



River Warung at Bambu Source: IBUKU.

# **PROCESSUS DE CONCEPTION AVEC UNE STRUCTURE ACTIVE EN BAMBOU**

**MARIA DEL MAR BARBOSA CASTAÑO**



# **PROCESSUS DE CONCEPTION AVEC UNE STRUCTURE ACTIVE EN BAMBOU**

**MARIA DEL MAR BARBOSA CASTAÑO**

Sous la direction de François GUENA, Anne TUSCHER-DOKIC et Joaquim SILVESTRE  
DANS LE CADRE DU SÉMINAIRE : ACTIVITÉS ET INSTRUMENTATION DE LA CONCEPTION



## REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements aux enseignants du séminaire Activités et Instrumentation de la Conception de l'École Supérieure Nationale d'Architecture de Paris la Villette : François Guéna, Anne Tuscher-Dokic et Joaquim Sylvestre pour leur précieuse direction tout au long de cette recherche.

Je tiens également à remercier Simon Velez car sa rencontre a été le point de départ de mon intérêt pour le bambou comme élément structurel et l'architecture verte.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont pu me conseiller lors de la rédaction et de la correction de ce mémoire.



## AVANT PROPOS

Le sujet de mon mémoire m'a été inspiré en premier lieu par l'architecte Simón Vélez dont j'ai découvert le travail il y a quelques années durant mes études en Colombie. Tout au long de sa carrière, il a développé selon ses propres termes : une « architecture végétarienne » mais non restrictive dont le bambou est la matrice. «La construction [en béton], telle qu'elle est conçue dans le Tiers monde, produit des espaces caverneux [...] L'architecture actuelle suit un régime exagéré et malsain, elle est totalement carnivore. L'état de nature exige que nous revenions à un régime plus équilibré, plus végétarien. » (Interview Simón Vélez, Siente America, 2013) Une architecture se reposant moins sur le béton armé permet non seulement de développer des systèmes plus écologiques mais aussi une esthétique délicate et parfois spectaculaire. Cela m'a amené à m'intéresser de plus près au bambou et à ce qu'il est possible de faire de ce véritable acier végétal. Je me suis donc interrogée sur les différentes manières dont les architectes abordent la conception à partir d'un matériau aux contraintes si particulières.



# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	
INTRODUCTION	9
<hr/>	
<b>1. LE BAMBOU UN MATÉRIAU FLEXIBLE</b>	<b>13</b>
1.1 CONCEPTS GÉNÉRAUX	13
1.2 PROPRIETES PHYSIQUES DU BAMBOU	14
1.3 LE BAMBOU ET SA RESISTANCE À LA FLEXION	16
1.4 METHODES DE COURBAGE DU BAMBOU	17
<hr/>	
<b>2. FORMES STRUCTURELLES</b>	<b>18</b>
2.1 COMPORTEMENT STRUCTUREL	18
2.1.1 FORME NON ACTIVE	18
2.1.2 SEMI-FORME ACTIVE	19
2.1.3 FORME ACTIVE	20
2.1.4 STRUCTURE DE FLEXION ACTIVE	21
<hr/>	
<b>3. ÉTUDES DE CAS</b>	<b>23</b>
3.1 ZCB BAMBOO PAVILION	23
3.1.1 LES VARIABLES	24
3.1.2 DÉFINITION DE LA GÉOMETRIE	24
3.1.3 DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION	25
3.1.4 CONSTRUCTION	27
3.1.3 FLUX DE TRAVAIL	30
3.2 AMPHITHÉÂTRE HYBRIDE, BRÉSIL	31
3.2.1 LES VARIABLES	32
3.2.2 DÉFINITION DE LA GÉOMETRIE	32
3.2.3 DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION	33
3.2.4 CONSTRUCTION	34
3.2.3 FLUX DE TRAVAIL	36
3.2 COCOON PROJET	37
3.3.2 DÉFINITION DE LA GÉOMETRIE	38
3.3.3 DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION	38
3.3.4 CONSTRUCTION	39
3.3.3 FLUX DE TRAVAIL	40
<hr/>	
<b>4. METHODES DE CONCEPTION AVEC UNE STRUCTURE ACTIVE EN BAMBOU</b>	<b>41</b>
4.1 FLUX DE TRAVAIL	43
4.2 FORM-FINDING ET SIMULATION	45
4.3 DÉVELOPPEMENT DE LA FORME	46
4.3.1 MODÈLES PHYSIQUES	46
4.3.2 DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES	47
4.3.3 MISE À L'ÉCHELLE DU COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX	48
4.3.4 INTEGRATION DES DONNES DANS LE MODÈLE NUMÉRIQUE	49
4.4 CONSTRUCTION ET ASSEMBLAGE	50
<hr/>	
CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE	55



Construction d'un bâtiment en bambou. Ph. Errol Balihigh

## INTRODUCTION

Le bambou est depuis des centaines d'années un matériaux privilégié de l'artisanat et de l'architecture dans les zones tropicales où il pousse en abondance, mais se détériorant, il était surtout cantonné aux constructions rurales et pauvres ou aux échafaudages où sa souplesse et sa résistance étaient pleinement appréciées. Le bambou naturel a un potentiel unique sous sa forme non traitée en tant que matériau structurel léger offrant une grande élasticité. Ceci est dû à sa structure cellulaire cylindrique typique et à sa structure fibreuse longitudinale robuste (CROLLA Kristof, 2017)<sup>1</sup>. Il souffre en outre de la persistance de cette image traditionnelle de matériau bas de gamme. Les techniques chimiques modernes et la sensibilité actuelle à l'écologie ont permis à certains entrepreneurs et architectes d'apprécier d'une façon nouvelle ses qualités physiques, esthétiques et économiques.

Comme le note E. A. Nurdiah: "La forme de référence de la construction en bambou provient principalement du bâtiment en bois qui est généralement construit en utilisant une structure à cadre simple"(2016). Les constructeurs ont tendance à penser des structures qui s'apparentent ainsi à des boîtes, statiques et considérées comme ennuyeuses. Mais avec l'évolution constructive de ce matériau et les progrès de l'ingénierie, les formes créées sont devenues plus dynamiques et plus fluides, comme on peut le voir dans les projets menés par IBUKU (Figure 1), une société formée à Bali, en Indonésie, qui utilise ce matériau unique et explore la durabilité architecturale du bambou où les formes organiques prédominent, ce qui est possible grâce aux connaissances et à l'expérience de cette équipe d'artisans, d'architectes et de designers. Il est donc possible d'imaginer de telles formes avec la flexibilité et la résistance du bambou, mais incurver ce matériau suppose des connaissances que très peu d'architectes acquièrent dans leur expérience professionnelle.

La conception de bâtiments à partir d'un tel matériau diffère donc fortement des procédés habituels et suppose des compétences d'ordre scientifiques et techniques spécifiques, particulièrement lorsqu'il s'agit d'édifier un bâtiment aux formes courbes ou organiques. L'un des grands défis auxquels ils doivent faire face en travaillant avec ce matériau en utilisant un processus d'élaboration numérique est de pouvoir prédire le comportement de chacun des poteaux une fois courbé car le bambou a une courbure naturelle limitée, de sorte qu'il lui est parfois impossible de respecter la courbure attendue. (Maurina 2015)<sup>2</sup>.



Figure 1. River Warung at Bambu Source: IBUKU.

1. Kristof Crolla, Building indeterminacy modelling – the 'ZCB Bamboo Pavilion' as a case study on nonstandard construction from natural materials, Crolla Visualization in Engineering, 2017.

2. Anastasia Maurina (2015), Curved Bamboo Structural Element, Department of Architecture, Parahyangan Catholic University .

Un outil informatique adapté supposerait un réajustement constant des variables pour chaque plante en fonction de sa croissance, des variations d'humidité et de températures etc. Ainsi, l'assimilation de la variabilité naturelle du bambou dans les environnements numériques n'est pas possible avec les outils classiques (Crolla, 2017)<sup>3</sup>. Le savoir-faire, les compétences, les outils et l'équipement des travailleurs de la construction disponibles, les caractéristiques de l'espèce de bambou choisie, le type de connexion, le temps nécessaire pour la construction... tout influence et limite la "faisabilité" et la qualité éventuelle du bâtiment en bambou. (Mardjono, 2002)<sup>4</sup>. Cela conduit à trouver des méthodes alternatives pour surmonter l'impossibilité de réaliser des modèles numériques parfaits.

On peut alors s'intéresser au concept de Form-finding, introduit par l'architecte Frei Otto, où les processus de recherche de formes sont effectués à l'aide de modèles physiques, ce qui permet à l'architecte de développer la forme du bâtiment en interaction avec les matériaux (David Wendland, 2008)<sup>5</sup> et de générer la forme optimale d'une structure qui réagit correctement aux charges qu'on lui applique.

Ce procédé est utilisé pour certains pavillons construits en bambou tels que le "Pavillon de bambous ZCV" (Figure 2) et le "Projet COCOON" (Figure 3) où la conception architecturale et structurelle se fait à travers une utilisation rigoureuse des ressources physiques et numériques. Des modèles et prototypes de simulation sont réalisés pour évaluer le comportement structurel lors de la phase de conception et définir les méthodes de construction pratiques, les détails et la séquence d'installation. Comme le note Souza (2017)<sup>6</sup>: « Il faut comprendre le matériau et être conscient de ses caractéristiques, son irrégularité naturelle, la forme qu'il prend en poussant et aussi la manière dont on le coupe. » Plus que dans d'autres cas, la nature et les propriétés du bambou dictent la forme et la structure du bâtiment.



Figure 2. The 'ZCB Bamboo Pavilion' during a night time event  
Source: Chinese University of Hong Kong's School of Architecture

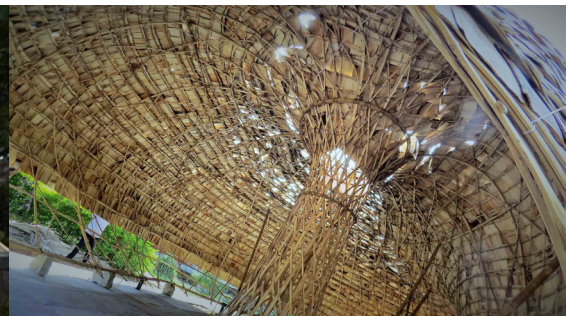


Figure 2. COCOON Project Source: [lcontext.aarch.dk](http://context.aarch.dk)

---

3. Kristof Crolla, (2017) Building indeterminacy modelling – the 'ZCB Bamboo Pavilion' as a case study on nonstandard construction from natural materials, Crolla Visualization in Engineering.

4. Fitri Mardjono, (2002) A Bamboo Building Design Decision Support Tool, Eindhoven University of Technology, The Netherlands

5. David Wendland, (2008) Model-based formfinding processes: Free forms in structural and architectural design.

6. Eduardo Souza, Por qué las maquetas son fundamentales para hacer realidad los proyectos en Bambú, Archidaily Article, 2017

Si nous prenons en compte toutes les variables auxquelles le bambou est soumis et son comportement indéterminé, il est impossible pour un architecte de prédire avec précision, que ce soit avec un modèle physique, un modèle numérique ou les deux, la façon dont ce matériau réagit au moment de la construction.

C'est pourquoi il faut envisager la conception à partir du bambou comme évolutive en ce sens que l'architecte doit réévaluer constamment son travail puis adapter la structure du projet à la réalité du chantier jusqu'à la fin de ce dernier et qu'une main d'œuvre compétente soit capable de résoudre des problèmes spécifiques à un moment donné.

Le bambou est un matériau qui, outre ses qualités écologiques, offre des possibilités esthétiques et structurelles qui lui sont propres. Lorsqu'il est incurvé, il requiert l'emploi de techniques innovantes de la conception à la construction. Nous décrirons donc d'abord ses propriétés biologiques et physiques et les moyens que l'on possède de le travailler. Nous étudierons ensuite les différents types de structures qui sont utilisées par les architectes familiarisés de ce matériau. A travers l'étude de trois cas nous verrons comment ont été adressées les problématiques relatives au bambou courbé. Nous comparerons alors les flux de travail de chaque projet, desquels nous dégagerons une méthode commune. Le développement d'outils informatiques spécifiques affine la méthode de Form-finding de Frei Otto et permet à une appréhension plus globale de la construction de se développer, ainsi le travail de conception est moins segmenté et l'architecte travaille en étroite collaboration avec les ingénieurs et les ouvriers.



# 1. LE BAMBOU UN MATÉRIAU FLEXIBLE

## 1.1 CONCEPTS GÉNÉRAUX

Le bambou est une plante appartenant à la famille des graminées, telle que le maïs ou le riz, caractérisée par ses tiges articulées cylindriques à elliptiques, en général avec des nœuds solides et des entre-nœuds creux. Il est courant de trouver des plantes de bambou en Asie, en Afrique, en Amérique du Sud et dans le Pacifique (Figure 1 ), car elles peuvent s'adapter à une grande variété de zones climatiques, tropicales, subtropicales ou tempérées (Rockwood.D, 2015)<sup>7</sup>. On trouve des bambous adaptés pour la constructions jusqu'à 4000 mètres d'altitude.

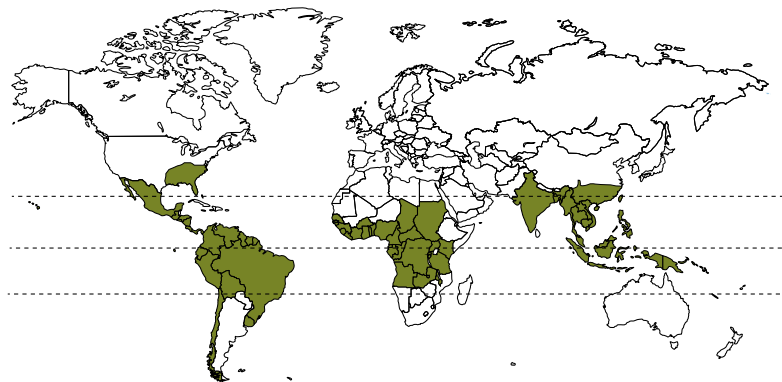


Figure 1. Bambou dans le monde. Source: Elaboration propre.

Le bambou est une plante vivace pouvant atteindre jusqu'à 25 m de hauteur et 18 cm de diamètre en fonction de son type et de sa situation géographique. Il a une structure segmentée par des nœuds solides, qui se développent verticalement. Contrairement aux arbres, sa tige est creuse et divisée par des cloisons. Ces nœuds génèrent un grand avantage pour la courbure et la flexion. (Jenssen, 1980)<sup>8</sup>.

Un grand atout de cette graminée est sa capacité à repousser une fois qu'il est coupé ce qui garantit une continuité de la production et, associé à sa croissance rapide, permet une exploitation et une utilisation optimale de ce matériau. Il faut entre trois et six ans de croissance à une plante pour être mature et devenir propre à la construction.

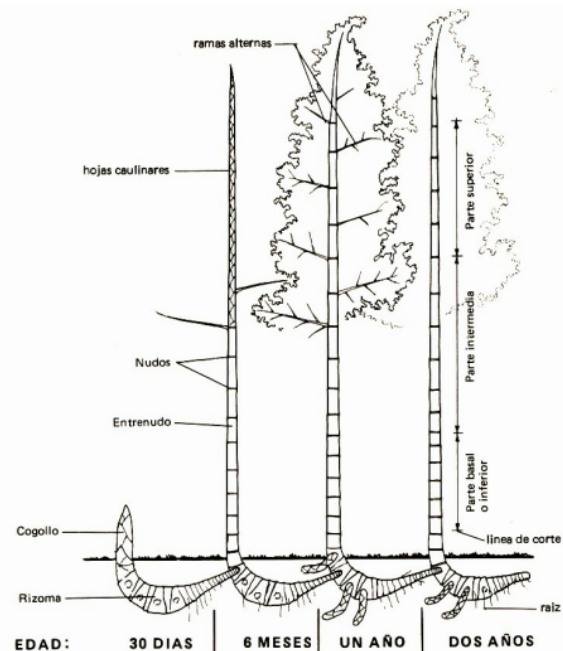


Figure 2. Cycle de croissance du bambou. Source: Manual de construcción en bambu, Oscar Hidalgo Lopez

7. David Rockwood, D.:2015, Bamboo gridshells, Abingdon, Oxon, Routledge.

8. Janssen, J. J. A. (1980). Bamboo in building structures Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven DOI: 10.6100/IR11834

## 1.2 PROPRIETES PHYSIQUES DU BAMBOU

Les caractéristiques physico-mécaniques sont toutes les réactions ou réponses générées par des matériaux solides soumis à une force. Celles-ci reflètent la capacité de résister aux actions de charge que possède chaque matériau. (Andalucia, 2011)<sup>9</sup>.

