



PFE . Mémoire

CONCEPTION DE SERRES AGRICOLES ANTICYCLONIQUES EN BAMBOU STRUCTUREL A LA REUNION

Un projet de recherche et d'innovation pour le développement de la filière biosourcée au service du monde agricole



ADELE GUERRI-GRAMMONT . AI-GC

Sous la direction de Christophe Rat, Thibaut Fung et Juan Carlos Quezada

BAMBOONEEM.RE

INSA
STRASBOURG



Table des matières

Remerciements	4
Avant-propos	5
Introduction.....	6
. CHAPITRE I . LE BAMBOU	11
I.1. La plante : une espèce endémique de la Réunion	12
I.1.1. Une grande diversité d'espèces.....	12
I.1.2. Morphologie	14
I.1.3. Cycles de pousse.....	16
I.1.4. Potentiel environnemental	17
I.2. La filière : une ressource biosourcée pour le développement durable du territoire réunionnais.....	19
I.2.1. Une grande diversité d'utilisations	19
I.2.2. Cycle de transformation de la matière au matériau.....	22
I.2.3. Une filière courte rapide à mettre en place	25
I.2.4. Plan de développement de la filière pour l'île de la Réunion	28
I.3. Le matériau : un potentiel pour construire local et biosourcé	31
I.3.1. Caractéristiques géométriques	31
I.3.2. Caractéristiques mécaniques.....	34
I.3.3. Mise en œuvre : outils et techniques d'assemblage	37
I.3.4. Normes et réglementations.....	41
. CHAPITRE II . LES CONTRAINTES CYCLONIQUES EN CLIMAT TROPICAL	43
II.1. Qu'est-ce qu'un cyclone ?	45
II.1.1. Cyclogénèse.....	45
II.1.2. Caractéristiques d'une perturbation cyclonique.....	46
II.1.3. Cyclolyse.....	47
II.2. Désordres générés par les cyclones et guides de conception anticyclonique	48
II.2.1. Action du vent sur les structures lourdes.....	48
II.2.2. Action du vent sur les charpentes et ossatures	48
II.2.3. Action du vent sur les toitures.....	49
II.2.4. Actions de l'eau sur le sol	50
II.2.5. Action de l'eau sur les structures.....	50
II.2.6. Synthèse	51
II.3. Modélisation des vents cycloniques et effets sur les structures	52
II.3.1. Eurocode 1	52
II.3.2. La NV65 - Neige et Vent.....	53
II.3.2. Comparaison et limites de ces méthodes de calcul.....	53

. CHAPITRE III . LES INFRASTRUCTURES AGRICOLES DE LA TERRE A LA SERRE	55
III.1. État des lieux des pratiques agricoles locales et influence sur les structures.....	56
III.1.1. Les différents types de culture à la Réunion	56
III.1.2. Les différents modes de culture.....	57
III.1.3. Le rôle des serres sur les cultures.....	58
III.2. État des lieux et étude des serres existantes « conventionnelles ».....	59
III.2.1. Structure souple ou rigide.....	59
III.2.2. Les contraintes sur la structure de la serre	62
III.2.3. Coût économique et environnemental de l'investissement	63
III.3. Élaboration d'un cahier des charges répondant aux enjeux agricoles locaux.....	68
III.3.1. Définition des enjeux.....	68
III.3.2. Règles de conception	69
III.3.3. Identification de 3 configurations infrastructurelles	70
. CHAPITRE IV . ÉTUDE D'UN MODELE DE SERRE ANTICYCLONIQUE EN BAMBOU STRUCTUREL.....	71
IV.1. Recherches volumétriques, développement de différents modèles, étude de faisabilité	72
IV.1.1. Méthode et processus de conception.....	72
IV.1.2. Présentation de trois modèles étudiés.....	77
IV.1.3. Comparaison et choix du modèle retenu pour la poursuite de l'étude	80
IV.2. Élaboration du protocole de construction d'un prototype à échelle 1 :1.....	83
IV.2.1. Objectifs	83
IV.2.2. Modèle économique inédit participant au développement de la filière	85
IV.2.3. Planning et descriptif du montage de la structure	86
IV.2.4. Détails et mise en œuvre	89
IV.3. Étude des sites d'implantation des prototypes	108
IV.3.1. Les bas de l'Ouest : Pépinière à Piton Saint Leu.....	109
IV.3.2. Les mi-pentes de l'Est : Serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne.....	111
IV.3.3. Les hauts du Sud : Serre mixte à la Plaine des Makes.....	113
IV.3.4. Les mi-hauts du Sud : Serre agronomique expérimentale pour l'Armefflor à Saint Pierre	115
IV.4. Bilan et poursuite des études	116
CONCLUSIONS.....	118
BIBLIOGRAPHIE	121
TABLE DES FIGURES	124
ANNEXES	127

Remerciements

Je remercie infiniment Christophe et Thibaut pour leur accueil chaleureux et leur accompagnement, leur patience et leur volonté de transmettre, l'implication et la conviction dont ils font preuve à travers leur travail. Ce fut un plaisir de travailler durant ces quatre mois à vos côtés, de découvrir votre travail, vos projets, vos méthodes et surtout votre passion et le cœur que vous mettez à l'ouvrage.

Je remercie aussi toutes les personnes que j'ai eu la chance de rencontrer durant ce stage : agriculteurs et pépiniéristes, ouvriers et artisans, maîtres d'ouvrages et agents de collectivités territoriales. Les échanges et discussions que j'ai pu avoir avec eux ont nourri mon projet de fin d'étude et m'ont permis de mieux comprendre le territoire sur lequel j'ai eu la chance de travailler.

Je voudrais également remercier Mr Juan Carlos Quezada pour avoir suivi mon travail à distance, pour ses conseils, ses relectures et son accompagnement.

Je profite également de ce court paragraphe pour souligner l'intérêt du double cursus proposé à l'INSA Strasbourg, mêlant l'ingénierie à l'architecture. En sept ans, les enseignants impliqués dans le développement de cette formation singulière, nous ont transmis une double culture constructive, dont j'ai particulièrement pu prendre conscience à l'occasion de mon stage de fin d'étude, et je les en remercie sincèrement.

Avant-propos

Étudier le développement de la filière bambou à la Réunion, c'était pour moi une manière de découvrir à la fois un matériau et un territoire.

Un matériau, c'est une ressource primaire à valoriser et à respecter, des techniques constructives ancestrales qui ont évolué avec le développement de la technologie, un comportement mécanique singulier complexe.

Un territoire, c'est une topographie, un ou plusieurs climats, une histoire, des acteurs, un patrimoine.

C'est la mise en relation adéquate de matières et de milieux qui génère du sens dans notre manière de construire.

Outre le fait de s'intéresser au développement d'un matériau biosourcé, ce qui m'a motivée à me lancer dans ce sujet de projet de fin d'étude a été la pluralité des échelles à aborder et la diversité des acteurs impliqués par ces enjeux. Ce projet de recherche et d'innovation technique propose de s'intéresser au comportement mécanique d'un matériau, à la conception d'un principe structurel, à ses détails constructifs de mise en œuvre et la définition de ses assemblages. Mais il s'inscrit dans un plan de développement territorial de la filière bambou, qui demande à le penser dans un contexte beaucoup plus large, afin de pérenniser son intégration à l'échelle d'une île.

Ceci engendre, pour un projet de petite échelle, une grande diversité d'interlocuteurs à interroger pour comprendre leurs enjeux et intérêts respectifs, avec qui travailler de concert pour faire avancer des réflexions communes, à convaincre parfois, à écouter souvent pour apprendre le maximum de leurs savoirs et savoir-faire.

