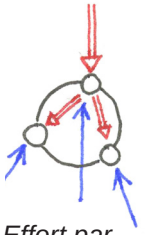
MODULE TRI-BAMBOU



Ayant à disposition des bambous de section intermédiaire, il était nécessaire de trouver un système de barre rigide à la flexion.

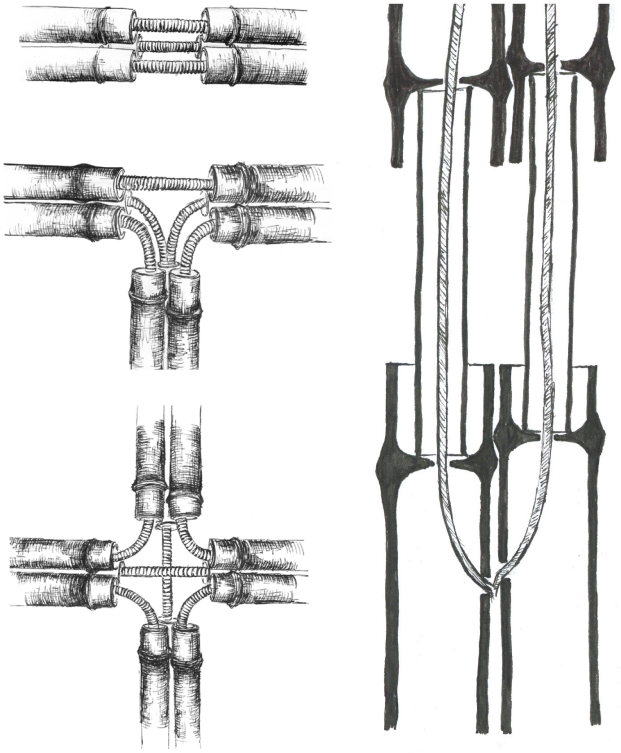


Effort par Traction



Effort par Compression

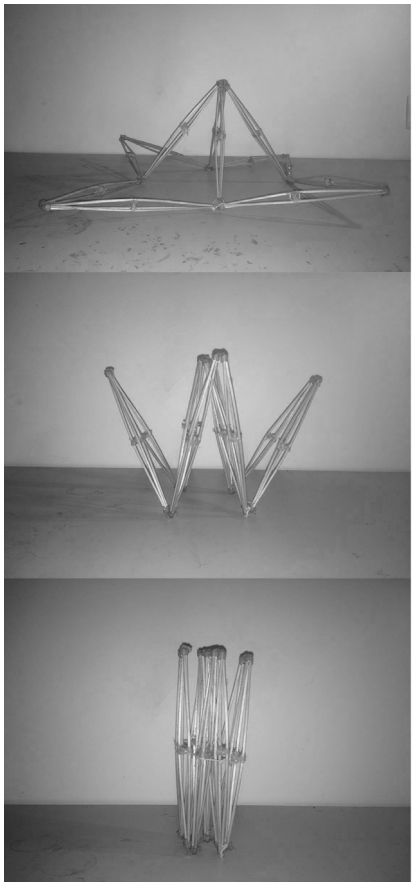
LIAISON ARTICULÉE



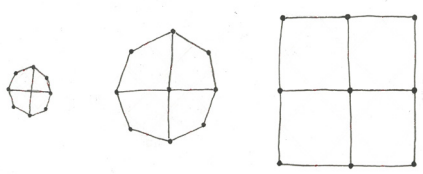
Le système de liaison choisi permet de créer des nœuds totalement articulés, avec des moyens simples et faciles à mettre en œuvre.

Chaque bambou est relié indépendamment à un autre par un câble en acier. Ce câble de liaison est intégré dans un tube en plastique, flexible pour permettre l'articulation mais suffisamment rigide en compression pour tenir à distance les barres entre elles.