Pour comprendre les spécificités du bambou, nous devons le considérer comme une plante dans son milieu naturel et prendre en compte ses propriétés physiques (humidité, densité et fibres), mécaniques (élasticité, rupture, résistance à la compression parallèle et perpendiculaire au grain) et chimiques. (celluloses, résines, cires, sels, etc.) (Liese, W. 1995)<sup>10</sup>.

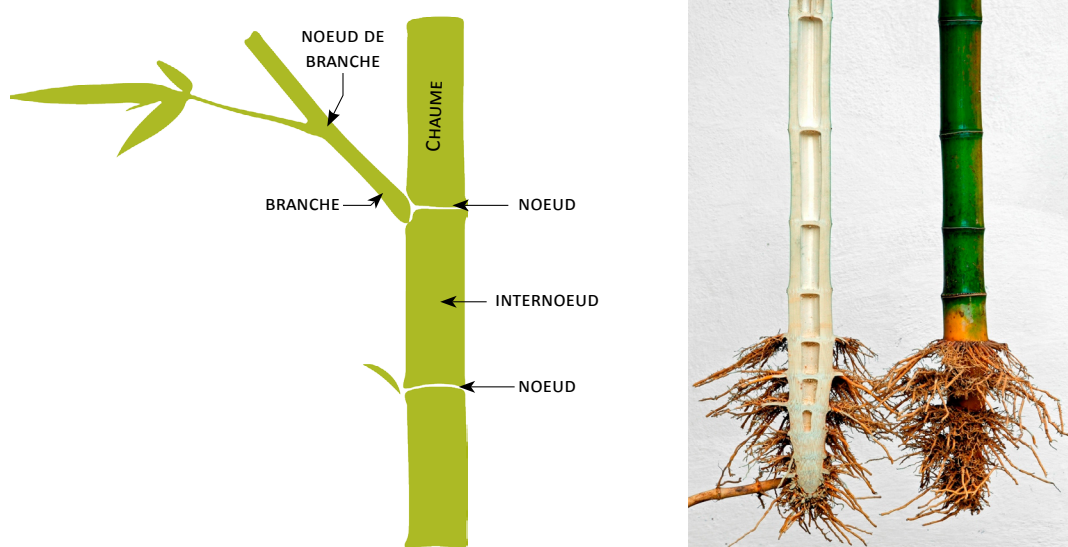


Figure 3. Anatomie du chaume de bambou et Section coupée en bambou.  
Source: bamboobotanicals.ca

Les propriétés mécaniques du bambou sont affectées par des facteurs tels que: le climat, le sol, son type, l'âge du bambou au moment de la coupe, l'humidité de la tige, la section utilisée et la distance entre les nœuds.

La densité des fibres de bambou varie en fonction de l'épaisseur de celui-ci et dépend également de la forme de l'application des charges, qu'elle soit parallèle ou perpendiculaire à la fibre. Mais il faut garder à l'esprit que chaque tige de bambou est différente, ce qui signifie que ni sa géométrie ni son comportement ne peuvent être normalisés (Oscar, H. 1978)<sup>11</sup>.

En ce qui concerne son comportement quand il est soumis à différentes forces, on peut noter que ce matériau a deux faiblesses principales, la force de compression et la force de cisaillement. Ceci est surtout dû à sa forme creuse, à son mode de gondolage et à ses nœuds (Jenssen, 1980). La fermeté aux actions de la force de coupe est plus élevée avec les tiges minces que chez les épaisses, ceci est dû à la proportion des fibres par la section transversale.

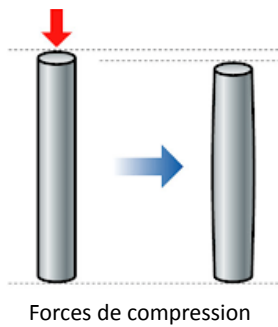
---

9. Andalucía, F. d. (2011). Tipos de esfuerzo físico, Revista digital para profesionales de la enseñanza, Andalucía.

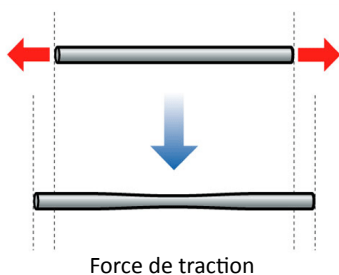
10. Liese, W. 1995. Anatomy and utilization of Bamboos. Eur. Bamboo Soc. J.: 4-12

11. Hidalgo-Lopez, O.:1978, Manual de construcción con bambú, Estudios Técnicos Colombianos Ltda, Bogota.

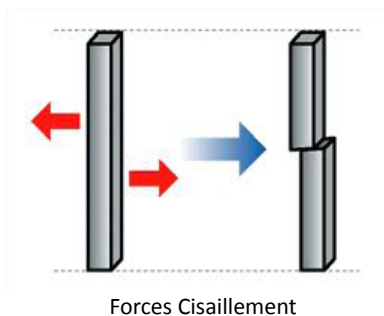
D'autre part, il se comporte très bien soumis à une force de traction, car l'axe ne limite pas le potentiel de sa forme, ce qui rend la connexion avec d'autres éléments structurels plus difficile



Une grande partie du bambou utilisé dans les constructions est assujetti à une force de compression parallèle aux fibres, qui sont soumises à des charges qui tendent à écraser ou à raccourcir les éléments dans le sens de la longueur. Différentes propriétés doivent être prises en compte pour déterminer la compréhension à laquelle les pièces peuvent être soumises, telles que l'humidité, la relation entre la longueur et le diamètre de la pièce de bambou et son âge (plus elle est mature, plus elle résistera à la compression).



Comme dans l'effort de compression, les propriétés physiques caractéristiques de ce matériau (pourcentage d'humidité, présence de noeuds, etc.) affectent la réaction du bâton de bambou à la force de traction. C'est l'un des efforts les plus compliqués auxquels sont confrontées les structures en bambou. Les méthodes de jonction des différentes pièces déterminent la fissuration lorsque des contraintes de traction apparaissent. (Martínez, 2015)<sup>12</sup>.



La contrainte de cisaillement est une mesure de la capacité à résister aux forces qui tendent à provoquer le glissement d'une partie du matériau par rapport à une autre partie adjacente. La fracture de coupe est très différente de la traction ou de la compression car il n'y a pas de réduction localisée de la zone, ni d'allongement. Cet effort doit être pris en compte notamment dans la conception des joints ou des joints. La plupart de ces composants de construction sont soumis à une coupe perpendiculaire à la fibre.

Figure 4. Types de forces structurelles  
Source: Arq. Ruddy Ramon Arias Cepe-  
da-Elementos de Estructuras

12. Samuel Martínez, 2015, Bambú como material estructural: generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo, Tesis, Universidad politécnica de Valencia.

### 1.3 LE BAMBOU ET SA RESISTANCE À LA FLEXION

Une particularité de ce matériau est son rapport de hauteur avec une section transversale de diamètre relativement petit (Rockwood.D, 2015)<sup>13</sup>. Le caractère rond, segmenté et creux du bambou en fait un matériau offrant une grande résistance par rapport à son poids, ce qui lui permet de se plier sans rompre. La forme naturelle du bambou est responsable de sa grande résistance par rapport à sa masse proche de celle de l'acier. (Jenssen,1980)<sup>14</sup>.

Cette plante a besoin de cette résistance pour croître à une hauteur donnée et pour résister aux charges du vent, mais elle est suffisamment souple plutôt que rigide pour plier sous ce dernier. La morphologie du bambou peut être décrite comme un tube creux et sa section arrondie donne une valeur égale pour le rayon de braquage pris dans n'importe quelle direction. (Rockwood.D, 2015).

D'autre part, sa nature flexible présente un fort potentiel de courbure, une forme difficile à obtenir avec d'autres matériaux de construction. Il est alors important de planifier le bâtiment en apportant une attention particulière à sa structure et à sa forme.

Les propriétés physiques qui caractérisent ce matériau affectent également la déviation de la courbure plongée des forces exercées. Sa qualité de poteau rond conique (la section transversale maximale et minimale sur la distance du bâton) détermine la forme de la courbe que prendra le bâton de bambou lorsqu'il sera courbé.(Figure 5). Plus le degré de conicité est élevé, plus la courbe sera grande par rapport aux bambous d'épaisseur plus uniforme. (Dunkelberg K, 1985)<sup>15</sup>. La cause de ces différences de déviation est la finesse qui caractérise chaque bâtonnet de bambou, c'est-à-dire la relation entre l'épaisseur moyenne et sa longueur.

En plus de sa forme conique, sa rigidité et sa densité affectent la ligne de courbure que peuvent supporter les tiges de bambou, ainsi que sa croissance irrégulière, ses branches ou ses intersections.

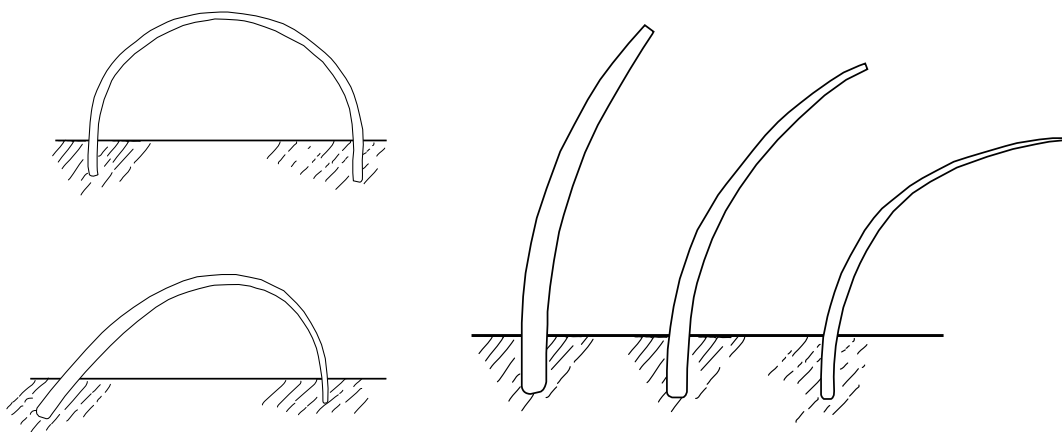


Figure 5. Courbe de déflexion  
Source: IL31 Bamboo. Bambus

---

13. David Rockwood, D.:2015, Bamboo gridshells, Abingdon, Oxon, Routledge.

14. Janssen, J. J. A. (1980). Bamboo in building structures Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven DOI: 10.6100/IR11834

15. Dunkelberg, K. 1985. IL31 Bamboo. Bambus als Baustoff. Bauen mit pflanzlichen Stäben.tuttgart: Institute for Lightweight Structures, University of Stuttgart

## 1.4 METHODES DE COURBAGE DU BAMBOU

Cette matière ayant une courbure naturelle limitée, il est parfois impossible de respecter la courbure attendue. Selon Klaus Dunkelberg, il existe deux méthodes pour courber le bambou: la méthode de pliage à chaud et la méthode de pliage à froid. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients qui affectent directement les propriétés physiques du bambou. (Maurina, 2015)<sup>16</sup>.

1. La méthode de flexion à chaud consiste à chauffer la canne de bambou à 150 ° C, qui sera transformée en un bâton souple et flexible sur lequel on peut donner la forme nécessaire et qui, une fois refroidie, conservera la nouvelle forme. .
2. La méthode de flexion à froid nécessite plus de temps et d'outils. Après section il faut le courber puis le coinser de façon a tirer parti de sa réaction aux charges qu'on l'applique.



Figure 6. Méthodes de flexion à chaud (gauche) et Méthodes de flexion à froid (droit)  
*Source: How to bend bamboo, Stéphane Schröder, (2013)*

Le résultat de cette technique modifie les propriétés mécaniques du matériau. Le bambou courbé a la même force de traction que dans sa forme d'origine, mais sa force de compression a diminué (Maurina, 2015).

En plus d'utiliser cette technique de coupe du bambou, il est possible d'utiliser des tiges minces courbées et assemblées pour créer une nouvelle structure, comme cela fut le cas dans plusieurs projets tels que la salle de sport de l'école internationale Panyaden en Thaïlande.



Figure 7. Tiges Courbes et Assemblées  
*Source: Alberto Cusi (Archydaily)*

16. Maurina, A. (2015). Curved Bamboo Structural Element. Proceeding of International Construction Workshop and Conference Parahyangan. Bamboo Nation 2. Page 81-92. Bandung: Unpar Press.

## 2. FORMES STRUCTURELLES

Dans ce chapitre, nous expliquerons la relation entre forme structurelle et performance structurelle dans les constructions en bambou. L'effet de la géométrie à laquelle ce matériau peut être soumis et l'efficacité de chacune des formes structurelles sont explorées. En particulier, la géométrie qui permet une meilleure exploitation du bambou courbé.

### 2.1 COMPORTEMENT STRUCTUREL

La plupart des structures sont composées d'un grand nombre de composants. Leurs performances dépendent du comportement de chaque type d'élément devant les charges appliquées et de la manière dont ils se connectent les uns aux autres. (Macdonald, A. 1994)<sup>10</sup>. Pour expliquer le comportement de ces éléments lorsqu'ils sont soumis à une charge, nous pouvons trouver trois types d'arrangements de base: structures des formes non actives (poteaux et poutre), formes semi-actives et formes actives, où la géométrie est conforme à la charge principale appliquée.

Dans les structures en bambou, nous trouverons traditionnellement une forme simple des portiques, qui pourrait être considérée comme une forme non active. Cependant, ce matériau avec ses propriétés flexibles prendra automatiquement la forme active quand il est soumis à une charge. Lorsqu'ils supportent cette charge, les éléments de la structure active résistent à un type de force axiale (compression et traction), le type le plus efficace, mais avec une forme géométrique plus compliquée que les autres. (Enggar, W. 2004)<sup>11</sup>

#### 2.1.1 FORME NON -ACTIVE

Ce système repose sur une structure de colonnes et de poutres, de murs porteurs ou de portiques. Ce système est très courant dans les structures en bambou où les éléments horizontaux sont soumis à des forces internes de flexion pure et les éléments verticaux à des forces internes de compression axiale pure lorsque des charges gravitationnelles sont appliquées. (Macdonald, A. 1994).

Grâce à cette structure de cadre simple, nous pouvons avoir une plus grande liberté à l'intérieur du bâtiment, réalisant ainsi différents espaces intérieurs ainsi que la possibilité d'avoir plusieurs étages. Dans le cas de la Fundacion Escuela para la Vida (Figura 9), en Cali, Colombie, cela a une structure régulière de portiques de 5 et 7 m,

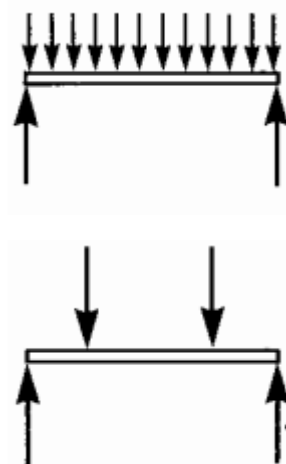


Figure 8. Formes non actives à la compression  
Source: Structure and Architecture, Angus J. Macdonald (1944), Department of Architecture, University of Edinburgh.