Ce qui me tenait également à cœur pour ce stage, clôturant la fin de mes études d'ingénieure, était d'hybrider mes outils de travail entre bureau et terrain afin de comprendre le contexte nouveau dans lequel j'allais devoir m'intégrer. J'ai ainsi nourri ce projet de fin d'étude de recherches et études bibliographiques, de rencontres, de discussions et de visites. Je l'ai construit en pointillé entre des phases d'étude, armée d'outils de dessin, de calcul, de maquettes et de phases de terrain, sur les chantiers et les lieux de production agricole pour me confronter à la réalité de la mise en œuvre et expérimenter grandeur nature avec la matière.

Introduction

. *Contexte* .

L'approvisionnement en ressources à la Réunion : une forte dépendance à l'importation

La question de la ressource est un enjeu majeur dans les modèles de développement de nos sociétés, dès lors que l'on sait que les ressources que nous utilisons quotidiennement pour se loger, se chauffer, se déplacer, se divertir sont pour la plupart en train de s'épuiser à une vitesse alarmante. Sur un territoire insulaire, fini donc limité dans son expansion, l'approvisionnement en ressources est un facteur déterminant dans l'équilibre territorial, puisque même si la population augmente, si chacun a besoin de consommer davantage, la Terre produit une quantité de ressource non extensible sur un terrain défini.

L'île de la Réunion est un territoire insulaire français, extrêmement dépendant de l'importation pour son approvisionnement en ressources alimentaires, énergétiques et constructives. Sa localisation isolée, au milieu de l'océan Indien en zone subtropicale humide, rend ce modèle de consommation très gourmand en énergie pour y acheminer tout ce dont ce département d'Outre-Mer a besoin pour vivre et se développer ; modèle consommateur donc en ressources fossiles. Le modèle d'approvisionnement en ressources appelle donc à se restructurer, en réponse à l'urgence climatique globale, sur ce territoire qui est d'autant plus menacé par les dérèglements que l'on observe aujourd'hui. Les cyclones et tempêtes tropicales se multiplient et s'intensifient ; l'alternance des saisons sèche et humide sur laquelle est réglé l'équilibre des écosystèmes et des filières de production agricoles est de moins en moins marquée ; le littoral très urbanisé est menacé par la montée du niveau de la mer et l'érosion des sols... Le parc national qui constitue le cœur de l'île est par ailleurs classé au patrimoine mondial de l'UNESCO pour la richesse de sa biodiversité et de ses paysages, ce qui témoigne d'une nécessité prioritaire de s'intéresser à l'impact environnemental de la construction sur l'île, afin de préserver les habitats naturels qu'elle contient.

. *Thématique d'étude* .

Réduire l'impact environnemental du secteur de la construction : le potentiel des matériaux biosourcés

Le secteur de la construction est un des facteurs les plus impactant de la transformation des milieux naturels par l'Homme. Il est responsable, au niveau mondial, de 40% des émissions de gaz à effet de serre, de 37% de la consommation d'énergie et de 40% des déchets produits. Il est donc urgent de repenser nos manières de construire, de façon plus intelligente et durable. Sur l'intégralité du cycle de vie d'un bâtiment performant, entre 60% et 90% des émissions de gaz à effet de serre sont dues à la mise en œuvre des matériaux en phase de construction et déconstruction, le reste étant émis pendant la phase d'utilisation du bâtiment pour son fonctionnement et son entretien.

L'utilisation de matériaux biosourcés propose de construire avec des ressources renouvelables, qui stockent du carbone pendant leur croissance, deviennent des déchets organiques à leur déconstruction et ne produisent aucun composant néfaste pour la santé des habitants au cours de leur transformation. Leur mise en œuvre semble donc être une solution à de nombreuses problématiques qui se posent dans la construction de bâtiments durables.

. *Sujet d'étude* .

Développer une filière de ressource biosourcée locale à la Réunion : le potentiel du bambou

Sur l'île de la Réunion, l'augmentation récente du prix des matériaux ¹ associée à l'augmentation du coût de l'énergie pour leur acheminement, rend les matériaux de construction de moins en moins accessibles puisqu'ils sont en moyenne 30 à 40% plus cher qu'en métropole ². Si l'on réfléchit aux alternatives aux constructions très carbonées qui sont aujourd'hui la norme, il faut donc penser local. S'approvisionner en matériaux biosourcés localement, c'est décarboner la matière première et réduire considérablement les émissions liées au fret.

Sur le territoire réunionnais, on observe différents types de ressources constructives présentes naturellement, qui se retrouvent d'ailleurs dans l'habitat vernaculaire local ³.

La pierre, principalement d'origine volcanique, est exploitée dans des carrières qui sont très sollicitées pour les travaux routiers ⁴. Le territoire, en grande partie protégé par la réglementation du parc national, présente aujourd'hui de moins en moins de zones où il est possible d'ouvrir des carrières ⁵.

Les terres argileuses limoneuses, propices à la construction, sont rares et principalement situées sur des zones boisées ou cultivées ⁶.

Enfin, le bois est une ressource massive puisque les forêts occupent 45% de la superficie de l'île. Les deux espèces utilisables pour la construction, qui ont été historiquement importées, sont le *Tamarin des hauts* (*Acacia heterophylla*) et le *Cryptoméria du Japon* (*Cryptomeria Japonica*). Le premier présente un cycle de pousse qui ne permet pas de compenser la quantité qui a été exploitée par le passé et il n'y a plus d'arbres assez matures dans les zones accessibles. Le second, a un temps de maturation du bois allant de 45 à 60 ans. Le gisement actuel, constitué par les plantations massives de la deuxième moitié du XX^e siècle permettra de produire encore 8000 à 10 000 m³ par an pendant 30 ans, d'après l'ONF. Les perspectives sur ces deux essences de bois montrent donc la limite d'utilisation de ce matériau biosourcé, dont le cycle de renouvelabilité est trop long sur un territoire contraint par sa taille et sa topographie. La filière bois locale ne représente d'ailleurs que 3 à 4% du marché de la construction bois, la majeure partie des bois d'œuvre étant importée. Ramenée au marché de la construction dans sa globalité, la participation de la filière bois locale est donc dérisoire. Fonctionnant déjà

¹ D'après la FFB (Fédération Française du Bâtiment), en 2021, les prix ont augmenté de 40 à 350% pour la charpente bois, de 70 à 80% pour la charpente métallique, de 10 à 20% pour la maçonnerie, de 5 à 15% pour l'isolation. Site de la FFB, [en ligne], [consulté le 12 décembre 2022], Disponible à l'adresse : <https://cm-assurance-decennale.fr/hausse-des-prix-des-matériaux-de-construction-2021/>

² Valeurs tirées de l'étude de formation des prix des matériaux utilisés dans le gros œuvre et le Génie Civil à la Réunion, réalisée par l'OPMR (Observatoire des Prix des Marges et des Revenus à la Réunion), novembre 2018, [en ligne], [consulté le 12 décembre 2022], Disponible à l'adresse : <http://www.opmr.re/wp-content/uploads/2018/12/12Pages-PrixMateriaux-17-148-161118-ECR-V1.pdf>

³ Une étude menée conjointement par de nombreux acteurs locaux de la construction durable a évalué le potentiel de différentes ressources biosourcées à travers le *Diagnostic des ressources mobilisables, Matériaux locaux pour le bâti tropical à la Réunion*, Nomadéis, BioRevTropics, 2018, disponible à l'adresse : <https://www.nomadeis.com/dl/2018/04/Rapport-final-VF.pdf> ,

⁴ Des carrières sont régulièrement ouvertes pour répondre à la demande forte en matière minérale. De nouvelles carrières ont été ouvertes récemment pour la construction de la route du littoral.

⁵ Voir cartes 1 et 2 en Annexe 1

⁶ Voir carte 3 en Annexe 1

quasiment au maximum de ses capacités, il est impossible de penser développer une filière bois capable de répondre à la demande en construction actuelle.