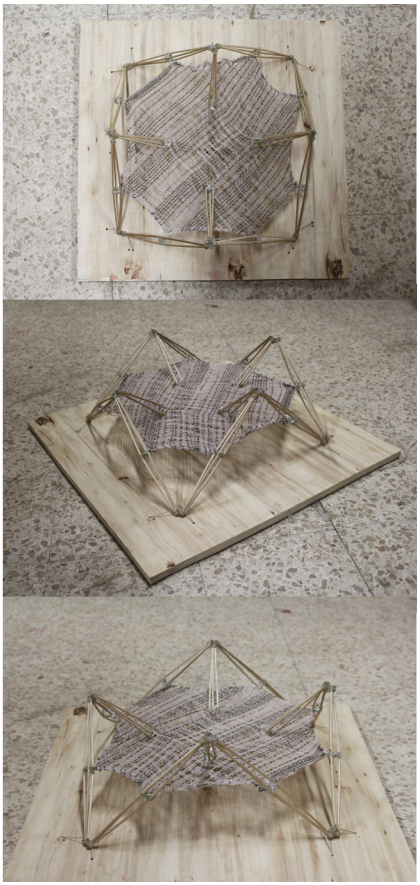
STRUCTURE GLOBALE



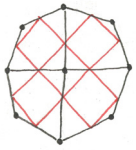
En assemblant 12 barres rigides sur une trame carré de deux par deux, par ces liaisons articulées on obtient une structure globale simple et facilement déformable.



CONTRAINTES INTERNE



La question de la couverture doit être abordée comme une matière qui participe à la déformation ou la stabilisation du dispositif. Ce système de contrainte interne dessine une seconde géométrie qui accom-



3 EXPÉRIMENTATION A L ÉCHELLE 1

3.1 De la maquette à l'échelle 1
3.2 Suivi de chantier
3.3 Possibilité de suite du projet

Afin de concrétiser cette recherche et valider les hypothèses de déformation présentées précédemment, il est important de continuer à l'échelle 1.

En effet le poids propre de la structure joue un rôle dans la stabilité du projet, et il serait intéressant de tester le mouvement et la résistance du système par l'application du poids d'un individu dans la structure.

Cette étape sera l'occasion de définir et détailler les techniques de mise en œuvre du bambou, des articulations ainsi que du système de câblage.

3.1 De la maquette à l'échelle 1

FORME ET FONCTION

Les seuls contraintes de départ étaient l'utilisation du bambou, et la volonté de réaliser une structure articulée.

Au fil des recherches et des expérimentations, le système structurel s'est mis en place et ces contraintes sont devenues les atouts majeurs du projet. Dans cette démarche, la forme découle directement du système constructif mise en place tendis que la fonction dépend du système de contrainte interne (couverture, hamac etc...) et c'est ce système de contrainte qui induit l'état de la structure.

Ainsi, ce prototype final développera un exemple de possibilité formelle et fonctionnelle. Contraint par une surface de toile rigide, (hamac) la structure abritera un espace détente

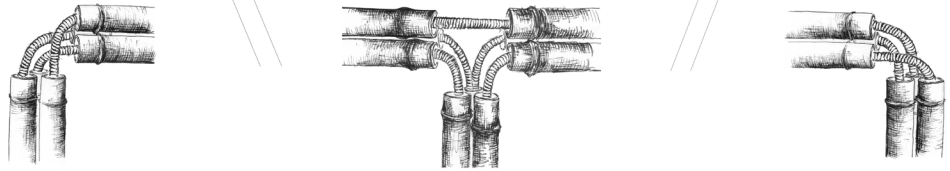
MATIÈRE PREMIERE, LE BAMBOU

Le Bambou provient d'une bambouseraie privée situé à proximité de Bordeaux.
La première étape a été de découper une cinquantaine de sections de 2,5 mètre (taille maximum pour le transport) et de les sélectionner en fonction de leur linéarité, leur capacité de flexion et leur diamètre.
Dans un second temps il a fallu s'assurer que, pour la dimension voulue (2,3m), les nœuds d'extrémité du bambou coïncidaient bien.
Ayant négligé cette étape, les dimensions des barres tri-bambou varient de 2.3 à 2.5 mètre, mais cette erreur ne devrait pas avoir de grosse répercussions sur le déploiement du prototype final.