10. Macdonald, A. (1994). Structure and architecture, Department of Architecture, University of Edinburgh

11. Enggar, W. (2014) Comparison de l'utilisation du bambou dans le structure "Form-Active" et "Semi-Active", a l'arc, construction de largeur, Institut de recherche et de service communautaire, Université catholique de Parahyangan.

avec un renforcement diagonal. Cela leur permet d'avoir 3 étages où chaque niveau a une superficie de 330 m<sup>2</sup> en utilisant uniquement le guadua (type de bambou qui pousse en Amérique latine) comme système structurel, avec une plante plus libre et des espaces qui servent de salle de classe, de salle de bain et de stockage.



Figure 9. Construction Fundación Escuela Para La Vida, Cali, Colombie - Structure de poteaux et putres.  
 Source: Greta Tresserra (Archdaily)

### 2.1.2 FORME SEMI-ACTIVE

Les éléments qui constituent les structures semi-actives contiennent une gamme complète de types de forces internes tels que la poussée axiale, le moment de flexion et la force de cisaillement. Les moments de flexion sont plus petits que ceux qui se produisent dans les structures de colonnes et de faisceaux de un envergure équivalente (Macdonald, A. 1994).

Les structures semi-actives sont souvent utilisées pour obtenir une efficacité supérieure à celle d'une structure poteau-poutre, c'est-à-dire une section plus longue ou une charge appliquée plus légère. Dans sa forme la plus courante, ce type de structure consiste en une série de cadres rigides plats identiques disposés parallèlement les uns aux autres pour former un plan rectangulaire.

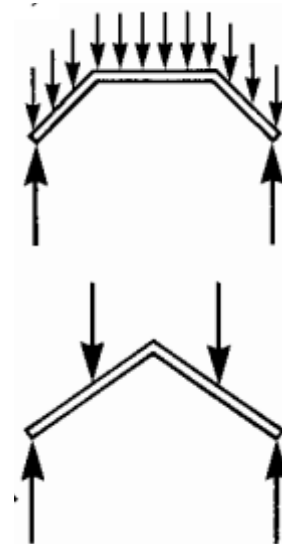


Figure 10. Formes semi actives à la compression  
 Source: Structure and Architecture, Angus J. Macdonald (1944), Department of Architecture, University of Edinburgh.

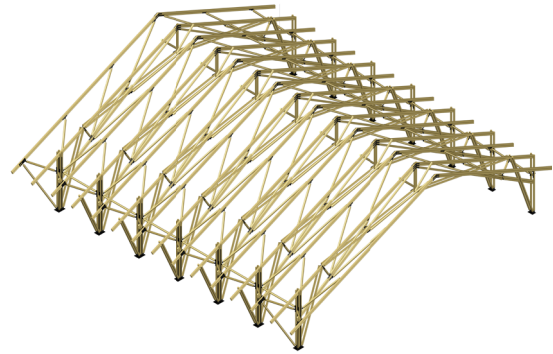


Figure 11. Construction Patio Bambú, Étade de Mexique, Mexique  
Source: Architeka

### 2.1.3 FORME ACTIVE

La forme active est trouvée lorsque les charges (efforts internes uniquement) sont concentrées dans des points d'appui générant une courbure où la charge est répartie le long de celle-ci (Figure 12), c'est-à-dire que la structure est ajustée à la forme active des charges. , ce qui conduit à un bâtiment avec une géométrie spécifique. Dans ce système, nous pouvons trouver les arcs et les *grid shells*, qui sont soumis à une force de traction donnant ainsi une géométrie de courbe active.

Le niveau de complexité impliqué dans sa conception et sa construction peut être apprécié à partir du moment de la conception initiale, où la forme des éléments doit être anticipée pour éviter que la trop grande raideur d'un poteau n'entraîne une pliure ou une cassure. "Il est souhaitable que la géométrie exacte de la forme active réelle soit déterminée pendant le processus de conception et que la structure s'y conforme." (Macdonal, A. 1994).

Cependant, la géométrie de la forme active en bambou est très complexe et il est difficile de déterminer avec précision et donc de reproduire exactement dans une structure réelle. En particulier, le rayon de courbure n'est pas constant, ce qui nuit à l'analyse de la structure et à sa construction. Ces structures sont soumises à une variété de charges différentes qui, dans le cas du bambou, peuvent être ajustées à la géométrie requise grâce à sa propriété flexible, à condition que la variation de la charge ne soit pas trop extrême par rapport à la conception initiale.

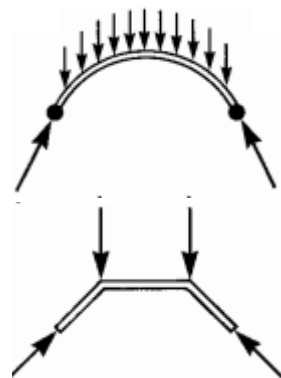


Figure 12. Formes actives à la compression  
Source: Structure and Architecture, Angus J. Macdonald (1944),  
Department of Architecture, University of Edinburgh.

Le centre d'événement de Mepantigan, construit par IBUKU, possède deux arches géantes qui s'étendent sur 15 m et reposent sur des piliers concentrant ainsi la charge sur ceux-ci et permettant la courbure naturelle du bambou.

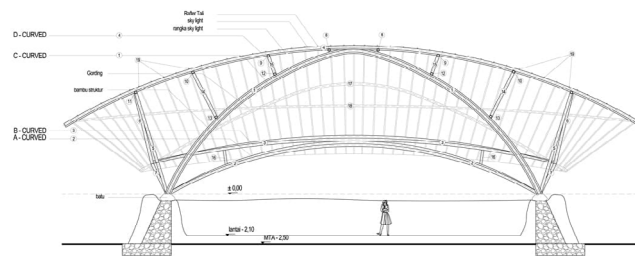


Figure 13. IBUKU Mepantigan Auditorium

#### 2.1.4 STRUCTURES DE FLEXION ACTIVES EN BAMBOU

Le terme «Flexion Active» est utilisé pour décrire des poutres et des structures courbes qui basent leur géométrie sur la déformation élastique d'éléments initialement droits ou plats (Knippers et al 2011)<sup>12</sup>. La flexion active du bambou est alors comprise comme une définition de la forme basée sur la déformation élastique, c'est-à-dire la flexion. La trajectoire des forces, en tant que critère d'efficacité d'une structure, ne peut être généralisée en termes de mécanisme totalement inhérent à ces structures. « Il s'agit donc d'un processus de formation au cours duquel les pôles se plient élastiquement » (Lienhard, 2014)<sup>13</sup>

Le comportement des structures de flexion actives dans le bambou n'est pas clairement prévisible, leur support de charge dépend en grande partie de la variété des topologies et des expressions géométriques qui peuvent être générées. Cependant, le résultat de la recherche de forme ne définit pas automatiquement une géométrie structurellement optimisée.

12. Knippers, Jan & Cremers, Jan & Gabler, Markus & Lienhard, Julian. (2011). Construction Manual for Polymers + Membranes. Institut für internationale Architektur-Dokumentation, GmbH & Co. KG, Munich.

13. Julian Lienhard. (2014), Bending-Active Structures. Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart.

De là, la conception de ces structures peut varier en fonction du comportement souhaité. Pour déterminer la géométrie et le comportement structurel du système, il est courant d'utiliser une approche intuitive, déterminant ainsi les limites du bambou.

La motivation à utiliser des structures en flexion active réside dans la simplicité de production d'éléments courbes. Dans le passé, le manque d'alternatives techniques de fabrication et de connaissances pour plier les éléments structurels, a fait que la conception avec du bambou était restreinte à des structures simples. De nos jours, pour des raisons économiques de performance, d'adaptabilité et de tendance, on opte plutôt pour la flexion active comme système structurel. Cependant, les avantages des structures de flexion actives résident non seulement dans la possibilité de générer des géométries courbes complexes pour les structures statiques, mais aussi dans les possibilités d'adaptation de la forme ainsi que dans la cinétique, qui repose entièrement sur la déformation élastique

Comme le note Julian Lienhard, les structures de flexion actives deviennent une approche plutôt qu'une typologie structurelle. Cela signifie que son dénominateur commun n'est pas un comportement de charge défini ou une définition géométrique, mais un processus de formation au cours duquel les éléments structurels se plient élastiquement. À base de bambou, une grande variété de combinaisons de systèmes structurels peut être générée par cette déformation élastique.

### 3. ÉTUDES DE CAS

Dans cette section, Nous analyserons des bâtiments en bambou réalisé avec une forme active. Les objets d'étude ont été choisis pour leur design, leur système et leurs méthodes de construction spécifiques. Nous décriront d'abord les projets les mieux achevés puis en quoi d'autres projets de diverses envergures ont réussi ou échoué. A partir de ces études, nous pourrions préciser comment la méthode utilisée dans chaque cas et les aspects particuliers qui distinguent chacun des projets influencent le résultat de la construction finale.

#### 3.1 THE ZCB BAMBOO PAVILION

Le «Pavillon de bambous ZCB» est un espace public temporaire pouvant accueillir 200 personnes. Il a été achevé en octobre 2015 à Kowloon Bay, à Hong Kong, où il a été utilisé pendant 8 mois avant d'être recyclé. C'est une structure de flexion active de 37 mètres de haut, construite avec des tiges de bambou non transformées, nouée à la main selon le savoir-faire traditionnel des échafaudages en bambou cantonais et enfin recouverte d'un tissu extensible.

La structure est créée à partir de la combinaison d'une conception numérique avancée et de méthodes traditionnelles cantonaises pour fixer le bambou à la main. Le système tectonique du pavillon est une structure de carcasse en diagonale qui se courbe en trois grandes colonnes creuses. La configuration de la colonne tripode utilise un système de trois couches de poteaux de bambou qui sont reliées par du fil d'acier galvanisé aux points d'intersection. La flexion et la triangulation des éléments en bambou créent un système léger, solide et stable même sur de longues distances sans nécessiter de support supplémentaire.

Le projet est le résultat des efforts concertés du Conseil de l'industrie de la construction (CIC), de l'Université chinoise de Hong Kong (CUHK) et de divers entrepreneurs. Il a été conçu par une équipe de recherche dirigée par le professeur Kristof Crolla de la CUHK School of Architecture. Avec l'aide d'une équipe d'artisans locaux spécialisés dans la construction d'échafaudages en bambou cantonais, ils ont pu former un groupe de travail bénéficiant d'une expertise complète afin de résoudre les imprévus qui pourraient résulter du processus de construction. À Hong Kong, le bambou a traditionnellement été utilisé pour les échafaudages et pour la construction d'espaces destinés à des manifestations temporaires.



Figure 14 .Vue aérienne du 'ZCB Bamboo Pavilion' par jour.  
Source: Kristof Crolla

Sans plans architecturaux ni dessins, mais suivant les règles générales et les noeuds liés à la main, les ouvriers sont capables de monter rapidement les grands et complexes échafaudages nécessaires à la construction de nombreux immeubles de grande hauteur et autres bâtiments de la ville. (Yannie Chan Sin Yan, 2016).

### 3.1.1. VARIABLES

Selon Kristoff Crolla, différentes variables ont dû être prises en compte avant de commencer la conception du pavillon. Ces variables ont un impact considérable sur les aspects structurels et la conception du pavillon, ce qui nécessite une étude précoce. La longueur totale des matériaux coupés dans la forêt de bambous déterminerait le nombre de poteaux nécessaires pour couvrir l'espace d'une colonne à l'autre, de même que la limitation de la taille des camions et les limites pratiques de transport constitueraient un facteur important pour limiter leur longueur. Parallèlement à cela il a fallu adopter un modèle numérique capable de s'adapter aux changements qui résulteront du processus de conception. Il était également nécessaire de créer une méthode d'assemblage suffisamment simple pour permettre un croisement linguistique et culturel entre les membres de l'équipe de travail.

### 3.1.2. DÉFINITION DE LA GÉOMÉTRIE

Le projet a débuté par un atelier de conception et de construction où les participants ont réalisé des modèles physiques pour tester différentes options.

Le procédé de Find Forming a été choisi pour la création de la géométrie du «Pavillon de bambous ZCB» afin de générer la forme optimale de la structure et de définir ainsi les contraintes spécifiques qu'elle engendre. Le concept structurel du projet a été établi à travers une série de cinq itérations du modèle d'étude de conception physique à l'échelle 1:20 (Figure 15), constitué de longues sections de bambou. Il a été possible de prédire un comportement géométrique représentatif grâce à l'usage du même matériau que celui du projet final.

Répondant aux observations sur la stabilité structurelle, la connexion et la conception de la géométrie, ces modèles d'étude ont

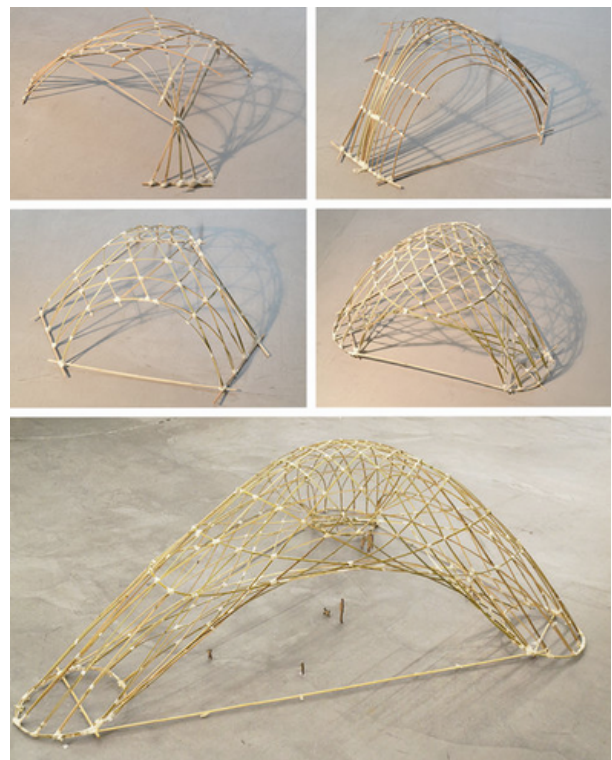


Figure 15. Développement itératif du concept de design utilisant des modèles physiques à l'échelle 1 à 20 à partir de bâtons de bambou. Source: Kristof Crolla

progressivement évolué pour trouver la forme finale du pavillon. Cette coquille est formée de trois couches de bambou et se replie sur elle-même en trois grandes colonnes creuses à éléments linéaires quadrangulaires et suspendus.

À partir de la cinquième itération du modèle d'étude physique, un premier modèle numérique a été développé dans le logiciel Rhinoceros à l'aide du complément du modélisateur de procédures Grasshopper et du complément du moteur de simulation de force physique de Kangaroo.(Figure. 16)

La séquence a débuté à partir d'un réseau de courbes dessinées à plat que le programme convertit en modèle 3D à partir de paramétrages précis, en particulier en utilisant deux types de force: les forces de ressort de la ligne et les forces de flexion. La première applique une force élastique entre les extrémités de chaque segment de courbe afin de maintenir une longueur de repos spécifique et la seconde applique une force de flexion entre les segments linéaires adjacents de chaque courbe afin de redresser la courbe. Le modèle de courbe d'intersection qui en résulte a été développé au-delà d'un modèle d'axe sans intersection qui incorpore des diamètres de bambou et la longueur individuelle des perches qui se chevauchent. (Criolla, 2016).