Il existe une ressource endémique de l'île, qui a été historiquement utilisée dans la construction vernaculaire mais qui semble avoir été oubliée ou effacée peut-être de la culture constructive : le bambou. Cette plante, surnommée par certains « l'acier végétal » présente un cycle de pousse beaucoup plus rapide que celui du bois, des caractéristiques mécaniques très intéressantes pour une utilisation structurelle, un comportement hygrothermique adapté au climat tropical et un potentiel écologique prometteur pour le territoire. Cette ressource aux nombreuses qualités, n'est pourtant que très peu exploitée à la Réunion, contrairement à ses voisins de l'océan Indien, comme Madagascar ou Mayotte.

Une réglementation technique lacunaire en matière de mise en œuvre du bambou dans les normes françaises conduit à une grande difficulté pour utiliser ce matériau dans des projets de logements ou établissements accueillant du public. Même si le matériau a fait ses preuves dans d'autres régions tropicales du globe, la qualité de la ressource et son impact carbone ne semblent pas encore être des critères de choix pour les assureurs qui préfèrent assurer des techniques coûteuses en prix et en énergie mais qu'ils peuvent maîtriser depuis la métropole.

. *Organisme d'accueil* .

Bambooneem : l'ingénierie d'un bureau d'étude, l'artisanat d'une petite entreprise de construction, la pédagogie d'un organisme de formation

Le bureau d'étude *Bambooneem.re*, qui m'a accueillie pour ce stage de fin d'étude, est un des acteurs de l'île qui œuvre pour le développement la filière bambou sur l'île de la Réunion. Cette petite entreprise joue le double rôle de concepteur constructeur. Sa position centrale, intersectant les missions de maîtrise d'œuvre et d'exécution, à l'interface entre maîtrise d'ouvrage, producteurs de matériau et usagers, lui confère une expertise et un savoir-faire certain au sein d'une filière courte encore en cours de développement. La participation de cet organisme à des programmes de recherche, entre autres sur la caractérisation mécanique du matériau, sur son traitement et sur les assemblages structuraux qu'il permet, la place au cœur d'une dynamique de recherche et d'innovation axée sur le bambou. Sa relation étroite avec les aménageurs du territoire lui donne une vision à long terme sur le développement local de la filière⁷. Travaillant à plusieurs échelles sur le territoire et dans le temps, *Bambooneem.re* est également un organisme de formation qui forme charpentiers, architectes, artisans ou simples intéressés aux techniques de la construction en bambou qui pourrait prendre, à juste titre, une place importante dans la construction réunionnaise de demain.

⁷ Voir à ce titre *le Schéma directeur de filière BAMBOU, Ile de La Réunion 2020-2030* établi par Thibaut FUNG et Christophe RAT, disponible à l'adresse : <https://bambooneem.re/fr/plan-de-filiere-bambou-2020-2030-ile-de-la-reunion/>

Christophe Rat, ingénieur INSA Lyon Génie Civil et Urbanisme, est spécialisé dans l'aménagement du territoire, la construction écologique et l'ingénierie urbaine. Il prône une ingénierie humaine et opérationnelle, réfléchissant sans cesse à des solutions *low-tech* pour aller vers davantage de résilience. Pédagogue dans l'âme, il diffuse au gré des projets et des rencontres des dynamiques de simplification des process, pour plus d'efficacité et de pertinence. Pour lui, la solution à des problèmes complexes réside dans leur simplification.

Thibaut Fung, architecte diplômé de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, développe une approche constructive de l'architecture en partant de la matière et de ses capacités pour concevoir et construire des projets. Passionné par la matière et sa mise en œuvre, sa maîtrise technique en fait un artisan charpentier bambou hors pair.



Figure 1 : Croquis de réunion (crédit personnel)

. *Projet d'étude* .

Développement de serres agricoles anticycloniques en bambou structurel

Une importante demande a fait surface depuis quelques années de la part du monde agricole, qui traverse une phase charnière. La monoculture de la canne à sucre, qui n'est plus rentable, décroît et timidement s'entame une transition vers des modes de culture plus résilients pour le territoire et sa population. Les agriculteurs, qui souffrent régulièrement des effets dévastateurs des cyclones, semblent à la recherche d'une solution moins coûteuse et plus durable pour leurs infrastructures. C'est ce qui a poussé *Bambooneem.re* à lancer un projet de recherche sur le développement de serres anticycloniques en bambou structurel. Le projet vise à trouver une

alternative aux hangars agricoles conventionnels en structure acier. L'idée est de proposer un système constructif adaptable pour pouvoir moduler l'emprise du bâtiment selon le besoin en infrastructures, s'adaptant aux mutations constantes des exploitations pour suivre les évolutions de la demande, du terrain et du changement climatique.

Ce projet présente un double objectif. Il vise à soutenir le secteur agricole en proposant un système constructif robuste et résilient, réduisant la dépendance à l'importation de matériaux, proposant d'utiliser plutôt un matériau omniprésent sur l'île. A plus grande échelle, ce projet s'insère dans le plan de développement de la filière de construction en bambou sur l'île de la Réunion, et vise à démontrer la pertinence de ce matériau à assurer des fonctions structurelles sur des bâtiments techniques aux dimensions conséquentes. Ce serait un levier potentiel pour le développement d'une industrie de production solide pour la filière dans sa globalité.

. Problématique .

Dans le but de proposer une réponse aux enjeux territoriaux, écologiques et constructifs qui viennent d'être évoqués, cette étude vise à mettre en évidence les potentiels de développement de serres agricoles anticycloniques en bambou structurel sur l'île de la Réunion. Il propose d'interroger une solution technique *low-tech*, économe en matière et en énergie, dont la simplicité constructive permettrait une plus grande accessibilité. Par son échelle et son adaptabilité, ce projet expérimental devient vecteur du développement de la filière biosourcée, fournissant un support sur lequel baser des études futures et une potentielle normalisation.

Un des enjeux de ce projet de recherche appliquée est la confrontation de plusieurs problématiques sur un territoire : le bambou, les infrastructures agricoles, les contraintes cycloniques. La première partie de ce mémoire s'intéressera au matériau bambou, afin de présenter sa morphologie, ses caractéristiques et son comportement pour révéler son potentiel pour la construction. La seconde partie s'attachera à définir les contraintes cycloniques afin de comprendre leurs effets sur les structures. Dans un troisième temps, on synthétisera les enjeux agricoles locaux pour établir un cahier des charges guidant la conception d'infrastructures de culture. Le but de ces trois premiers chapitres est de se nourrir des recherches développées dans les différents champs d'étude et de les confronter les uns aux autres pour développer, dans un quatrième chapitre, un modèle de serre agricole en bambou structurel qui résiste aux contraintes climatiques locales. Dans cette dernière partie sera détaillée la méthode de conception et d'étude des structures, avant d'élaborer un protocole de construction d'un prototype à échelle 1 : 1 pour tester le système constructif. Dans un processus itératif, cela pourra engendrer une nouvelle phase d'étude pour perfectionner, corriger et faire évoluer la structure, dans le but d'aboutir à un modèle viable, résistant, économique, durable et ancré sur son territoire.

. CHAPITRE I . LE BAMBOU



Figure 2 : Dendrocalamus asper, Bambusaie du Guillaume, La Réunion (crédit personnel)

I.1. La plante : une espèce endémique de la Réunion

I.1.1. Une grande diversité d'espèces

Le bambou est une plante monocotylédone ligneuse originaire des régions tropicales mais qui s'est dispersée dans de nombreuses forêts autour du globe. Plus de 1300 espèces sont aujourd'hui répertoriées à travers le monde sur 35 millions d'hectares ⁸.

On distingue deux grandes familles de bambous. Les *bambous traçants* poussent dans les zones tempérées. Leur réseau racinaire de rhizomes monopodiaux (ou leptomorphiques) se développe de manière linéaire, rendant cette famille de bambous envahissante. Les *bambous cespiteux*, s'épanouissent dans les régions tropicales, poussent en touffes sur des rhizomes sympodiaux (ou pachymorphiques). Ce dernier type de bambou n'est absolument pas envahissant. C'est celui que l'on trouve majoritairement à la Réunion.