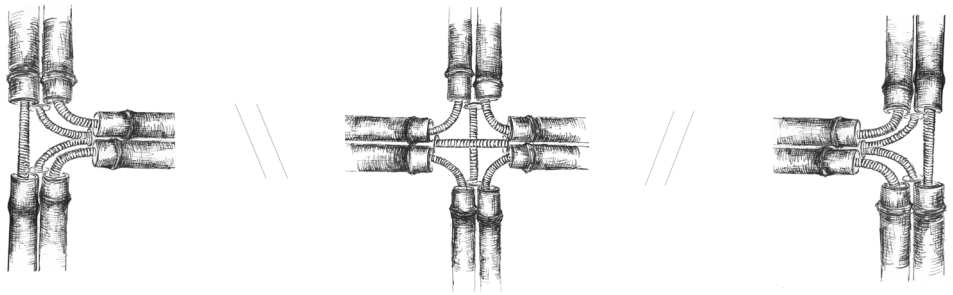
Matière pour 12 tri-bambou: 36 bambous de 2m30 environ

LIAISON

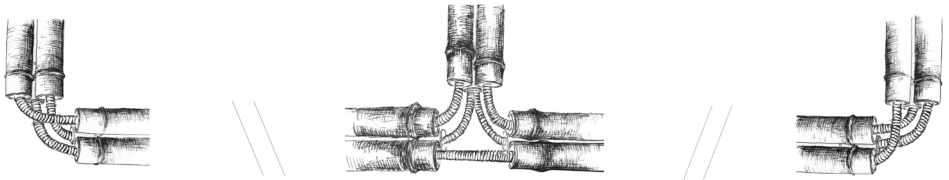
Chaque bambou a une maturité spécifique et donc des entre-nœuds différents. C'est pour cela qu'il est difficile d'industrialiser ce matériau dans la construction. Chaque pièce est unique et il faut composer avec la matière tout au long du chantier, en s'adaptant à ces contraintes dimensionnelles et structurelles.
Pour cela il est difficile de prévoir à l'avance et de chiffrer précisément le mètre linéaire de câble ou de gaine plastique nécessaire pour les assemblages.



Nœud des tri-bambou -Câble acier 3mm: 2.40 mètre
-Collier de serrage plastique x24



Liaison articulée : - Câble acier 3mm: 11.4 mètre
- Serre câble x48
- Gaine électrique: 10 mètre



La construction du prototype se fera dans le local de l'association ADN+, situé à l'École d'Architecture de Versailles.