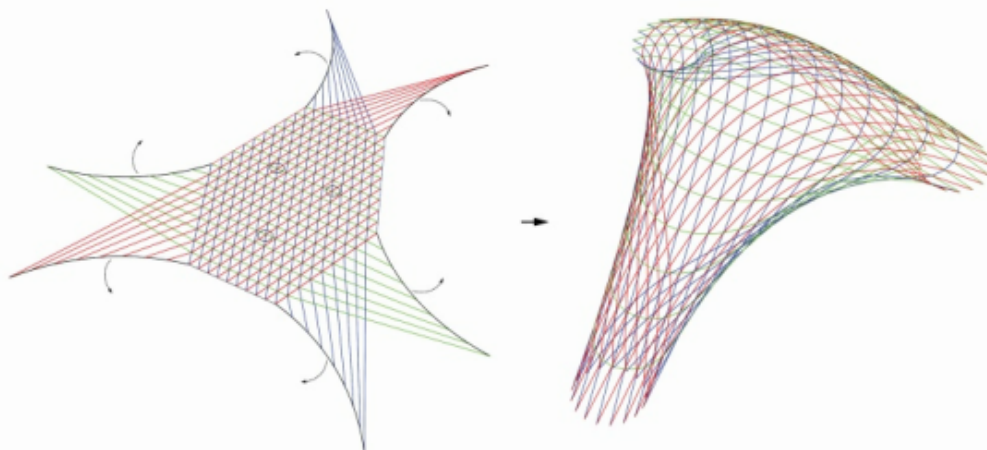


Figure. 16 Simulation numérique  
Source: Kristof Criolla

### 3.1.3. DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION

La géométrie du premier modèle a été utilisée pour établir les premiers plans architecturaux qui servent à la communication du client et de l'entrepreneur lors de l'appel d'offres public. Les ingénieurs structurels se sont également basés dessus pour évaluer la viabilité du projet.

Un prototype à l'échelle 1:30 de ce premier modèle numérique a été fabriqué avec des bâtons de bambou de deux mètres de long suivant les lignes de l'axe géométrique. Ce prototype a révélé plusieurs éléments imprévus qui pourraient affecter la structure finale à grande échelle. Premièrement, qu'il est impossible d'employer des sections de bambous dont la longueur serait 30 fois supérieure aux bâtonnets du modèle physique car seuls des poteaux de 12 mètres environ pouvaient convenir à la construction, ce qui signifie que pour atteindre la forme et la distance souhaitées, le bambou doit se chevaucher plus souvent. Deuxièmement, que l'approximation de l'épaisseur et de la forme du bâton de bambou devait être intégrée numériquement avec une plus grande précision.

Un deuxième modèle numérique intégrait la plupart de ces problèmes. La géométrie idéalisée à plat était initialement divisée et compensée en trois couches espacées en fonction des épaisseurs moyennes attendues du matériau de bambou. La géométrie des axes de tous les membres a donc été ajustée pour fonctionner uniquement entre ces trois couches de manière à suivre une séquence d'installation soigneusement orchestrée.

À partir de ce deuxième modèle numérique, un prototype a été construit à l'échelle 1 à 4. Ce modèle a été utilisé pour évaluer le caractère pratique des améliorations en termes de séquence d'installation et pour tester le comportement structurel à grande échelle (Fig. 17).



Figure 17. Deuxième prototype, utilisé pour l'évaluation du comportement structurel. Source: Kristof Criolla

Pour cette étape, des bâtons de rotin de trois mètres de long et d'un diamètre de trois centimètres furent utilisés. Le rotin est une canne beaucoup plus souple que le bambou, ce qui exagère le comportement structurel du prototype. Les longs éléments de la structure ont été fabriqués avant l'assemblage en attachant arbitrairement les bâtons de rotin avec un chevauchement suffisant pour transférer les forces de flexion. Avec un diamètre correctement mis à l'échelle, le prototype a confirmé la cohérence et la lisibilité du système de marquage des intersections et de la nouvelle séquence d'installation. La grande flexibilité du rotin a permis d'évaluer le fluage et la déviation dans le temps. Il a été découvert que la coque extérieure était extrêmement solide et stable, mais que la partie inférieure de la coque, le "ventre", s'est effondrée. En réponse, un système de suspension a été introduit dans les modèles suivants. En outre, l'interconnexion arbitraire de tiges de rotin sur de longues lignes d'axe continu a révélé des problèmes de nouage dans les zones de nœuds où les directions des trois axes se chevauchent et où jusqu'à six pôles s'entrecroisaient. En outre, la rencontre entre les chevauchements de sections de bambou et ces nœuds ont entraîné des difficultés structurelles. Par conséquent, le positionnement exact des superpositions a dû être inclus dans les modèles de conception suivants.

Le modèle numérique final, testé sur un troisième prototype à l'échelle 1 à 20, incorporait toutes les informations utilisées lors de la construction finale (Figure 18). Après un test physique du rayon de courbure maximale avec plusieurs piliers en bambou, une analyse numérique de la courbure du membre a été réalisée pour vérifier l'adéquation de la géométrie.

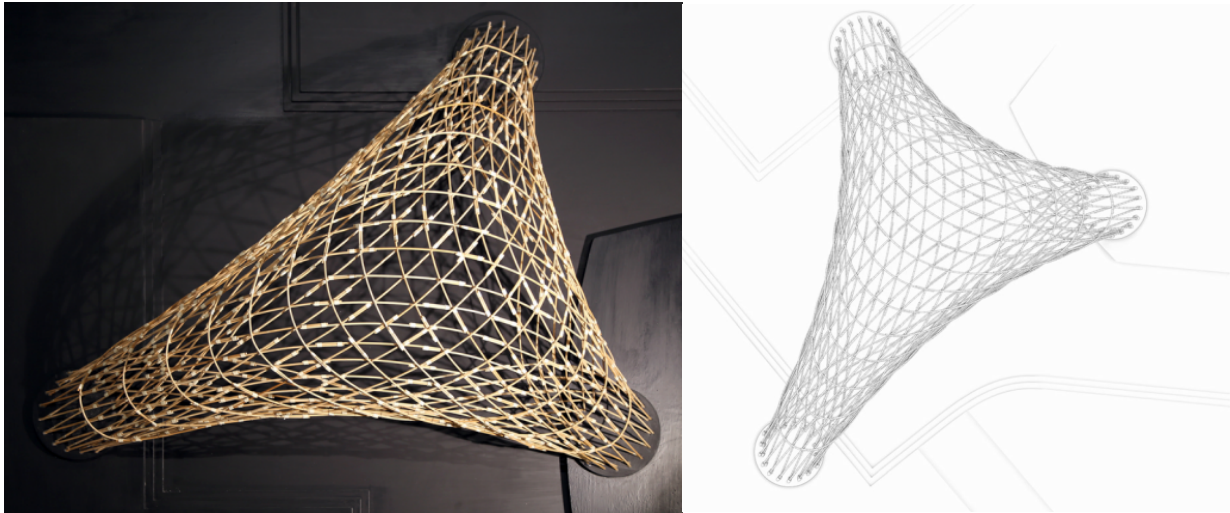


Figure 18. Troisième prototype: test final de la séquence d'installation (bambou, 1:20) (Gauche) et modèle de géométrie numérique final (Droit)

Source: Kristof Criolla

Les restrictions imposées au transport routier ont confirmé que la longueur des tiges de bambou pouvant être transportées ne pouvait excéder 7,2 m, et des essais avec de véritables poteaux de bambou ont révélé un chevauchement nécessaire de 1,5 m pour assurer un transfert adéquat de la force de flexion sans les plier ou les rompre. Cette information a été intégrée au modèle et le motif de superposition de poteaux a été conçu. Un diamètre approximatif de 12 centimètres a été adopté pour les modèles numériques puisque afin de correspondre aux diamètres exacts des poteaux qui allaient de 12 à 15 centimètres à la base et de 8 à 12 centimètres au sommet.

### 3.1.4. CONSTRUCTION

Les poteaux de bambou poussent dans une variété de formes et sont rarement parfaitement droits. Étant donné que la géométrie du "Pavillon de bambou ZCB" nécessitait une variété de matériaux de pliage, une relation entre la géométrie de conception et le stock de matériaux disponible sur le site était nécessaire pour mieux déployer les poteaux. Après une inspection visuelle rigoureuse du stock livré, le bambou a été classé en fonction de la qualité et du degré de courbure. Ensuite, ces poteaux ont été triés en différentes piles et déployés en fonction des zones de géométrie de surface les plus essentielles. Ce processus a permis d'éviter une sélection aléatoire de bambou au cours des étapes d'assemblage initiales. Le système numérique a été mis à jour pour classer les poteaux en fonction du degré de pliage requis. Tout ce processus a aidé dans les zones particulièrement courbes.

Lors de l'assemblage du pavillon, le bambou a été plié manuellement et connecté aux points d'intersection, définissant ainsi un modèle d'arbre totalement incurvé pour la géométrie générale. Les forces de flexion internes ont été continuellement transférées entre les membres par les nœuds jusqu'à l'obtention d'un équilibre des forces globales.

La configuration flexible du modèle numérique a permis la mise à jour progressive des variables supposées liées aux propriétés physiques du matériau, aux techniques de construction et à la conception détaillée.

Les documents de construction ont conservé un haut niveau de précision lors de l'établissement des repères du point d'intersection de la connexion dans des éléments d'épaisseur variable. Ces marques sont devenues des guides pour un processus d'assemblage incluant des tolérances aux erreurs et imprécision humaines, ce qui a abouti à une interconnexion qui a permis un processus de Form finding in situ.

Lors de l'installation, on a constaté un certain niveau d'auto-correction du matériau. Et, le système dépendant du comportement naturel du matériau en flexion, les erreurs d'installation qui s'écarteraient trop de la géométrie numérique simulée «exacte» deviendraient impossibles car le matériau tenterait de trouver son propre équilibre et cela mettrait en péril l'intégrité de l'installation.

Les poteaux en bambou sont d'abord verrouillés en les ancrant dans un socle de fondation de pierre et de béton et en lançant des barres de départ en acier saillantes dans la cavité de la section de bambou.

Les cinquante-quatre barres de départ ont été pliées à angle droit à l'aide d'un tuyau en acier creux. Après installation, chaque poteau a été placé en premier sur son armature. Une fois en place, le coulis non rétractable a été versé dans les poteaux par un petit trou foré sur la barre de renforcement jusqu'à ce que toute la section inférieure soit remplie. La section interne irrégulière du bambou empêche le glissement. Pour des raisons de sécurité, des pinces métalliques supplémentaires ont été ajoutées pour empêcher la séparation en cas de fissure du bambou.



Figure 19. Raccordement à la fondation: cintrage manuel de la barre pour corriger l'angle à l'aide d'un tuyau en acier (Gau-  
che); socles de fondation de poteaux individuels coulés dans des tuyaux de drainage en PVC coupés à la main (au centre);  
positionnement du bambou sur les barres d'armature (à droite)

Source: Kristof Criolla

Un facteur important qui a également affecté la construction finale est un été exceptionnellement chaud, qui a séché et durci les poteaux à un degré inattendu. En dehors de cela, la structure a été réalisée sans problème majeur en utilisant la même méthodologie de construction que celle utilisée dans les prototypes à petite échelle et en utilisant les mêmes techniques de fixation et matériaux que ceux utilisés dans les constructions d'échafaudages locaux traditionnels.

Cependant, les variations dimensionnelles naturelles du bambou et les tolérances dans les nœuds ont rendu impossible l'assemblage de chacune des pièces, car un décalage s'est constitué par glissements accumulés (Fig. 20). De plus, les membres étaient sporadiquement trop courts ou trop longs aux points de connexion de base en raison de déviations supplémentaires, ce qui nécessitait de trouver des solutions sur site.



Figure 20. Exemple typique de décalage entre les articulations *Source: Kristof Criolla*

Enfin, une numérisation 3D haute résolution de la géométrie finale construite a été réalisée et mesurée par rapport aux données numériques (Fig. 21). La plupart des membres en flexion ont retrouvé leur forme finale à moins de 50 millimètres du modèle simulé. Cependant, dans deux zones de courbure minimale, la structure a tenté de s'aplatir, deux des trois membres se redressant plus que prévu, ce qui a entraîné des écarts de plus d'un mètre. Sur le plan visuel, la différence ne posait aucun problème puisque le public n'a pas perçu les différences entre le dessin et la structure elle-même. Par conséquent, la déviation a été considérée comme faisant partie du comportement de recherche naturel du projet.

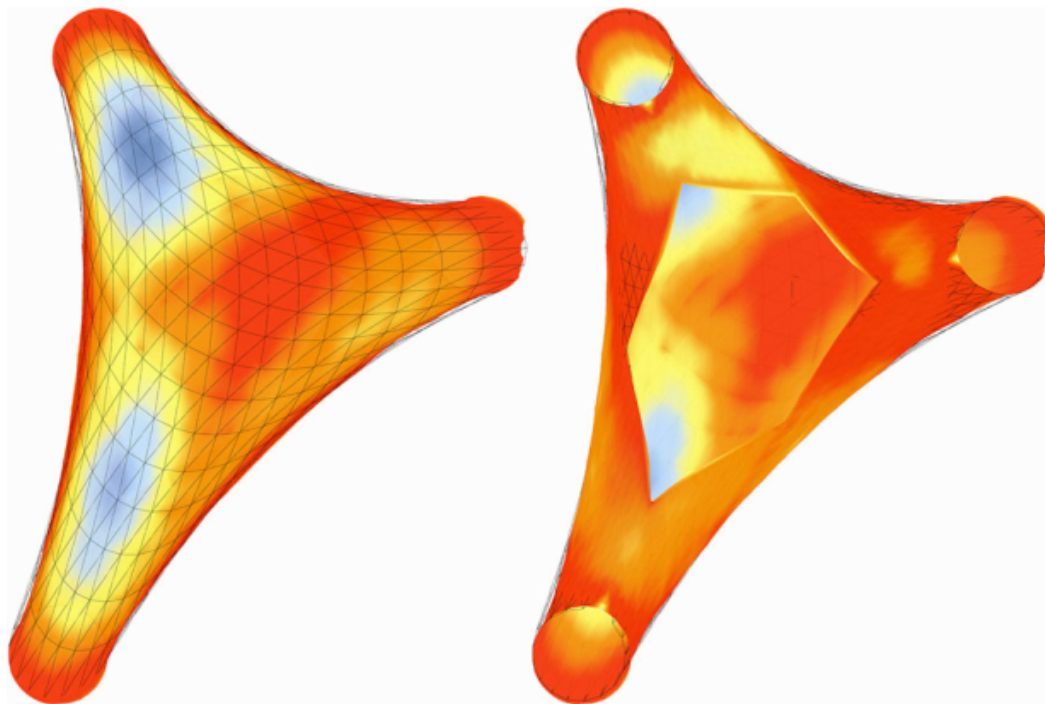


Figure 21. Tissu scanné 3D par rapport au tissu conçu à l'origine: rouge = écart inférieur à 50 mm, bleu = écart supérieur à 1000 mm; Vue de dessus (à gauche); vue de dessous (droite) *Source: Kristof Criolla*

### 3.1.5. FLUX DE TRAVAIL “THE ZCB BAMBOO PAVILION”

Le flux de construction utilisé par le pavillon de bambou ZCB a été défini par la complexité du projet, qui visait à explorer de manière plus rigoureuse la forme d’un bâtiment en bambou à flexion. Pour cela, des outils de conception et le prototypage de modèles physiques ont été utilisés à diverses échelles. Le modèle numérique a été configuré pour développer une géométrie définie par les modèles physiques initiaux et créer un moyen de traiter les informations pour une construction correcte sur le terrain. La création de prototypes physiques a créé des opportunités pour tester et insérer des informations dans le modèle numérique afin de le recalculer et d’effectuer une analyse ultérieure. Les données devenant plus spécifiques tout au long du processus de conception et de prototypage, la nature imprévisible du matériau et de la méthode d’assemblage nécessitait de nouvelles instructions pour le traitement de l’information, celle-ci devant être suffisamment claire pour minimiser toute mauvaise interprétation des données qui entraînerait des erreurs techniques, d’assemblage ou dans l’ordre des opérations.

Ce dialogue permanent entre simulation et visualisation numériques d’une part, et création de prototypes physiques de l’autre, s’est poursuivi tout au long du processus de construction et de montage, car les événements fortuits nécessitaient des modifications constantes du système de gestion. A l’exception de son ampleur, la construction finale prolonge le même flux de travail que celui des prototypes.