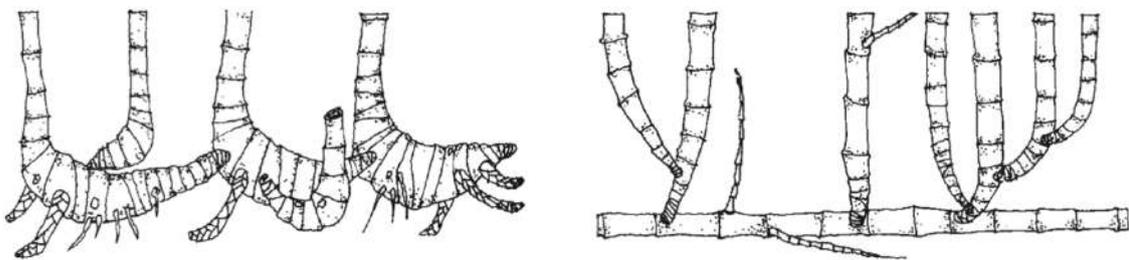


Figure 3 : Illustration présentant les rhizomes des bambous cespiteux (à gauche) et traçants (à droite),
(Building with Bamboo, Gernot Minke)

La grande diversité des variétés de bambous en fait un groupe végétal qui s'adapte à un large panel de climats tempérés et tropicaux. Les bambous les plus réputés pour la construction sont les *Dendrocalamus*, les *Bambusa*, les *Guadua*, les *Phyllostachys* et les *Gigantochla*. Au sein de ces genres, qui comportent chacune plusieurs dizaines d'espèces différenciées, on s'intéressera plus particulièrement à quelques essences particulières utilisées à la Réunion :

- le *Bambus borbonicus*, dit « calumet », c'est le bambou endémique de la Réunion
- le *Bambusa vulgaris* que l'on trouve communément sur tout le territoire de la Réunion, surnommé le « bambou des ravines »
- le *Dendrocalamus giganteus*, que l'on trouve plus ponctuellement dans les hauts de l'île et les cirques, il est appelé par certains le « géant de Salazie »
- le *Dendrocalamus asper*, exploité à Madagascar et à la bambusaie du Guillaume (la Réunion)
- le *Phyllostachys pubescens* (ou Moso), bambou tempéré largement exploité en Chine
- le *Guadua angustifolia*, un bambou originaire de Colombie et très utilisé en Amérique centrale. Cette espèce de bambou est d'ailleurs d'un type singulier puisque que c'est un bambou tropical non envahissant mais il se développe sur un réseau racinaire linéaire et non en touffes comme ses cousins. Cette particularité en fait un bambou particulièrement adapté à la construction puisque que ses cannes sont très droites et régulières.

⁸ Forest Resource Assessment 2020, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), INBAR, 2021



[1]



[2]



[3]



[4]



[5]



[6]



[7]



[8]

Figure 4 : [1] *Bambus borbonicus* « Calumet », [2] *Dendrocalamus asper* , [3] *Dendrocalamus asper* itam, [4] *Dendrocalamus giganteus*, [5] *Phyllostachys pubescens* « Moso », [6] *Phyllostachys aurea*, [7] pousse de *Guadua angustifolia*, [8] *Bambusa vulgaris* (credits personnels)

I.1.2. Morphologie

Le bambou est une plante singulière. Il pousse en *touffes*⁹ circulaires où prennent racine plusieurs dizaines de *chaumes*. Les chaumes sont les tiges du bambou, de forme creuse tubulaire, composées de fibres longitudinales. Ils présentent des *nœuds* à intervalles réguliers, ce sont des sections pleines très résistantes constituant les points durs du chaume. A leur base, se trouvent les *rhizomes* qui forment le réseau racinaire sous-terrain de la plante. Ceux-ci forment des *turions*, les pousses qui formeront un nouveau chaume. Enfin, le feuillage singulier du bambou est composé de petites feuilles fines qui se régénèrent régulièrement.

Le chaume est la partie de la plante utilisée pour construire ; une fois récolté et débarrassé de ses feuilles, on l'appellera la *canne*. Au sein d'une même section de canne, la matière n'est pas homogène, elle est plus dense au plus proche de la peau, qui constitue une enveloppe hydrophobe de 0,25mm¹⁰, riche en silice, c'est une couche protectrice pour l'intérieur de la plante.

La composition chimique du bois de bambou est la suivante¹¹ : 50% de carbone ; 6,1% d'hydrogène ; 43% d'oxygène ; 0,04 à 0,26% d'azote.

⁹ On parle ici des bambous cespiteux ou bambous tropicaux qui sont les principaux objets de l'étude.

¹⁰ VAN DER LUGT, Pablo, *Booming bamboo: the (re)discovery of a sustainable material with endless possibilities*, Naarden, Materia, 2017

¹¹ Valeurs données en pourcentage du poids total.

DUNKELBERG, Klaus, *Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben*, IL 31, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, 2000