3.2 Suivi de chantier

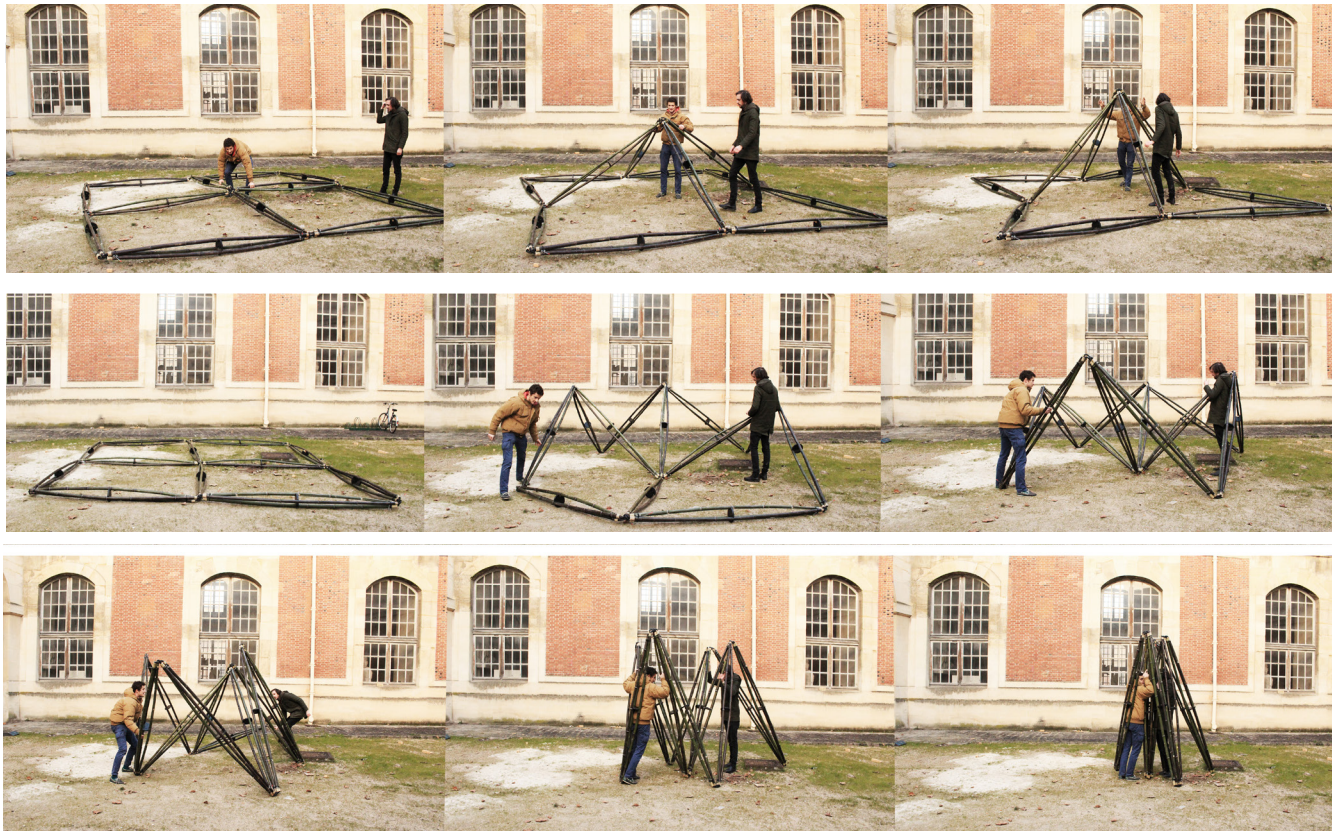
MISE EN PLACE
DES TRI-BAMBOU

Les modules «tri-bambou» semblent bien réagir aux efforts de compression.
L'utilisation du câble en acier permet d'assurer des liaisons résistantes, mais on remarque que, avec la pression, le câble scie légèrement le bambou. Ainsi un collier de serrage en plastique est ajouté pour récupérer les efforts et répondre à ce problème.

MISE EN PLACE
DES NŒUDS ARTICULÉS

Le système de nœud semble totalement flexible, et surtout suffisamment rigide et solide pour résister aux efforts.
Cependant pour certains nœuds, la dimensions des articulations semblent encore mal réglée, et certains bambous, trop fins, se fissurent sous la pression de la gaine en plastique.

MANIPULATION DE LA STRUCTURE A NU



3.3 Réalisation finale

AVANTAGE DE LA STRUCTURE

La réalisation du prototype à l'échelle 1 a permis de conforter les différentes hypothèses étudiées en maquette. Cette étape à été aussi l'occasion de dépasser le statut de recherche en démontrant la possibilité de développer le système à échelle humaine et d'y appliquer des forces mesurables.

L'orientation vers la technique de barre articulée en bambou s'avère très adaptée aux différentes contraintes de l'architecture déployable.

Ce système est facile et très rapide à mettre en œuvre. La construction de la structure m'a pris environ 8 jours tandis que le montage et le démontage de la structure, pour un événement, prend 1 heure.

Grâce à l'utilisation du module de tri-bambou, la structure est suffisamment légère pour être déplacée par deux personnes tout en étant assez rigide pour soutenir .. personnes

Les différentes possibilités de déformation, de démultiplication et de stabilisation de la structure permettent une application et un usage très variés dans l'architecture.

Pliée, elle forme un cylindre de 50cm de large par 2.50m de longueur. tandis que déployé dans un état stable, l'emprise au sol du projet est de 4m par 4m pour 1.8 de hauteur

Cette construction n'a quasiment rien coûté financièrement, grâce au stock de matière et de visserie récupéré à ADN+. Au total: 30 euro de serre câble, de toile, 10 de gaine

L'impact écologique est très faible et même si les bambous ne peuvent pas être réemployés dans une autre construction, c'est le système structurel lui même qui peut se réemployer et se multiplier pour d'autre utilisation.