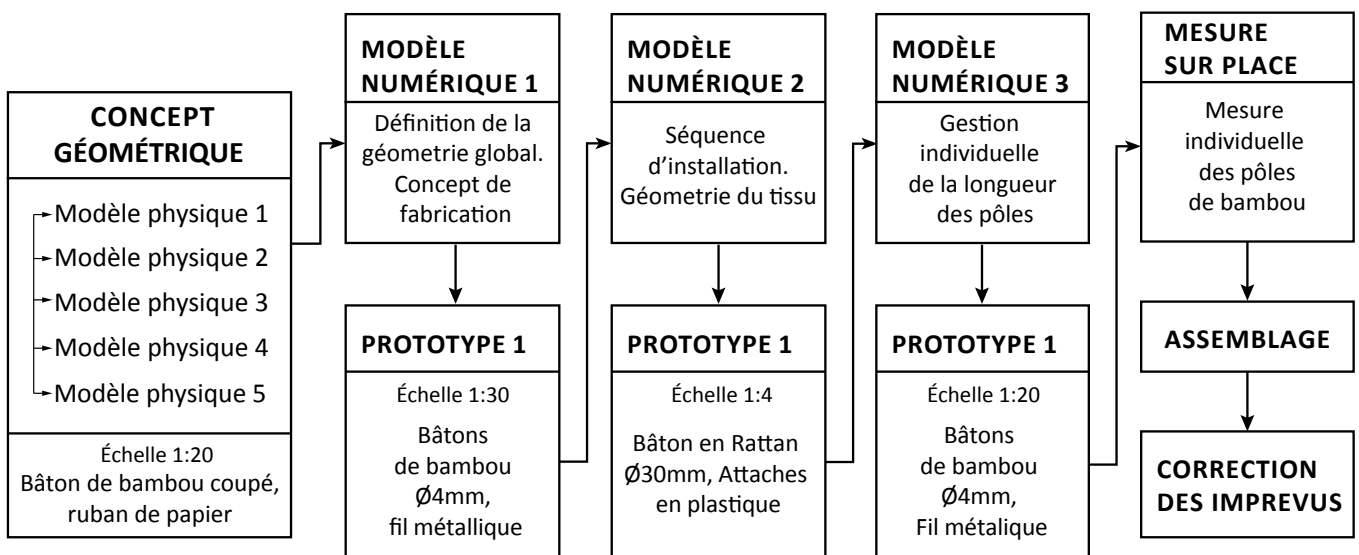


Figure 22. Flux de travail pour ZCB Bamboo Pavilion  
Source: *Elaboration propre*. Basé sur le modèle de Kristof Criolla

### 3.2. STRUCTURE D'AMPHITHÉÂTRE HYBRIDE, BRÉSIL

Il s'agit d'un projet de toit d'amphithéâtre en bambou, achevé en 2014 à Rio de Janeiro, Brésil. C'est une œuvre réalisée par des architectes de l'Université pontificale catholique de Rio de Janeiro sur les rives de la rivière Rainha, sur le campus de cette même université. La coupole de l'amphithéâtre conçue par le professeur Junito Brandão est une structure spatiale mobile en bambou de forme libre de 17 x 12 m, sur une surface couverte totale de 200 m<sup>2</sup>.

La structure a été construite sur des fondations conçues par l'architecte Carlos Pingarrilho. La conception structurelle a été élaborée à l'aide d'une méthode de Form-finding, au moyen de maquettes physiques et de modèles informatiques mis en interaction.

Le dôme utilise une structure spatiale hybride formée par des poteaux en bambou traité autoportants, des grilles pantographiques extensibles et des poutres en flexion actives auto-étirables, évitant le flambement des éléments structurels. Les poutres de flexion actives et les mailles pantographiques ont été soumises à des charges externes prescrites lors d'un processus de déformation élastique pendant l'assemblage. La structure spatiale hybride a créé des formes résilientes et naturellement acoustiques, appliquant des surfaces concaves qui maintiennent et distribuent le son dans l'espace. Le toit utilise des membranes acryliques précontraintes qui le protègent de la pluie et du soleil dans le climat tropical. (Fig. 23)



Figure 23. Structure d'amphithéâtre hybride, Brésil.  
*Source: Bambutec.*

### 3.2.1. LES VARIABLES

Pour ce projet, il était prévu d'utiliser des poteaux en bambou de 5 ans de croissance, sélectionnés dans des plantations de bambou dans les états de Rio de Janeiro et São Paulo. Celles-ci ont été préparées un an à l'avance en les traitant par enfumage dans un four horizontal pendant 72 heures, puis en les séchant dans un endroit couvert pour le reste de l'année. Les tiges de bambou étaient protégées avec un vernis industriel et un polymère d'huile de ricin, car la structure devait supporter la lumière du soleil et à la pluie. Des traitements contre l'humidité et les insectes ont également été utilisés pour cette récolte.

### 3.2.2. DÉFINITION DE LA GÉOMÉTRIE

Des études antérieures et des travaux réalisés par des architectes pour la création de formes avec une structure de traction en bambou à double courbe ont conduit à la proposition de ce système dans ce nouveau projet. Ces études ont été adaptées à la structure, à la modulation et aux conditions locales. Pour le développement de la structure hybride en bambou, les premiers modèles à petite échelle de la structure ont été développés sur les plans initiaux de l'amphithéâtre par l'architecte Carlos Pingarilho. (Fig.24). Les modèles de géométrie de base du chantier ont été construits à des échelles de 1:50 et 1:20.

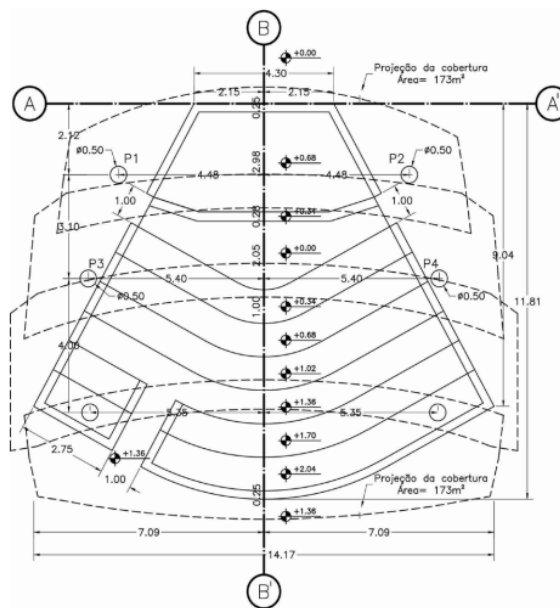


Figure 24 Vue en plan de l'amphithéâtre  
Source: Bambutec.

Le processus de recherche de la structure a commencé à partir de l'étude du motif du maillage de la grille pantographique. Des modèles à petite échelle ont été développés pour travailler le modèle de grille en courbure. Ces prototypes en bambou ont été recouverts de membranes de toile de coton précontraint à échelle 1:20 (Fig. 25). Ceci afin de récupérer des données sur les propriétés physiques des grilles de bambou sous la déformation forcée. Ces modèles physiques ont adopté le comportement structurel actif attendu, générant une surface à double règle. Des facteurs tels que la stabilité, la mobilité, la capacité de déploiement, la légèreté et l'adaptabilité de la structure à l'espace environnant ont été pris en compte.



Afin d'avoir des sections allant jusqu'à 19 mètres, un système de treillis a été intégré au modèle pour bloquer la déviation des arches de bambou.

Avec les éléments structuraux analysés séparément, 4 prototypes physiques ont été réalisés en intégrant toutes ces informations afin de décrire la structure au sol, d'établir la méthodologie de construction, l'ordre de composition des arches et la capacité de courbure des tiges de bambou. (Fig.27)

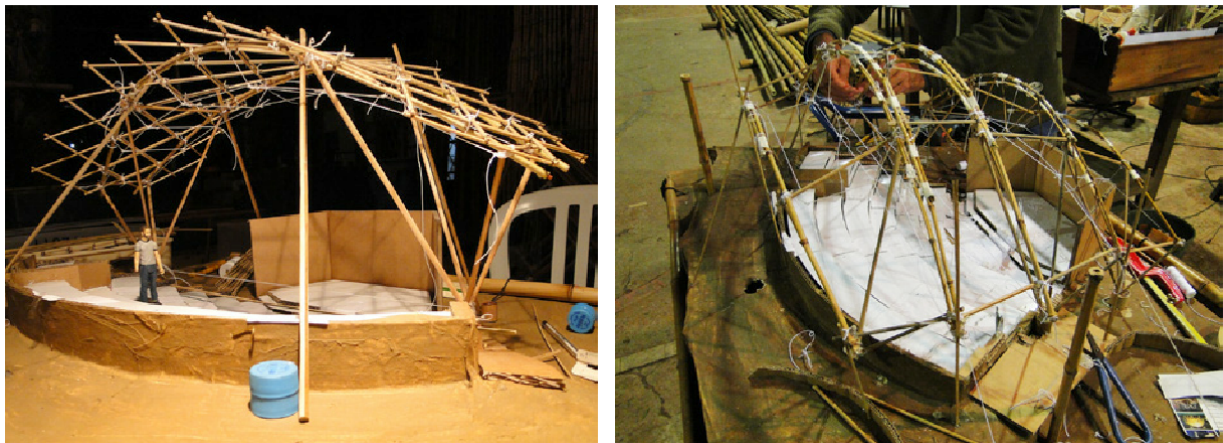


Figure 27. a) Le module quadrillage pantographique régulier.  
b) La structure spatiale de forme libre avec poutres de flexion et bipieds de support  
Source: Bambutec.

À partir des prototypes, un modèle CAO a été réalisé pour déterminer la structure que les arches de bambou auraient ainsi que pour obtenir les plans et les représentations finales du projet.

### 3.2.4. CONSTRUCTION

Le processus d'installation a commencé par l'assemblage des doubles colonnes des deux côtés des fondations de l'amphithéâtre. Ceux-ci avaient des charnières sur leurs connexions supérieures pour recevoir les faisceaux. Les poutres en flexion active ont été montées séparément comme anticipé par les prototypes, grâce à la déformation élastique des arches en bambou et tendues grâce à des câbles en acier (Fig 28). La grille de bambou était, elle, initialement étendue au sol afin de pouvoir la fixer aux poutres en flexion active.

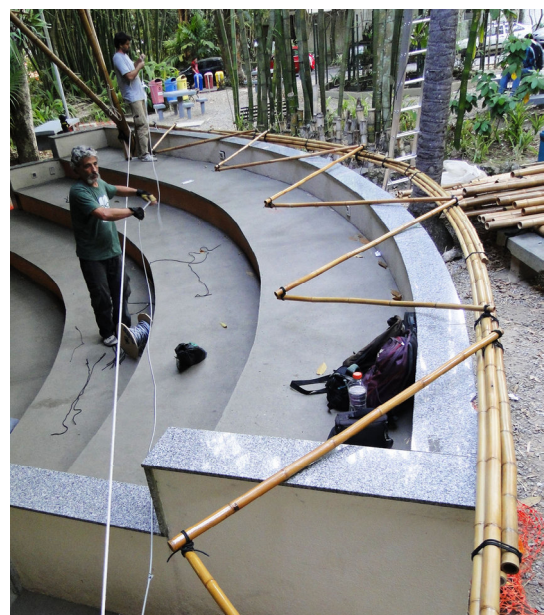


Figure 28. Déformation élastique de la poutre de flexion active en bambou  
Source: Bambutec.



Figure 29. Grille pantographique en traction  
Source: Bambutec.

La première coque a été érigée par une procédure d'inclinaison à l'aide des colonnes et de poulies qui ont permis de soulever tous les éléments plus facilement jusqu'à ce qu'ils atteignent leur position finale d'équilibre dans l'espace.

Cette même procédure a été reproduite pour ériger les 3 autres coques. Des techniques adaptatives ont été utilisées sur le site d'assemblage, en tenant compte de facteurs tels que: l'inclinaison du site, la géométrie de base, les arbres environnants et l'espace d'exploitation disponible.



Figure 30. Couplage de poutres actives en flexion sur la première grille pantographique de traction suspendue.  
Source: Bambutec.

### 3.2.5. FLUX DE TRAVAIL D'AMPHITHÉÂTRE HYBRIDE, BRÉSIL

Le flux de travail utilisé pour cet amphithéâtre commence par une approximation de la première instance de bambou et de son comportement dans les structures de ce type. Fort d'un projet antérieur avec les mêmes caractéristiques, la réalisation de la génération d'une première géométrie a été très rapide. La création de prototypes physiques a permis de vérifier le comportement des poteaux en bambou pour les différents éléments qui formaient la structure du projet. Pour la grille, divers prototypes ont été utilisés pour confronter le motif à la réalité du bambou soumis à cet effort. Pour les arches qui fonctionnant comme des poutres, le processus de Form-finding a permis de planifier les différents problèmes que la forme active générerait, de vérifier qu'aucun élément n'entraverait la forme finale des poteaux de bambou et la nécessité d'intégrer des poutres en treillis.

Ce processus de découverte et de conception était basé sur des modèles physiques qui permettaient une expérimentation complexe et généraient des données qui étaient appliquées au modèle suivant. Ceux-ci ont été intégrés au logiciel de CAD, qui a été utilisé pour finaliser la conception et planifier plus efficacement la construction.

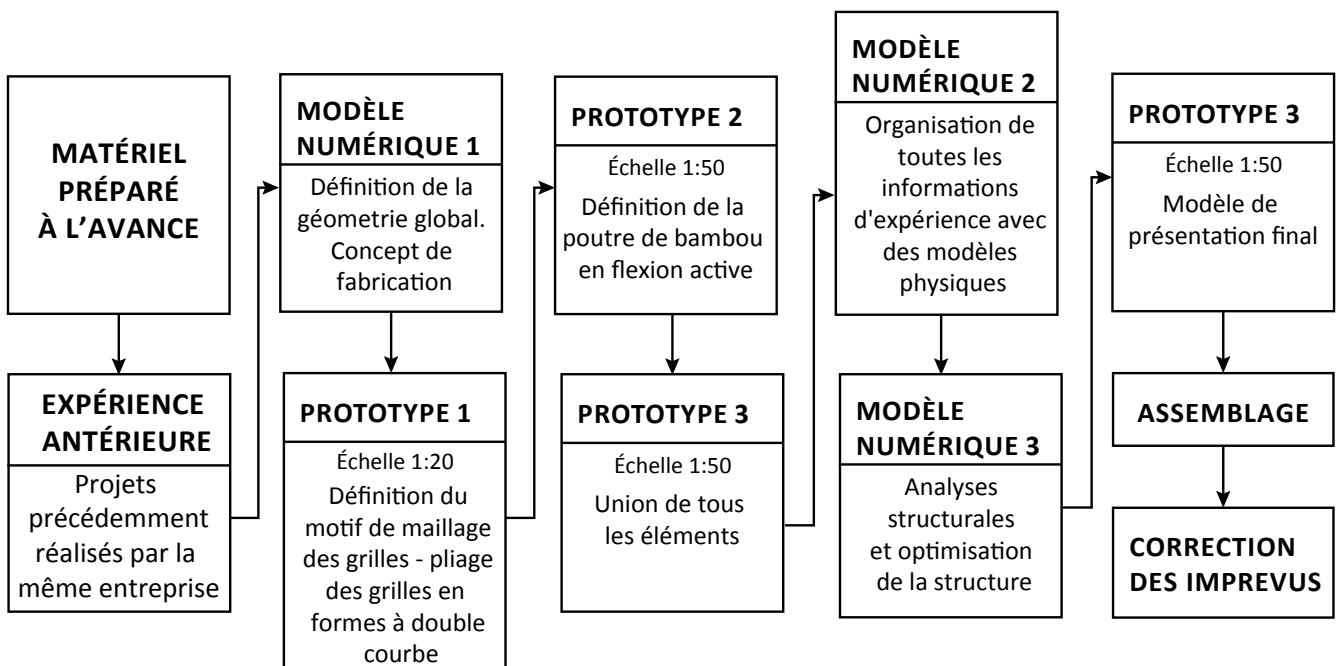


Figure 31. Flux de travail pour l'amphithéâtre hybride, Brésil  
Source: *Elaboration propre*

### 3.3. LE COOCON PROJET

L'idée du projet a été développée par le studio CONTEXT de l'école d'architecture d'Aarhus au Danemark. Son idée était de développer de nouvelles idées de design combinant la connaissance de la Corée du Sud et du Danemark en coopération avec une communauté locale en Inde. Le centre de recherche et d'enseignement «Krishi Vigyan Kendra» et le guide de l'école d'architecture CARE ont décidé de l'emplacement final du projet. Ce nouvel espace serait un lieu alternatif pour l'éducation des étudiants, où pourraient se dérouler des cours, des expositions et des discussions, avec une approche moins formelle qu'une salle de classe normale. Le projet Cocoon a une superficie de 9 x 17 m<sup>2</sup> et est construit par une série de trois socles qui forment la base de la construction.