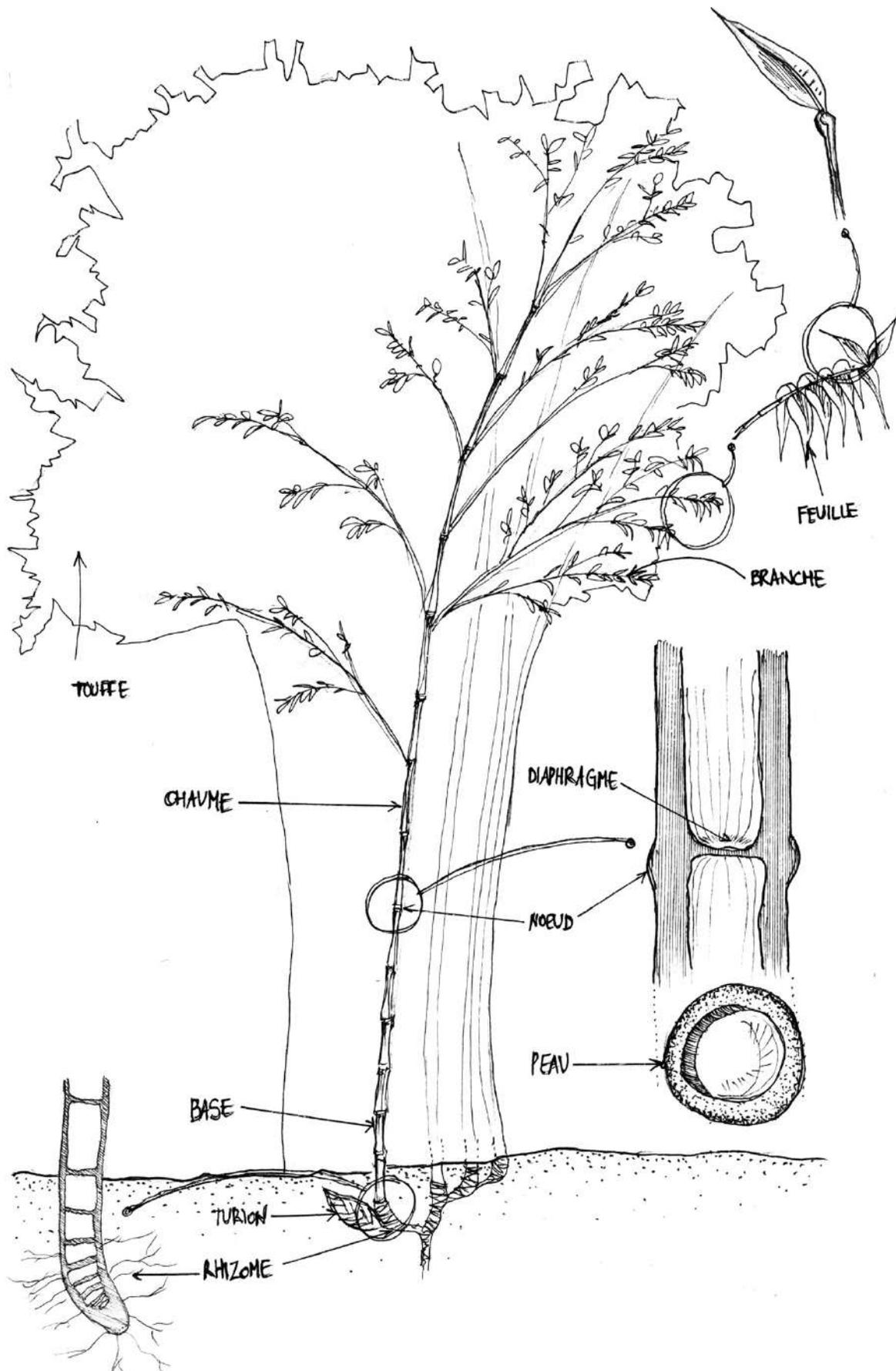


Figure 5 : Morphologie du bambou (croquis personnel)

I.1.3. Cycles de pousse

Une des particularités du bambou, qui en fait une ressource quasiment inépuisable est sa vitesse de croissance qui peut atteindre un mètre par jour chez certaines espèces. Le chaume se développe verticalement dans sa hauteur avant de s'épaissir et de se densifier. Tous les nœuds sont initialement présents dans les rhizomes, ils vont progressivement s'écarter et de la matière va se créer entre eux au cours de sa croissance. C'est ce qui explique que les nœuds sont plus rapprochés à la base du chaume qu'en haut.

Un bambou atteint sa taille adulte en un an. Au bout de 3 ans, le chaume commence sa lignification. Cette phase est remarquable à l'œil car la peau externe se durcit et brunit progressivement. Le chaume est mature pour la construction au bout de 4 à 5 ans. L'humidité relative du bambou passe de 80% au cours de sa croissance à 20% lorsqu'il est mature pour la récolte.

Il faut, cependant, prendre en compte le temps de maturation de la touffe, qui produira des cannes d'un diamètre suffisant et d'une qualité satisfaisante au bout de 7 à 10 ans. Les bambous produits par une même touffe sont de plus en plus gros et solides années après années.

Contrairement à la plupart des arbres qui nécessitent d'être replantés une fois coupés, une canne de bambou coupé donnera naturellement naissance à 6 nouvelles cannes en moyenne. Il n'y a donc pas besoin de replanter de nouveaux plants chaque année, la plante se régénère de façon autonome à la manière d'une herbe.

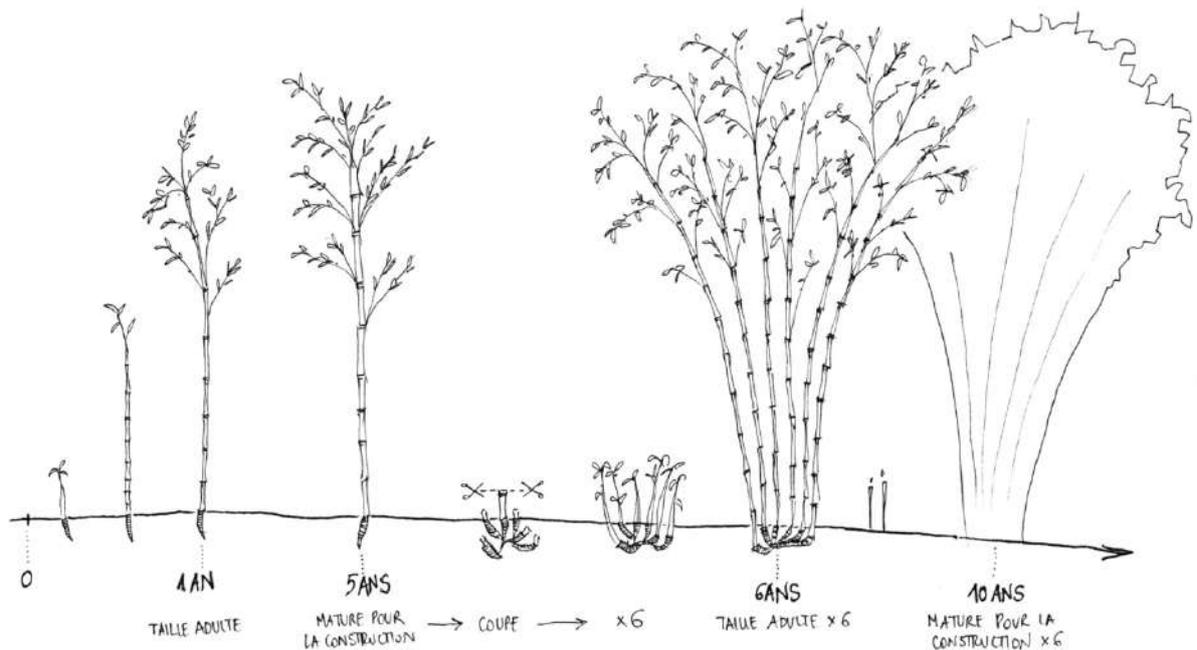


Figure 6 : Cycle de pousse du bambou (croquis personnel)

I.1.4. Potentiel environnemental

D'un point de vue écologique, le bambou est une plante qui présente de nombreux potentiels à l'échelle du territoire pour la stabilisation des sols, la captation de carbone, la structuration paysagère et en tant que biotope.

« *Being a plant that self-regenerates, bamboo has, with adequate management and harvest, a permanent CO₂ absorption, which does not happen with other species.* »¹²

Le bambou, comme toutes les plantes, absorbe du CO₂ et relâche de l'O₂ pendant sa croissance, par le phénomène de photosynthèse. Mais il relâche environ 35% plus d'oxygène que des arbres de dimension équivalente¹³, et il a une capacité photosynthétique et d'absorption du CO₂ supérieure à la plupart des arbres, ce qui explique sa croissance très rapide. Sachant que le bois de bambou est constitué à 50% de carbone, on peut estimer la teneur en carbone d'un individu en fonction de sa masse volumique et de son taux d'humidité. La moitié du poids de biomasse sèche est constituée de carbone, il suffit donc de multiplier cette valeur par le rapport de la masse moléculaire du CO₂ au C (3,67). Selon les essences, la quantité de CO₂ stockée peut atteindre 1 662 kg de CO₂ par m³ de bambou¹⁴. Pour avoir un ordre de grandeur, on peut imaginer de manière hypothétique, que l'on remplace les 30 000 hectares de l'île dédiés à la culture de canne à sucre par des plantations de bambou. Cela permettrait de compenser 47% des émissions de gaz à effet de serre de l'île¹⁵. Bien sûr, il n'est pas question de passer de la monoculture de canne à sucre à la monoculture de bambou, mais cela permet de se rendre compte du potentiel de captation de carbone de cette plante. Le *Guadua angustifolia*, en particulier, stock en moyenne 21 tonnes de carbone par hectare et par an, pendant ses 7 premières années¹⁶. Cela correspond à 84 000 km parcourus en voiture¹⁷, soit plus de deux fois le tour de la Terre ou encore l'activité d'une voiture individuelle en France pendant 7 ans. Ainsi un hectare de bambou *Guadua* compense l'activité de 7 voitures individuelles pendant sa phase de croissance.

Le bambou participe à stabiliser les sols via un système racinaire robuste et profond. Cette caractéristique est particulièrement intéressante sur des terrains victimes d'érosion, de phénomènes de ravinement et de glissement de terrain.