PROBLÈMES A RÉSOUDRE POUR LA SUITE

Dans l'optique de continuer ces recherches, certains éléments et détails peuvent être repensés. Il serait en effet plus judicieux de trouver un système de barre rigide moins volumineux et plus pérennes. Les tri-bambou pourraient être remplacés par des bambous simples de plus gros diamètre ou encore des éléments métalliques légers. De plus, le système de nœud articulé est surement un peu complexe et fragilise les bambous.

CONCLUSION

RETOUR AU POINT DE DÉPART

Les premières recherches ont porté sur les structures parasismiques et l'architecture de l'urgence. Il est intéressant de voir qu'en réorientant mes recherches sur le mouvement des structures articulées, cela m'a permis de répondre inconsciemment à ces problématiques de départ.

En effet d'un point de vue logistique, fonctionnel, économique et écologique les avantages sont nombreux, et ce système semble développer des caractéristiques parasismiques intéressantes. Si la structure est contreventé de manière hyperstatique elle est stable et reste flexible, afin de mieux répartir les charges. Ainsi le mouvement du sol entraine un mouvement inverse de la structure qui se stabilise par elle même. Elle se déforme, mais ne rompt pas.

Même si cela semble anecdotique, favoriser la plantation du bambou permet de limiter les glissements de terrain, provoqué par un séisme.

Dans un second temps, le système développé pourrait très bien s'adapter aux contraintes qu'imposent les constructions d'urgence. Le prototype à l'échelle une témoigne qu'il est possible de construire des structures déployables avec des techniques et des moyens matériels très accessibles. Ce type de système déployable pourrait servir de tente, d'abri, d'infrastructures facilement acheminable par l'aide humanitaire, ou constructible directement par les sinistrés.

Pour la suite, il me paraîtra donc essentiel de requestionner ce système, pour réussir à l'appliquer à un domaine plus défini et tenter d'apporter une réponse précise avec de véritables enjeux.

BIBLIOGRAPHIE

- Déployable Structures: Forme+Tehnique, Esther Rivas Adrover
- Humanitarian Architecture, Shigeru Ban

- Grow your own house, Simon Velez
- Building with bamboo, Gernot Minke

- Notes D'urgence, Laurence Calafat - Benoit Maignial
- Architecture sans architecte, Bernard Rudofsky

- These Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications Niels De Temmerman
  http://homepages.vub.ac.be/~ndtemmer/Thesis_Niels_De_Temmerman.pdf

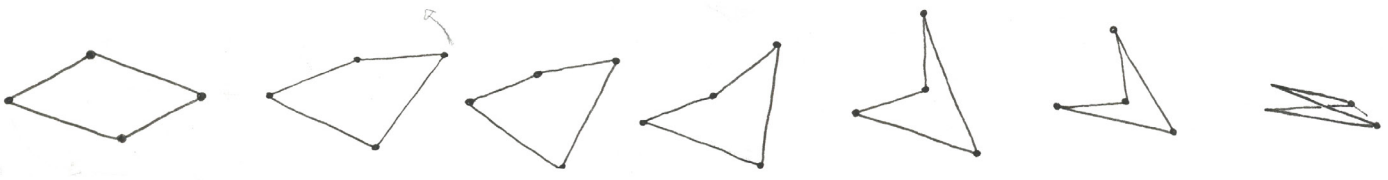
- INBAR International Network for Bamboo and Rattan *(Mail envoyé sans réponse)*
  http://www.inbar.int/#
- ABARI *(en contact)*
  http://www.abari.org/project/

- These, Le facteur séisme dans l'architecture vernaculaire
  https://infoscience.epfl.ch/record/207731/files/EPFL_TH6578.pdf

REMERCIMENT

Je tiens tout d’abord à remercier mes enseignants, Gille Ebersolt et Stéphane Berthier pour leur enrichissant et complémentaire suivi. Cela m’a permis de cadrer mon étude et mettre en place un protocole rigoureux tout en expérimentant une démarche particulière de recherche.

Merci à mes parents pour leurs aides dans la découpe et l’acheminement du bambou de Bordeaux à Versailles.

J’ai une intention particulière aux propriétaires du Châteaux d’Abzac, Monsieur et Madame d’Anglade, qui m’ont fourni le bambou nécessaire.

Et pour finir, merci à l’association ADN+ pour le local, les outils et la matière.