Le projet est une construction légère en bambou tressé, d'une hauteur maximale de 3,8 m. Il s'élève de la base dans un cadre de forme organique de bandes de bambou jointes par des bras de support en acier, permettant une ventilation à travers le centre du bâtiment. La construction a une colonne centrale tissée en bambou avec un trou au milieu, qui permet à l'air et à la lumière de pénétrer à travers le toit.

Cette construction devait être réalisée à la main par des artisans locaux, des étudiants et des enseignants qui travaillaient en collaboration avec des architectes et des designers. Le bambou, matériau local, a été associé à de nouvelles connaissances en construction pour produire un bâtiment durable et esthétique.



Figure 32. COCOON Projet  
Source: L. H. Hansen et S. Kim

### 3.3.1. DÉFINITION DE LA GÉOMÉTRIE

Le processus de conception de ce projet a débuté par la définition de la forme, qui a été conçue grâce à l'utilisation de programmes informatiques comme outil de contrôle des formes courbes et des éléments de construction. L'utilisation de programmes informatiques a offert la liberté de générer des formes à double courbe en jonction avec d'autres plus conventionnelles.

Le programme Rhino a été utilisé en combinaison avec le module complémentaire T-splines, ce qui a permis de prendre des décisions de changement de forme plus rapidement. La stratégie adoptée était de générer une forme de beignet (doghnut), qui a été coupé et déformé pour s'adapter à son contexte.

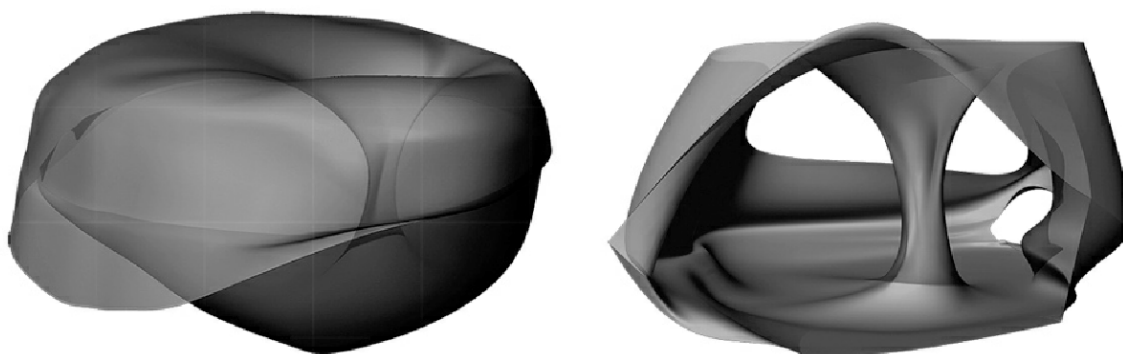


Figure 33. Premiers dessins informatiques de Rhino sur la base de la forme du «beignet» ('doghnut')  
Source: L. H. Hansen et S. Kim

### 3.3.2. DÉVELOPPEMENT DE LA CONCEPTION

Le support principal de la structure est une colonne tissée en bambou. Au sommet de cette colonne, les membres se ramifient comme un parapluie et se croisent selon un motif de tissage à trois voies pour former une structure de coque de grille réticulaire.

Le travail des étudiants et des locaux dans un premier atelier commun a permis d'étudier différents aspects de la construction principale. Un premier prototype à l'échelle 1:10 (Fig. 34), a donné la première approche de la forme générée précédemment par Rhino. Le tissu croisé de la membrane externe a, quant à lui, été fabriqué séparément.



Figure 34. Première approche physique de la forme  
Source: L. H. Hansen et S. Kim

Un modèle physique à l'échelle 1: 1 a été créé pour estimer la stabilité structurelle et la réaction des poteaux de bambou soumis à la flexion active à l'échelle réelle. Grâce à ce prototype, plusieurs erreurs produites par le mode d'assemblage ont été résolues. Un anneau de compression a été ajouté pour stabiliser la structure et l'ancrer à la base à intervalles appropriés.



Figure 35. Première approche physique de la forme  
Source: L. H. Hansen et S. Kim

Pour permettre le contrôle de la conception, de la quantité et du coût de la construction, on l'a intégrée dans le programme Revit pour obtenir une première estimation des conséquences des décisions relative à l'élaboration du projet. Grâce à ce programme, il a été calculé que la longueur totale de la construction en bambou serait d'environ 6,30 m. Le poids des différentes solutions de toiture a également été calculé, où il a été conclu que la solution la plus appropriée et la plus légère était les tuiles d'écorce de palmier.

### 3.3.3. CONSTRUCTION

Pour la construction de ce projet en bambou, aucune section ni élévation n'a été dessinée, mais des points spatiaux 3D ont été utilisés dans une grille de coordonnées. Celles-ci ont été déterminantes pour définir la position des poteaux en bambou. Ce système de coordonnées a permis d'avoir des hauteurs prédéfinies qui ont rendu le processus de construction et d'assemblage plus facile et plus efficace. Des ajustements dans la construction ont été effectués en permanence, le projet a donc dû s'adapter au matériau. De plus, des décisions «in situ» ont été prises pour apporter des modifications afin d'optimiser la qualité de l'expérience spatiale du projet.



Figure 36. Construction du poteaux central et Anneau tissé pour la base  
Source: L. H. Hansen et S. Kim

### 3.3.4. FLUX DE TRAVAIL DU COCOON

Le flux de travail de ce projet commence par la génération de la forme géométrique via le programme Rhino. Les étudiants ont produit un prototype à l'échelle 1:10 comme première approximation avec le matériau, ce qui a aidé à comprendre les implications de la conception en bambou. À partir de là, une approche numérique basée sur la génération d'informations pour l'estimation des conséquences de la conception a été créée dans Revit. Cela a généré les informations nécessaires pour trouver la longueur finale des poteaux de bambou et comment ils devraient s'adapter à la géométrie requise. Parallèlement à cela, plusieurs investigations sur site ont été menées dans le but de comprendre le comportement du bambou en réaction aux forces qui s'exerceraient.

Enfin, un modèle 1: 1 a été créé pour comprendre la stabilité structurelle et la réaction des poteaux immergés à une flexion active à grande échelle. Pendant la construction, différents ajustements ont été effectués par des artisans locaux pour corriger des erreurs qui n'étaient pas visibles au moment de la conception.

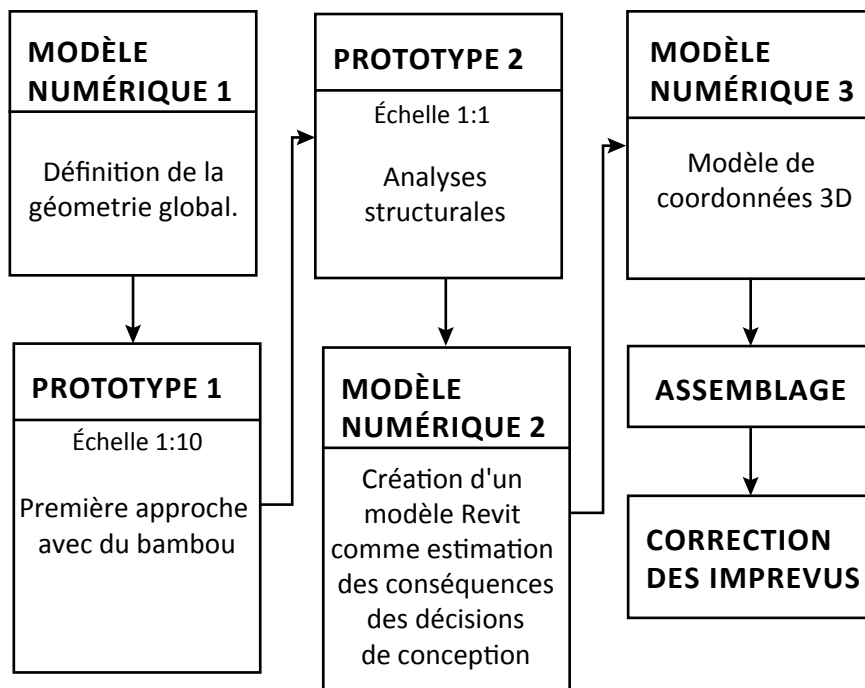


Figure 37. Flux de travail pour le projet Cocoon  
Source: *Elaboration propre*

## 4. METHODES DE CONCEPTION AVEC UNE STRUCTURE ACTIVE EN BAMBOU

“Les approches contemporaines de la conception architecturale ont abandonné le déterminisme des pratiques de conception traditionnelles pour adopter l’indétermination dirigée et précise des nouveaux processus de conception numérique” (Kolarevic, Branko, :2003)<sup>14</sup>. Le concepteur construit un système générateur de production formel, contrôle son comportement dans le temps et sélectionne les formulaires qui en résultent.

Conventionnellement, la conception d’un bâtiment est considérée comme la conséquence du processus de fabrication du matériau de construction (Adrita & Widjowijatnoko, 2016)<sup>15</sup>. Étant donné que le coût de la plupart des matériaux de construction baisse à mesure que leur quantité augmente et que ceux-ci sont produits en série, on a tendance à utiliser des composants de construction standard, ce qui crée des limites en termes de géométrie (Dunn, 2012)<sup>16</sup>. La simplicité de ce système et sa standardisation facilitent la construction, l’assemblage, l’imagination et la gestion. Ce processus a également une influence sur le flux des travaux de construction (Figure 38), où le système structurel est limité par le composant et le matériau disponibles, ce qui limite également la géométrie.

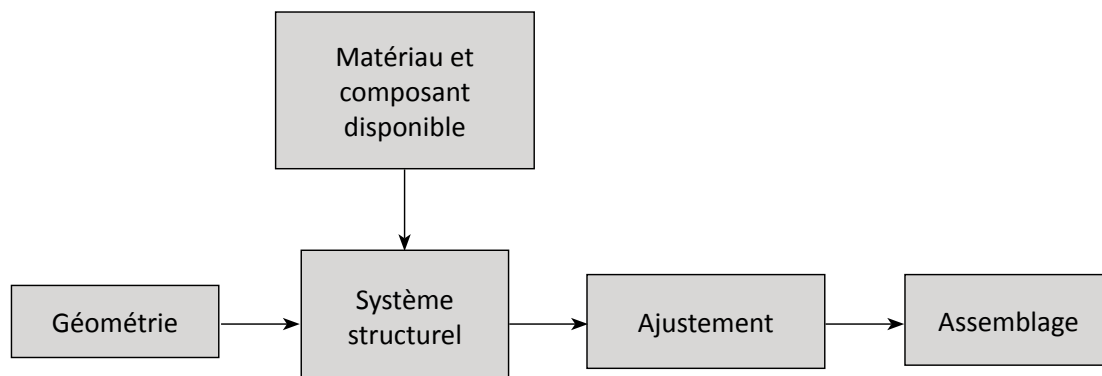


Figure 38. Flux de travail conventionnel.

Source: Adrita & Widjowijatnoko, 2016, *Combination of mass customisation and conventional constructions*

Les nouvelles approches de conception ouvrent un univers formellement et essentiellement curviligne dans lequel la complexité de la forme est recherchée intentionnellement, donnant lieu à de nouvelles possibilités, à savoir la forme émergente. “Les systèmes non linéaires changent de manière indéterminée, produisant continuellement des résultats nouveaux et inattendus”(Kolarevic, Branko, :2003).

14. Kolarevic, : 2003, *Architecture in the digital age - Design and manufacturing*, Spon Press, New York.

15. Adrita & Widjowijatnoko, 2016, *Combination of mass customisation and conventional constructions*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.

16. Dunn, N.: 2012, *Digital Fabrication in Architecture*, Laurence King-London.

Ces processus génératifs numériques permettent une exploration conceptuelle, formelle et tectonique qui articule les propriétés du matériau et l'adapte à la forme. Ce sont précisément les surfaces continues et très curvilignes, qui occupent une place prépondérante dans l'architecture contemporaine, qui soulèvent la question de savoir comment résoudre les ramifications spatiales et tectoniques de formes aussi complexes.

C'est précisément la capacité de «Form-finding», un concept proposé par Frei Otto, qui permet d'utiliser les processus de recherche des formes à travers des modèles physiques et numériques qui interagissent directement avec le matériau, découvrant ainsi les limites attachées aux propriétés physiques des objets avec la forme recherchée, une stratégie qui permet de réduire l'écart entre la forme créée et la construction même du bâtiment. (Willis & Woodward, 2010)<sup>17</sup>.

Le bambou s'est avéré attirer l'attention des architectes grâce à ses propriétés qui lui permettent de fonctionner comme une structure active en flexion et à sa capacité à s'adapter géométriquement pour créer des structures légères. Il est établi que les architectes et les concepteurs doivent être dotés des connaissances nécessaires et de la capacité de construire des outils pour l'élaboration et la réalisation d'espaces architecturaux innovants et d'expériences spatiales. (Erdine et Kallegias, 2014)<sup>18</sup>. Les progrès des processus de calcul et des techniques de fabrication numérique permettent aux architectes d'améliorer les processus de prise de décision tout au long du processus de conception, de fabrication et d'assemblage.

En ce qui concerne le bambou, cela consiste à quantifier les formes et à en déduire un comportement adaptable, constructif et rentable. L'utilisation du bambou en tant que matériau de construction dépend des conditions mentionnées dans les chapitres précédents, telles que la sélection des espèces de bambou, la méthode de plantation, de récolte et de conservation, ainsi que l'étude des aspects techniques de la méthode de construction. (Mardjono, 2002)<sup>19</sup>. Un architecte qui conçoit un bâtiment en bambou dans un lieu donné, est obligé d'utiliser des plantes locales, il a besoin d'informations sur les caractéristiques et les propriétés mécaniques des essences disponibles.

---

17. Willis, D., & Woodward, T. (2010). Diminishing difficulty: Mass customization and the digital production of architecture. In R. Corser (Ed.), *Fabricating architecture, selected readings in digital design and manufacturing* (pp. 178–213). New York: Princeton Architectural Press.

18. Elif Erdine et Alexandros Kallegias, 2014, *Modelling Natural Formations: Design and Fabrication of Complex Concrete Structures*, Architectural Association (AA), School of Architecture, London, United Kingdom.