¹² MINKE, Gernot, *Building with Bamboo*, Birkhauser, Basel, 2012, p.11

¹³ LEGRAND, Charles, L'architecture hybride et légère en bambou, 2018, *Bambooklet*, p.40

¹⁴ Moso Bamboo, *Quelle est la quantité de CO₂ stockée dans le bambou ?*, [en ligne], [consulté le 23 décembre 2022], Disponible à l'adresse suivante : https://blog.moso-bamboo.com/fr/quelle-est-la-quantite-de-co2-stockee-dans-le-bamboo?lang_selected=true&hslang=fr

¹⁵ 4974 kilotonnes de CO₂ par an sont émises sur l'ensemble de l'île de la Réunion.

Observatoire Energie Réunion, [en ligne], [consulté le 12 février 2022], Disponible à l'adresse suivante : <https://oer.spl-horizonreunion.com/emissions-de-ges/gaz-a-effet-de-serre-la-reunion>

¹⁶ MINKE, Gernot, *Building with Bamboo*, Birkhauser, Basel, 2012

¹⁷ Sur une base d'émission moyenne d'une voiture particulière en France de 250g CO₂/km, qui parcourt une distance moyenne de 12 223 km par an.

Le bambou a une capacité de rétention d'eau qui permet de réguler les flux hydrauliques dans les sols lors d'épisodes pluvieux intenses. Un hectare de *Guadua angustifolia* peut retenir jusqu'à 30 000 L d'eau ¹⁸.

Les feuilles des bambous, par évapotranspiration, participent à diminuer la température de l'air, permettant par exemple de générer un sous-bois plus frais, une zone d'ombre tempérée ou un abri pour des cultures qui doivent être protégée de la chaleur du soleil direct.

Par la hauteur et la robustesse des touffes face aux épisodes climatiques intenses, le bambou peut être utilisé comme haie pour protéger des cultures, des zones d'habitation ou des espaces publics contre les forts vents qui balayent l'île.

Enfin, la production de matière bambou utilise peu d'énergie primaire, elle s'élève à 30 MJ/m³, contre 80 MJ/m³ pour son cousin biosourcé le bois. ¹⁹

Materials	Weight per volume Kg/m ³	Energy for production MJ/m ³
Concrete	2400	240
Steel	7800	1500
Wood	600	80
Bamboo	600	30

Figure 7 : Comparaison des énergies de production entre le bambou et d'autres matériaux, (source : Legrand C.)

¹⁸ MINKE, Gernot, *Building with Bamboo*, Birkhauser, Basel, 2012, p.11

¹⁹ LEGRAND, Charles, *L'architecture hybride et légère en bambou*, 2018, p.85

I.2. La filière : une ressource biosourcée pour le développement durable du territoire réunionnais

Des filières viables d'exploitation du bambou se sont développées dans d'autres régions du monde. En Asie ou en Amérique du Sud, par exemple, le bambou est un matériau de construction omniprésent, reconnu et utilisé depuis des générations. Les filières qui s'y sont développées présentent des différences structurelles, preuve de leur adaptation au territoire, aux modèles économiques en place et aux cultures constructives locales. Par exemple, la production de matériau bambou pour la construction semble plus industrialisée en Chine, où la mise en place de lignes de production est facile et rapide et la main d'œuvre peu chère. La production d'éléments en lamellé-collé et le travail de bambous par groupes permet de générer des constructions vernaculaires courbes, aux formes organiques et aux grandes portées. En Colombie, en revanche, les systèmes de production sont plus morcelés et localisés. L'utilisation quasi exclusive du *Guadua*, bambou très rectiligne, régulier et robuste permet d'utiliser les cannes entières sur de grandes portées.

Il faut donc imaginer un modèle de filière pour la Réunion, fonction du patrimoine biologique des bambous présents sur l'île, de la morphologie territoriale et de la culture locale.

I.2.1. Une grande diversité d'utilisations

Le bambou est un matériau biosourcé, chaque canne est donc unique. Selon les essences les chaumes sont plus ou moins rectilignes, leurs parois plus ou moins épaisses. Cependant, des règles géométriques guident la reconnaissance et l'utilisation des cannes.

Le chaume peut être divisé en trois parties :

- le tiers inférieur est utilisé pour constituer des éléments de structure. Il est en général assez rectiligne, le bois est dense, homogène et résistant. Il n'y a pas de départ de branches, générant de points durs sur cette partie de la canne. La canne peut être utilisée seule, adjointe à une ou plusieurs autres cannes pour constituer des sections plus conséquentes ou encore assemblée en faisceau.
- le tiers médian, présentant souvent plus d'irrégularités et une section plus fine peut être utilisé pour du second œuvre, des éléments de mobilier ou d'aménagement. On peut utiliser les cannes entières en cloisonnement ou en faux plafond, faire des lattes pour constituer des éléments de façade ou de plancher, réaliser des tressages, en faire des panneaux obtenus par fendage, appelés *mats*, ou encore le transformer pour obtenir du lamellé-collé.
- le tiers supérieur n'est généralement pas utilisé directement pour la construction. Il a cependant de nombreuses utilisations possibles, pour de l'artisanat, broyé puis réduit à l'état de fibre ou bien brûlé comme combustible pour la production d'énergie. Sinon c'est simplement de la matière organique rendue à la terre pour fertiliser le sol.

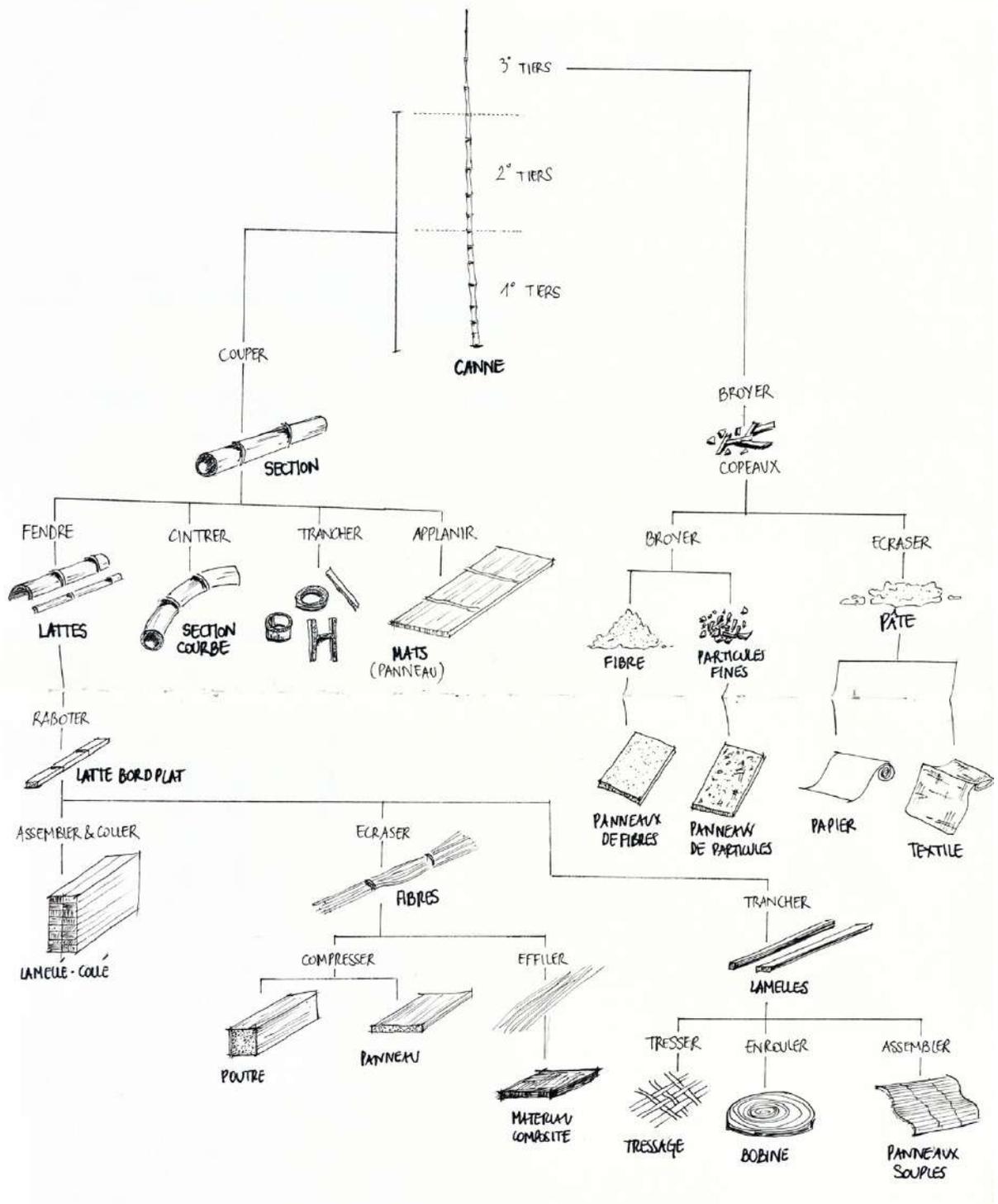


Figure 8 : une grande diversité de formes constructives issues de la canne de bambou (croquis personnel, inspiré d'un schéma de Booming Bamboo, Pablo VAN DER LUGT)

Les deux premiers tiers des cannes offrent donc de nombreuses utilisations constructives possibles sous différentes formes :



Figure 9 : Cannes entières [1], lattes [2], lattes tressées [3], lamellé collé [4], mats [5], sections transversales [6]

Chaque essence de bambou présente ses spécificités qui influencent leur usage. Leur géométrie, composition et propriétés guident leur mise en œuvre et les techniques employées. Par exemple, un bambou aux parois très épaisses ne sera pas aisé à transformer en lattes ; une canne déjà arqué sera plus facile à cintrer ; un bambou aux parois épaisses pourra être utilisé pour faire du lamellé collé, des cannes fines et peu robustes seront réservées au parements et éléments de second œuvre... Ainsi, il est important de bien connaître les spécificités des essences de bambous pour les travailler de manière cohérente.

	<i>Bambus borbonicus</i>	<i>Bambusa vulgaris</i>	<i>Giganteus</i>	<i>Dendrocalamus asper</i>	Moso	<i>Guadua angustifolia</i>	<i>Phyllostachys aurea</i>
Taille des cannes	5-10m	10-20 m	25-35 m	15-25 m	10-20 m	15-30m	5m
Diamètre	4-10 cm	4-10 cm	15-30 cm	8-20 cm	8-15 cm	10-20 cm	2 cm
Épaisseur des parois	0,5 - 1 cm	0,7-1,5 cm	2-2,5 cm	1-2 cm	1-2 cm	1,5-2,5 cm	0,5 - 1 cm
Rectilignité de la canne	arqué	tortueux	courbé	courbé	rectiligne	rectiligne	rectiligne
Resistance aux attaques d'insectes	sensible	sensible	sensible	sensible	Peu sensible	sensible	Naturellement résistant aux termites
Utilisation constructive	Parement, artisanat	Structure	Structure	Structure, lattes, mats	Structure, lattes	Structure, lattes, mats	Structure en faisceaux, parement, artisanat

Figure 10 : Tableau présentant les caractéristiques géométriques de quelques espèces de bambou (sources multiples, notamment *Bambus Bamboo*, Klaus DUNKELBERG)

Cette multiplicité de formes constructives que peut prendre la matière est un véritable atout pour le développement d'une filière de transformation. D'une part, cela permet de limiter les chutes et les déchets, puisque chaque partie de la plante peut être valorisée. D'autre part, ceci génère une grande diversité d'acteurs susceptibles de dynamiser la filière.

I.2.2. Cycle de transformation de la matière au matériau

Le bambou est une ressource biosourcée renouvelable. Mais pour être une ressource durable, elle doit être exploitée correctement, en accord avec ses cycles de vie, de régénération et de transformation.

Pour garantir la qualité et la durabilité du matériau, qui est naturellement vulnérable aux attaques d'insectes et de champignons, il faut être attentif à chaque étape de transformation de la matière première en matériau de construction.

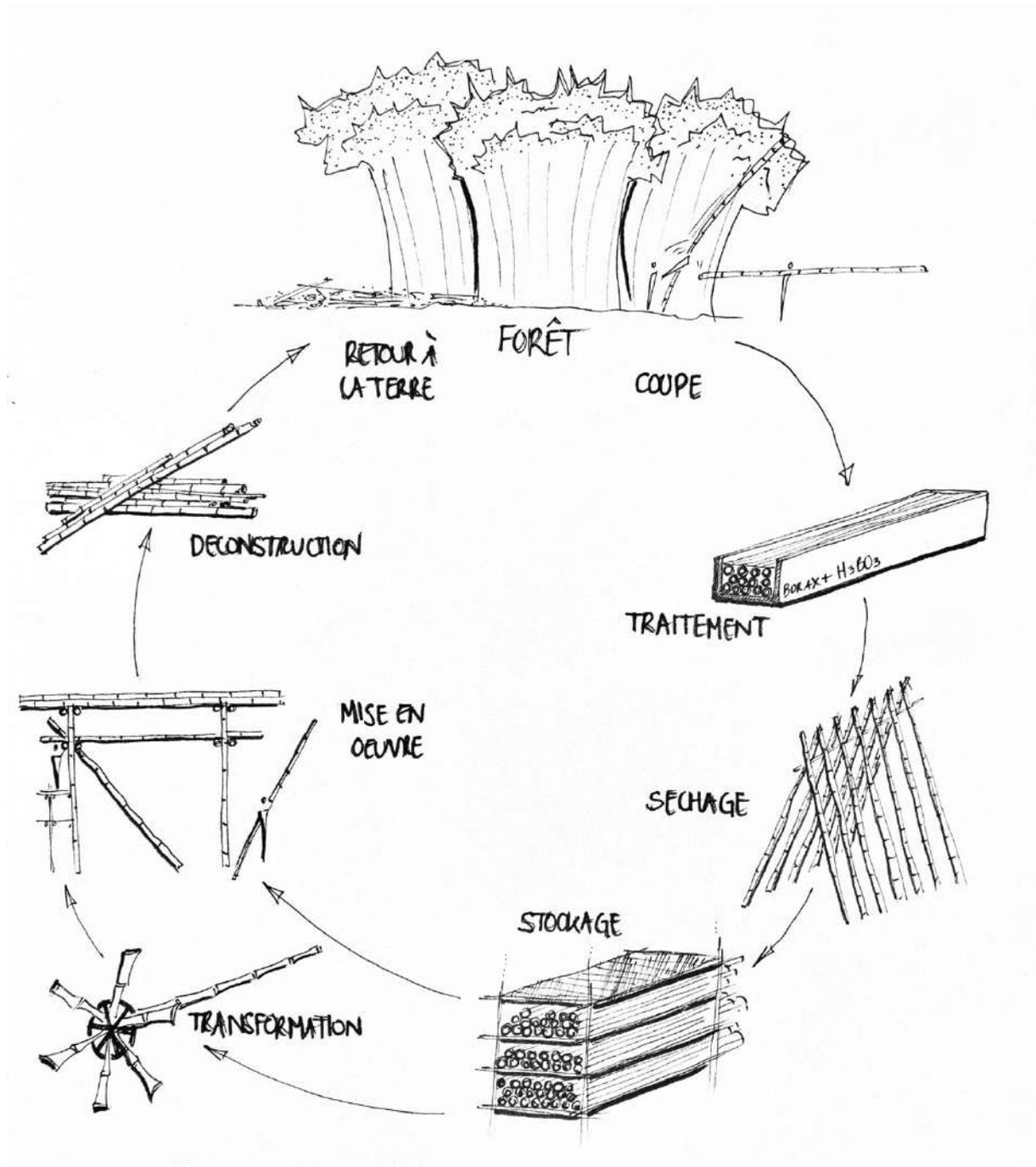


Figure 11 : Cycle de transformation du bambou de la matière au matériau de construction (croquis personnel)

Coupe sélective

Pour que la touffe reste vigoureuse et productive, il faut veiller à ce qu'elle soit constituée de plusieurs générations de chaumes. Il est recommandé que la touffe soit structurée dans les proportions suivantes : 3 chaumes de 1 à 2 ans, 3 chaumes de 3 à 4 ans, 3 chaumes de 5 à 6 ans pour 1 chaume de plus de 7 ans²⁰. Le choix des bambous à récolter peut-être facilité par un dispositif colorimétrique de marquage de l'âge des cannes.