19. Fitri Mardjono, (2002) *A Bamboo Building Design Decision Support Tool*, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

## 4.1 FLUX DE TRAVAIL POUR LES STRUCTURES ACTIVES EN BAMBOU

Avant de commencer à concevoir des structures actives en bambou, il convient de prendre en compte différents éléments qui intéressent la conception :

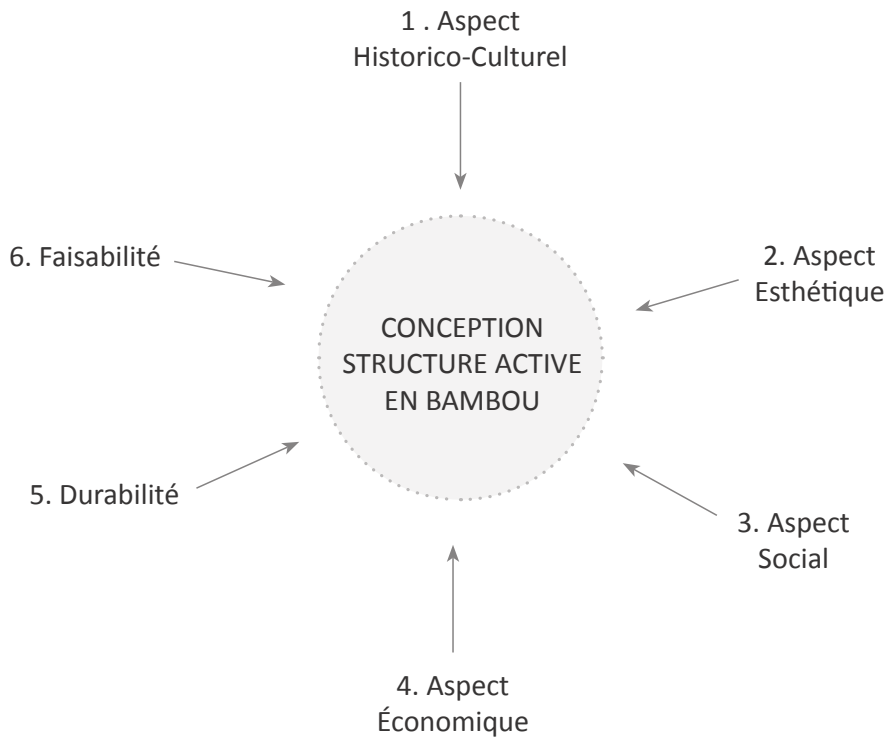


Figure 39. Aspects pour la conception dans une structure active en bambou  
Source: *Elaboration propre*

**1. Aspect historico-culturel.** Dans de nombreux pays, les constructions en bambou sont traditionnellement construites, selon les cultures locales, sans activités de conception explicites. Ces méthodes traditionnelles peuvent être étudiées et développées pour améliorer la qualité et les performances des bâtiments en bambou. Les connaissances résultant de la conception traditionnelle des bâtiments en bambou peuvent être appliquées dans une vision plus moderne basée sur les connaissances déjà acquises. Cela sera utile pour innover dans la réalisation de bâtiments en bambou, leur structure et leurs méthodes de construction.

**2. Aspect esthétique.** Le style de tous les aspects du bâtiment en bambou, y compris la combinaison du bambou avec d'autres matériaux, doit être adapté à l'environnement naturel local pour obtenir un design esthétiquement équilibré.

**3. Aspect social.** Les solutions de conception réalisables dépendent non seulement du concepteur, mais également des personnes qui préparent le matériau en bambou et des ouvriers du bâtiment.

**4. Aspect économique.** Le coût de la construction en bambou dépend du choix des matériaux de construction, de la technologie de construction, de la méthode de construction et de la méthode de maintenance, qui conditionnent la durabilité.

**5. Durabilité.** Le concepteur doit prendre en compte le cycle de vie souhaité de la construction en bambou pour déterminer les propriétés matérielles requises. La durabilité du bâtiment en bambou dépend de la stabilité, de la sécurité, de la rigidité et de la durée de vie utile de la construction et des matériaux du bâtiment, ainsi que des possibilités d'entretien, de réparation, etc. La durabilité du bâtiment en bambou fait également référence à la préservation des conditions requises ou souhaitées, comme le climat intérieur.

**6. Faisabilité.** Le savoir-faire artisanal, les compétences, les outils et l'équipement des travailleurs de la construction disponibles, ainsi que les spécificités du matériau de bambou, le type de connexion et le temps requis pour la construction, influent tous sur la capacité de fabrication et la qualité finale du bâtiment en bambou. Le concepteur doit non seulement produire un projet détaillé, mais également un plan de construction précis ou un plan de travail adapté aux caractéristiques des travailleurs de la construction. (Mardjono, 2002).

C'est pour cela que le flux de travail dans la conception de bâtiments en bambou à la forme active (Figure 2) diffère de celui du modèle de construction classique. Alors que dans le flux de travail conventionnel, le concepteur prend en compte les composants structurels existants et assemble un système combiné d'éléments de tension et de compression pour développer une structure avec une flexion minimale (Crolla & Fingrut, 2015)<sup>20</sup>. Dans la conception en bambou avec une forme active, le flux de travail utilise une approche de conception et de construction basée sur un laboratoire, pour tirer parti des propriétés du matériau en flexion, souvent avec une forme géométrique complexe (Crolla & Fingrut, 2015)<sup>21</sup>. À partir de la géométrie préliminaire, le concepteur s'intéresse à tous les aspects liés au bambou.

En ce sens, les rôles d'architectes, d'ingénieurs, de consultants et d'entrepreneurs permettent une configuration générale dans laquelle les commentaires de toutes les parties sont encore possibles tout au long du processus de construction. Pour que l'édifice final soit réalisable dans les limites du site, il faut recourir à des protocoles autorisant des déviations par rapport au plan initial, celles-ci pouvant découler d'imprécisions sur le site, d'un comportement imprévisible du matériau ou d'erreurs qui pourront être traitées et incluses dans la conception.

---

20. Kristof Crolla, Adam Fingrut, "Building Indeterminacy Modelling – Computational Design And Low-Tech Construction Of A Hong Kong Bamboo Grid-Shell", ICCCB 2016 conference proceedings, 389-397

21. Kristof Crolla, Adam Fingrut, "Protocol of Error: The design and construction of a bending-active gridshell from natural bamboo", CAADRIA 2016 conference proceedings, 415-424

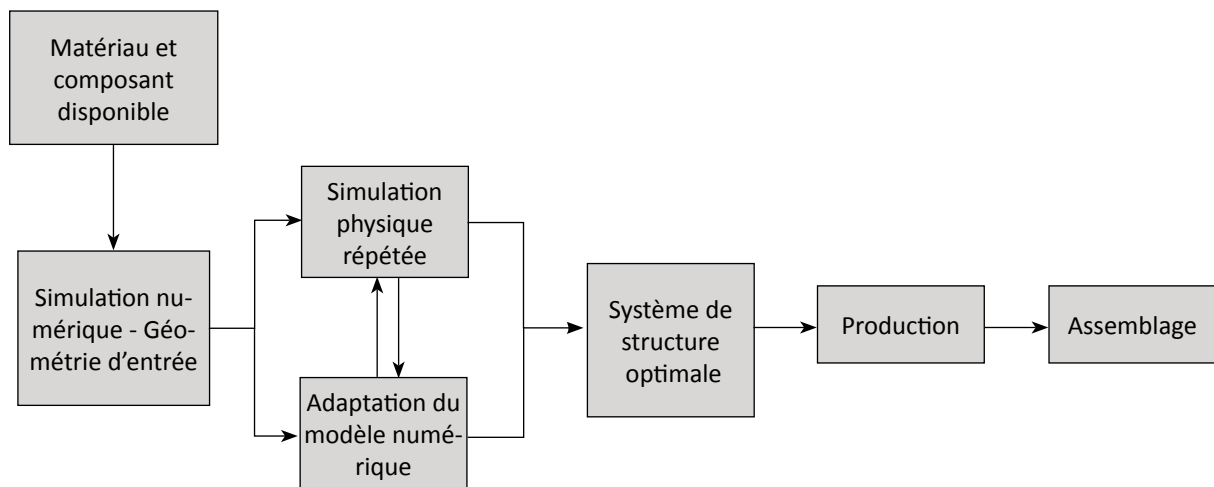


Figure 39. Flux de travail pour les structures flexibles actives  
 Source: *Elaboration propre.*

Le flux de travail de ce type de structures en bambou pourrait se résumer à la réalisation de simulations numériques à partir desquelles une géométrie de conception initiale est développée, créant ainsi un plan d'assemblage idéal déployable sur le terrain et des prototypes de modèles physiques à diverses échelles pour insérer de nouvelles informations dans le modèle numérique à des fins de recalcul et d'analyse.

Ce dialogue entre la simulation numérique et la mise en œuvre de modèles à l'échelle doit en principe se poursuivre tout au long du processus de construction et d'assemblage, car des éléments imprévisibles surgissent continuellement et nécessitent des modifications du système de conception.

## 4.2 FORM-FINDING ET SIMULATION

Le Form-finding est généralement compris comme le processus d'élaboration de la forme géométrique d'une structure basée sur le comportement mécanique. Contrairement à un processus de conception courant, la recherche de forme permet de conduire des conditions physiques vers une solution unique. D'un point de vue strictement mécanique, "il peut être défini comme un processus d'optimisation, dans lequel une cible est fournie dans le champ de contraintes et la forme géométrique correspondante est recherchée" (Lienhard 2014) <sup>22</sup>.

Au-delà de la définition, le Form-finding dans les structures actives en flexion, spécifiquement appliqué à des matériaux tels que le bambou, implique l'ajustement des variables qui incluent

22. Julian Lienhard (2014), *Bending-Active Structures*, Stuttgart: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen.

l'établissement de la longueur des perches, les propriétés mécaniques des éléments actifs en flexion, le comportement du matériau et ses restrictions propres.

Le fait d'intégrer un grand nombre de variables dans un processus de Form-finding de structures actives, ouvre un espace pour exercer différentes influences architecturales mais en contrepartie induit un processus de conception plus complexe. Pour atteindre la richesse esthétique que permet cette technique malgré toutes les contraintes, une simulation informatique en elle-même n'offre pas les outils nécessaires pour le développement de structures actives en flexion utilisant le bambou. La combinaison et l'intégration de diverses techniques de modélisation dans ce processus de conception sont nécessaires pour réussir à développer ces structures complexes. Il s'agit notamment de modèles physiques basés sur le comportement réel du bambou couplés à des modèles numériques, lesquels se répondent l'un à l'autre.

En résumé, la recherche de la forme des structures en bambou peut se concentrer sur 3 techniques de modélisation basées sur le comportement, la géométrie et l'union de ces derniers.

1. Une approche comportementale : la flexion est d'abord recherchée de manière intuitive, la géométrie et le comportement structurel du bambou sont étudiés empiriquement. Les limitations matérielles sont testées physiquement.
2. Une approche basée sur la géométrie : la géométrie du système est prédéfinie sur la base des méthodes expérimentales de recherche de forme, qui sont utilisées comme moyen contrôlé pour rapprocher la géométrie de la flexion réelle. Les limites des poteaux en bambou sont considérées analytiquement en termes de courbure.
3. Une approche intégrale : la déformation par flexion est analysée au moyen de la recherche numérique des formes, ce qui permet un contrôle total de la géométrie plus une analyse du comportement du matériau. Les caractéristiques et les limites du bambou sont incluses dans le modèle d'analyse numérique.

## **4.3 DÉVELOPPEMENT DE LA FORME**

### **4.3.1. MODÈLES PHYSIQUES**

Le modèle physique comme moyen d'analyse des structures en bambou est un outil essentiel pour la recherche de formes dès les premières étapes de la conception. Le résultat de cette expérimentation "sert à fournir des données topologiques dans lesquelles des comportements géométriques et mécaniques plus précis peuvent être explorés" (Lienhard 2014).

Une rétroaction instantanée du comportement mécanique est possible avec la construction de ces modèles physiques et est indispensable pour trouver des moyens d'arrêter les forces auxquelles les poteaux en bambou sont soumis, comme nous avons pu le voir dans le projet

amphiteatro au Brésil, où les prototypes réalisés se sont révélés déterminants pour aboutir la solution permettant de maintenir la courbe souhaitée dans les arcs en flexion active du bambou.

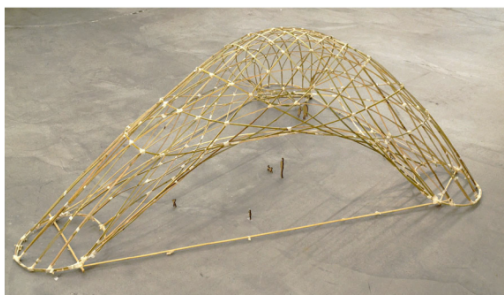
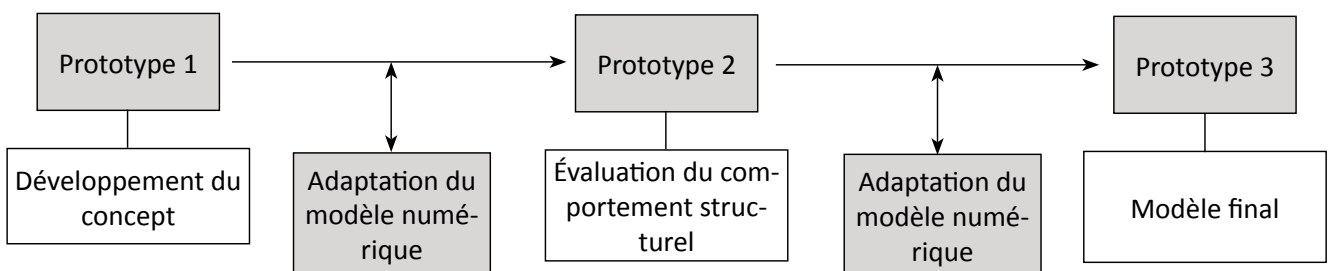
La recherche physique de formes dès les premières esquisses permet le développement de géométries complexes utilisant une combinaison d'éléments actifs.

#### 4.3.2. DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES

Dans les projets présentés plus haut dans les études de cas, le travail avec des modèles physiques joue un rôle clé dans la phase de conception. Dans le cas du ZCB Bamboo Pavilion, les modèles physiques sont devenus la base d'une exploration plus large de la conception.

Les modèles physiques permettent un changement instantané et intuitif des variables d'entrée du comportement du bambou, et ainsi obtenir un meilleur résultat dans le processus de Form-finding. Sur un mode expérimental, de petites unités sont réalisées en se concentrant sur différentes parties du projet ou possibilités géométriques pour être ensuite intégrées à des systèmes structurels de plus grandes envergure.

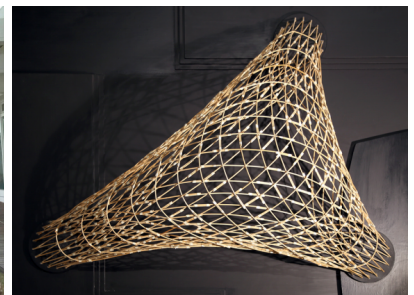
En fonction des forces identifiées à partir de là on ajuste les modèles au fur et à mesure par rétroaction afin d'arriver à une structure idéale. Cette synchronisation entre les modèles entraîne une indétermination dans le processus de conception, mais permet de vérifier les capacités mécaniques du matériau en réaction aux forces exercées. Comme le décrit Julian Lienhard : " le processus, souvent peu intuitif en raison de la complexité des relations forme-force, permet d'explorer une grande diversité de formes qui ne sont pas limitées par un catalogue de délimiteurs de type."



Prototype 1: échelle 1:20



Prototype 2: échelle 1:4



Prototype 3: échelle 1:20

Figure 40. Développement des différents prototypes et exemples de ceux-ci  
 Source: Schéma, élaboration propre; Photos, Kristof Criolla

### 4.3.3. MISE À L'ÉCHELLE DU COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX

Le fait que la géométrie des éléments dépend du comportement du matériau et de l'échelle est fondamental pour l'exploration de la flexion des structures actives du bambou. Par conséquent, des expériences de recherche de formes physiques comparatives peuvent initialement être réalisées à différentes échelles. Cependant, la rigidité, l'élasticité et le point de rupture du bambou sont souvent surestimés par les modèles à petite échelle lorsque d'autres essences que le bambou sont utilisées ou simplement à cause de l'épaisseur des bâtonnets qui ne permet pas de reproduire parfaitement les contraintes auxquelles seront soumises les perches à l'échelle 1:1. En résulte souvent une simulation inexacte des déformations du matériau et des interactions entre les sections de bambou. Ces conditions dépendantes de l'échelle doivent être soigneusement étudiées par des moyens numériques, accentuant d'autant la découverte physique de la forme.

La tension et la résistance du Bambou dépendant du rayon de la courbe, de la longueur des perches et de l'épaisseur variable des sections transversales, nous sommes limités dans le dimensionnement des éléments structuraux. Cette limitation signifie que la taille d'une section ne peut pas être librement définie en fonction des exigences de résistance et de rigidité sous des charges externes. Par conséquent, des problèmes peuvent survenir lors du changement de l'échelle des éléments de bambou.

Dans l'ingénierie structurelle classique, trois gammes d'échelle peuvent être considérées : « le modèle structurel physique, une structure à échelle réduite et une structure à grande échelle, dans laquelle l'analyse dimensionnelle et les lois d'échelle dérivées aident à calibrer les proportions des résultats des essais entre différentes échelles ». (Harris et Sabnis, 1999)<sup>23</sup>.

Dans certains cas comme celui du ZBC Bamboo Pavilion, l'utilisation de différentes échelles a permis l'analyse de tous les éléments dans des proportions différentes afin de sélectionner toutes les informations nécessaires pour obtenir les meilleurs résultats dans le développement du projet. Dans le processus de mise à l'échelle de la structure, il a fallu résoudre les problèmes de déformation et de stabilité, d'une part, et de charge et de propriétés mécaniques, d'autre part.

Certains des effets qui ont pu être observés lors de la mise à l'échelle des structures analysées dans les études de cas:

- L'effet de dimension: la masse cubique augmente avec l'échelle.
- Effet de la charge: L'augmentation de la surface entraîne une augmentation de la charge de surface.
- Effet de la taille du matériau: la probabilité de défauts du bambou augmente avec la taille.

---

23. Harris, H.G. et Sabnis, G.M. (1999) Structural modelling and experimental techniques. New York : CRC Press.

#### 4.3.4. INTÉGRATION DES DONNÉES DANS LE MODÈLE NUMÉRIQUE

En prenant comme exemple principal le pavillon ZBC, nous pouvons conclure que la géométrie d'entrée pour l'analyse des éléments définis par les modèles physiques peut être droite ou plate si l'on souhaite simuler correctement la forme ou les contraintes de flexion résiduelle. Les données d'entrée pour ces simulations de calcul étant approximatives, elles doivent être basées sur un système physiquement viable.

La forme d'un poteau en bambou plié élastiquement peut être facilement découverte à l'aide de modèles physiques. De la même manière, la modélisation numérique nous permet de trouver ces formes simulant le comportement structurel du matériau.

Plusieurs programmes tels que Rhinoceros et Grasshopper ainsi que le plugin Kangaroo permettent une intégration constante des informations et une simulation qui répondent aux forces appliquées suivant les lois de la physique en fonctions du paramétrage du programme. La courbure naturelle du bambou peut être simulée dans ce contexte grâce à l'utilisation de points auxquels des forces spécifiques sont appliquées et où une force de flexion entre chaque segment peut être imitée afin de reproduire le comportement du bambou.

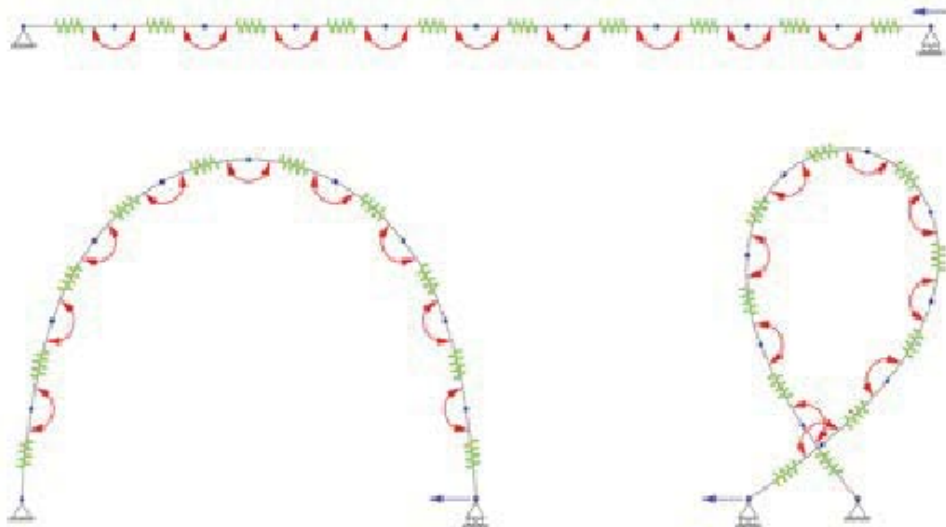


Figure 40. Simulation d'une courbe élastiquement courbée  
Source: Kristof Criolla

Le développement de la géométrie d'un modèle physique facilite grandement la numérisation de la géométrie et la disposition topologique des éléments à plat. Par conséquent, les données d'entrée peuvent être générées pour simuler par calcul le processus d'érection afin de trouver avec précision la structure de flexion active. Les modèles numériques sont utilisés de manière stratégique pour programmer les informations de construction, simuler les comportements et orchestrer les ressources.

## 4.4 CONSTRUCTION ET ASSEMBLAGE

La création d'un modèle numérique flexible permet la mise à jour progressive des variables supposées liées aux propriétés physiques du bambou, aux techniques de construction, à la conception détaillée et à la structure. À mesure que les données deviennent plus précises tout au long du processus de conception et de prototypage, la nature imprévisible du bambou nécessite la mise en œuvre d'instructions de construction.

La géométrie générale étant définie numériquement, les étapes suivantes impliquent de développer ce modèle à un point où les informations nécessaires à la construction manuelle peuvent être extraites. Ces informations doivent intégrer le fait que la construction sur le site utiliserait des poteaux en bambou de différents diamètres, longueurs, flexibilité et assemblés à la main avec différents matériaux. Les instructions de construction doivent être suffisamment claires pour minimiser toute mauvaise interprétation des données, de la technique d'assemblage ou de l'ordre des opérations. Ce processus de construction nécessite alors un ajustement manuel sur site qui permet d'intégrer ces variables si elles n'étaient pas préalablement fournies.

Comme on peut le constater dans le ZCB Bamboo Pavilion et le projet COCOON, un système de documentation de montage à travers des points ou des marques a été mis en place sur le terrain et a permis d'avoir une direction pour l'assemblage. Cela, associé au savoir-faire des ouvriers, a permis une construction ordonnée et une communication plus facile entre les personnes impliquées dans la réalisation du projet.

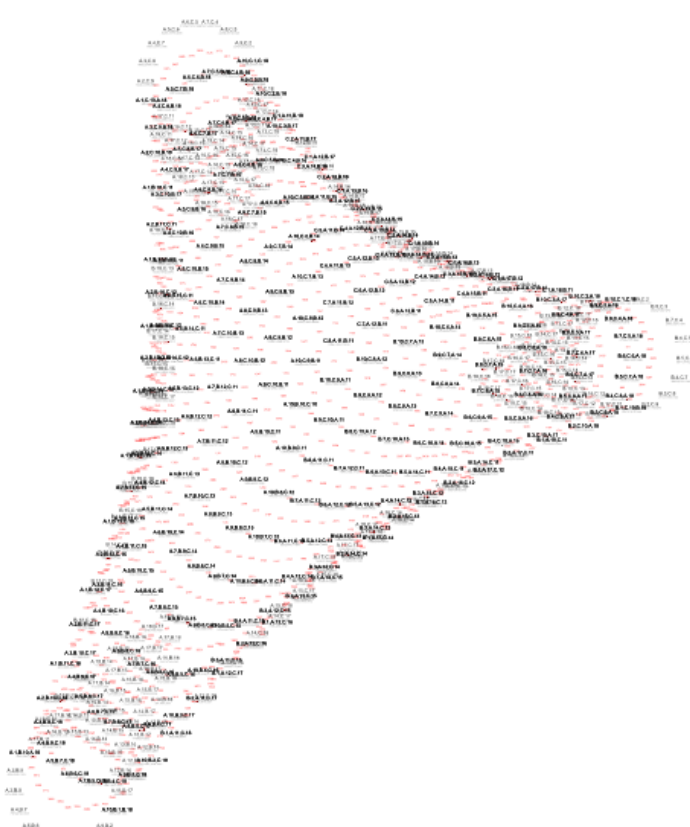


Figure 41. (Gauche) Coordonnées du point d'intersection des pôles, (Droit) Étiquettes autocollantes avec les informations de connexion

Source: Kristof Criolla





## CONCLUSION

Nous l'avons vu, le bambou est un matériau aux qualités multiples : à la fois souple, résistant et hautement renouvelable, il semble offrir une alternative à certaines constructions en dur et est très adapté aux structures temporaires sans sacrifier pour autant l'esthétique. Le bambou apparaît ainsi comme un matériau adressant plusieurs thématique moderne : le désir, si ce n'est la nécessité d'une production plus durable des matériaux de construction et d'une architecture à empreinte carbone réduite, ses propriétés physiques qui permettent à un concepteur ambitieux d'inventer des formes spectaculaires et riches dans un cadre de travail plus horizontal entre architectes, ingénieurs et main d'œuvre et le savoir-faire ancré culturellement qui assure le succès de telles entreprises.

Certes le bambou semble sous exploité au regard de ses qualités, mais la principale innovation qu'entraîne son utilisation est celle qui concerne le flux de travail. L'aller retour permanent entre les modèles physiques et numérique d'une part puis entre le chantier et les prototypes d'autre part créent une architecture évolutive, capable de s'adapter aux imprévus et de corriger aisément d'éventuelles erreurs.

En s'appuyant sur le concept de Form-finding développé par Frei Otto il est possible de concevoir des formes que prendra de lui-même le matériaux en réaction aux forces qu'on lui applique. En ce sens, il s'agit d'une architecture par essence organique dont la définition ne s'arrête pas à des considérations purement esthétiques. La maquette devient prototype car elle sert autant à développer et présenter l'aspect du bâtiment qu'à prévoir le comportement du matériau sur le terrain.

Les moyens informatiques développés spécifiquement pour les structures à forme active approfondissent encore la méthode de recherche de forme car ils permettent d'intégrer de façon plus exacte les paramètres qui conditionnent la réalisation. La modification d'un seul d'entre eux sera répercutée automatiquement sur l'ensemble des éléments du projet, ce qui offre la possibilité de recalibrer les modèles physiques et de mieux planifier la construction.

Cette méthode peut être apparentée à la méthode expérimentale en ce que le bâtiment se forme par essais successifs à différentes échelles afin de réduire la variabilité inhérente au matériau brut. Malgré les efforts pour réduire et intégrer cette variabilité aux simulations numérique, il faudrait appliquer un tel nombre de données que cela nuirait à l'efficacité des projets en rendant systématiquement obsolètes les précédents modèles. Il est donc préférable de s'en tenir à un nombre de variables raisonnable mais réaliste et d'approfondir la communication entre les acteurs du projet.

Cette adéquation entre les savoir-faire et le complexe procédé de réalisation engendrent une architecture à la fois écologique, technologique et belle car elle lie intimement et avec légèreté la forme d'un bâtiment à un matériau par le prisme de la maîtrise technique.



## BIBLIOGRAPHIE

ADRITA & Widyowijatnoko, (2016), Combination of mass customisation and conventional constructions, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.

ANDALUCIA, F. d. (2011). Tipos de esfuerzo físico, Revista digital para profesionales de la enseñanza, Andalucía.

CROLLA Kristof (2017) , Building indeterminacy modelling – the ‘ZCB Bamboo Pavilion’ as a case study on nonstandard construction from natural materials, Crolla Visualization in Engineering.

CROLLA Kristof, Adam Fingrut, (2016) “Protocol of Error: The design and construction of a bending-active gridshell from natural bamboo”, CAADRIA 2016 conference proceedings, 415-424

DUNKELBERG, K. (1985). IL31 Bamboo. Bambus als Baustoff. Bauen mit pflanzlichen Stäben. tuttgart: Institute for Lightweight Structures, University of Stuttgart

DUNN, N (2012), Digital Fabrication in Architecture, Laurence King-London.

ENGGAR, W. (2014) Comparison de l’utilisation du bambou dans le structure “Form-Active” et “Semi-Active”, a l’arc, construction de largeur, Institut de recherche et de service communautaire, Université catholique de Parahyangan.

ERDINE Elif et Alexandros Kallegias, :2014, Modelling Natural Formations: Design and Fabrication of Complex Concrete Structures, Architectural Association (AA), School of Architecture, London, United Kingdom.

HARRIS, H.G. et Sabnis, G.M. (1999) Structural modelling and experimental techniques. New York : CRC Press.

HIDALGO-LOPEZ, O (1978), Manual de construcción con bambú, Estudios Técnicos Colombianos Ltda, Bogotá.

JANSSEN J. J. A. (1980). Bamboo in building structures Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven DOI:

KNIPPERS Jan & Cremers, Jan & Gabler, Markus & Lienhard, Julian. (2011). Construction Manual for Polymers + Membranes. Institut für internationale Architektur-Dokumentation, GmbH & Co. KG, Munich.

KOLAREVIC, (2003), Architecture in the digital age - Design and manufacturing, Spon Press, New York.

LIEHARD Julian (2014), *Bending-Active Structures*, Stuttgart: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen.

LIESE, W. (1995). *Anatomy and utilization of Bamboos*. *Eur. Bamboo Soc. J.*: 4-12

MACDONLAD, A. (1994). *Structure and architecture*, Department of Architecture, University of Edinburgh

MARDJONO Fitri (2002), *A Bamboo Building Design Decision Support Tool*, Eindhoven University of Technology, The Netherlands

MARTINEZ Samuel, (2015), *Bambú como material estructural: generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo*, Tesis, Universidad politécnica de Valencia.

MAURINA Anastasia (2015), *Curved Bamboo Structural Element*, Department of Architecture, Parahyangan Catholic University .

ROCKWOOD David (2015), *Bamboo gridshells*, Abingdon, Oxon, Routledge.

SOUZA Eduardo (2017), *Por qué las maquetas son fundamentales para hacer realidad los proyectos en Bambú*, Archidaily Article, 2017

WENDLAND David (2008), *Model-based formfinding processes: Free forms in structural and architectural design*.

WILLIS D., & Woodward, T. (2010). *Diminishing difficulty: Mass customization and the digital production of architecture*. In R. Corser (Ed.), *Fabricating architecture, selected readings in digital design and manufacturing* (pp. 178–213). New York: Princeton Architectural Press.

## **ARTICLES ET JOURNAUX EN LIGNE**

VELEZ Simón, *La maîtrise du bambou, Un exposition à Rossinière du 30 juin au 22 septembre 2013*. Dossier de presse.

<https://docplayer.fr/14579664-Simon-velez-la-maitrise-du-bambou-bamboo-press-kit.html>

Le courrier de l'architecte(2014), *Interview avec l'architecte Simón Vélez: «L'architecture doit être un peu plus végétarienne»*, Siente América.

[http://www.lecourrierdelarchitecte.com/article\\_5480](http://www.lecourrierdelarchitecte.com/article_5480)

*Rethinking the future* (2017), *Cocoon | Manasaram Architects, THE COCOON – Farmer's Pavilion, Socially Responsible Architecture*.

<https://www.re-thinkingthefuture.com/rtfa2017-hospitality-built/17666/>

## VIDEOS ET FILMS DOCUMENTAIRES

CityTv (2015), Días de gloria Simón Vélez, [Video]. Consulté sur: <https://www.youtube.com/watch?v=qNdqU2QLnD0>

TED Globla (2010), Jhon Hardy, My green school dream. [Video]. Consulté sur: [https://www.ted.com/talks/john\\_hardy\\_my\\_green\\_school\\_dream/transcript](https://www.ted.com/talks/john_hardy_my_green_school_dream/transcript)

TED (2015), Elora Hardy, Magical houses made of bamboo. [Video]. Consulté sur: [https://www.ted.com/talks/elora\\_hardy\\_magical\\_houses\\_made\\_of\\_bamboo](https://www.ted.com/talks/elora_hardy_magical_houses_made_of_bamboo)



Les bâtiments en bambou sont comme un organisme vivant, chaque poteau en bambou représente «l'ADN» du bâtiment, chacun unique comme de vrais brins d'ADN. Les brins de l'ADN du bambou forment une structure en réseau, où chaque poteau a sa propre fonction spécifique, que ce soit dans les murs, les plafonds, les escaliers ou le toit. Quand ils se réunissent, pour former un corps, il attend d'être donné une âme par ceux qui habitent le bâtiment “  
*-Defit Wijaya, Ibuku*