La coupe s'effectue pendant la saison sèche, l'hiver tropical. L'objectif est de récolter une canne lorsque ses taux d'humidité et de sucre sont au plus bas pour les protéger des attaques de nuisibles (insectes, champignons, lichens, moisissure...). L'idéal est d'effectuer la coupe à la lune descendante (entre le 6^e et le 8^e jour) lorsque le taux d'amidon est au plus bas²¹, de nuit ou tôt le matin quand la photosynthèse n'a pas encore commencé. C'est le moment où les flux vitaux de la plante sont les moins actifs et que la sève redescend dans les racines. Le bambou est ainsi moins chargé en eau et en sucre, et sera donc moins sensible aux attaques d'insectes. La coupe s'effectue à la machette, à 10-30 cm au-dessus du sol, juste au-dessus du premier nœud pour éviter une accumulation d'eau dans la partie laissée en place. Les feuilles et petites branches sont généralement enlevées directement et laissées sur place pour enrichir le sol de leur matière organique.

Traitement

La phase de traitement vise à apporter une protection supplémentaire contre les attaques d'insectes, les moisissures et champignons, et à améliorer la résistance au feu. Il existe différentes techniques, qui sont plus ou moins utilisées selon les essences de bambou considérées et la région d'exploitation.

- Le traitement au sel de bore (acide borique + borax) est le plus répandu car il est à la fois simple, rapide et efficace. Mais c'est un traitement chimique, qui génère donc des éléments polluants. Il consiste à immerger les cannes pendant 5 à 7 jours dans un bain de sel de bore dosé à 5%. Ce traitement est insecticide, fongicide et ignifuge (retarde la prise au feu). Une autre technique, alternative à l'immersion complète, consiste à plonger le pied de la canne immédiatement après la coupe, se servant du système de pompage de la plante encore actif et passant par ses réseaux de sève pour diffuser la solution dans la plante.
- Le traitement à l'étuve consiste à chauffer la canne à 150°C en la tournant régulièrement. Cette technique est efficace pour les bambous qui sont naturellement peu sucrés, les bambous tempérés notamment. Le bambou ainsi chauffé devient indigeste pour les insectes qui pourraient l'attaquer.
- L'immersion dans l'eau douce ou salée pendant plusieurs jours permet d'éliminer la sève de la plante. Une technique innovante consiste à immerger ponctuellement les

²⁰ FUNG KWOK CHINE, Thibaut, *Le Bambou à l'île de la Réunion : entre utopie et réalité*

²¹ Ce phénomène est lié à la haute gravitation de la lune, qui exerce à ce moment-là une attraction réduite sur les fluides terrestres. C'est le moment où une grande partie de la sève redescend dans les racines de la plante. MINKE, Gernot, *Building with Bamboo*, Birkhauser, Basel, 2012, p.17

cannes en profondeur dans la mer. La pression engendrée fait pénétrer l'eau salée très rapidement dans les fibres du bambou.

- La fumigation consiste à stocker les bambous au-dessus d'un feu en les exposant à la fumée. La peau du bambou devient indigeste pour les insectes. L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle est superficielle. Elle doit être renouvelée tous les ans puisque son action est temporaire. Il faudrait donc enfumer régulièrement les constructions en bambou pour assurer leur durabilité.
- Non traité. Il est également possible d'utiliser des bambous non traités pour des éléments non structurels comme du parement de façade, des revêtements de toiture, des éléments d'aménagement intérieur... il faudra les changer plus régulièrement si ils sont exposés à l'extérieur, mais leur coût de production est réduit par l'absence de traitement.

Séchage

La phase de séchage permet d'abaisser le taux d'humidité relatif des cannes qui est à 20% quand ils sont récoltés à 10-15% pour leur mise en œuvre.

Si les bambous ont été traités par immersion, on troue les nœuds dans la longueur pour évacuer le liquide qui a pu s'accumuler entre les nœuds et assurer une circulation de l'air à l'intérieur de la canne. Cette action est généralement effectuée à l'aide d'une grande tige métallique comme un fer à béton par exemple.

Les bambous sont ensuite placés en position verticale, exposés au vent et au soleil, pour sécher naturellement pendant 2 à 4 mois. Le plus simple est de les placer en forme de tipi ou en appui contre un mur.

Stockage

Une fois secs, les bambous sont stockés à l'horizontal dans un espace couvert, sec et bien ventilé. Ils doivent absolument être protégés du soleil et de la pluie qui les dégraderaient prématurément.

I.2.3. Une filière courte rapide à mettre en place

La mise en place d'une filière d'exploitation et de traitement du bambou pour la construction sur le territoire réunionnais bénéficie de beaucoup d'atouts.

Un cycle de renouvelabilité rapide et un rendement élevé

Tout d'abord, le temps de régénération de la matière est court, en comparaison de la filière bois, ce qui permet de constituer des stocks matériaux et de les renouveler rapidement. Un bambou atteint sa maturité en seulement 5 ans alors que le pin met environ 30 ans et le chêne jusqu'à 80 ans avant de pouvoir être utilisé pour la construction²².

La densité d'un site de production peut aller de 1500 à 3000 chaumes par hectare. Selon les espèces de bambou cultivées cela représente une production qui peut aller de 20 à 40 tonnes de matière par hectare²³.

La rapidité du cycle de pousse combinée à la densité élevée de cannes par unité de surface rend le rendement d'exploitation de la plante jusqu'à 25 fois plus élevé que les forêts conventionnelles²⁴.

Ceci est un facteur de résilience qui permet une grande adaptation vis-à-vis de la demande et des aléas pouvant potentiellement toucher la filière. Il est tout à fait envisageable, par exemple, de cultiver une essence de bambou particulière comme ressource pour un projet donné qui aura besoin d'une grande quantité d'un bambou aux caractéristiques singulières pour des questions constructives. Pour un projet d'ampleur conséquente, qui induit des temps de conception et d'étude pouvant s'étendre sur plusieurs années entre le lancement du projet et sa réalisation, le temps de culture et de constitution d'un stock de matière peut y être intégré. Ce facteur permet de rendre la filière moins vulnérable aux aléas naturels, car il sera relativement rapide de reconstituer un stock dégradé par une catastrophe naturelle ou une attaque d'insecte.

Une simplicité de manutention

Un autre avantage incontestable de ce matériau est sa légèreté. En comparaison avec une poutre bois ou acier de même taille, il est bien plus aisé de transporter et manipuler une canne de bambou. De plus, la section des cannes ne dépasse pas une trentaine de centimètres de diamètre et 10 à 12 mètres de longueur pour les cannes de *Dendrocalamus giganteus*, qui sont les bambous les plus grands. Au-delà de cette section, on travaillera en faisceaux assemblant plusieurs entités. Dans les phases de préparation du matériau avant son

²² TRUJILLO, David, *Bamboo : 21st century steel*, TEDxCoventryUniversity, [en ligne], 20 février 2016, [Consulté le 3 janvier 2023], Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=XSuz6ukuz5s>

²³ VAN VEGESACK, Alexander, VELEZ, Simon, «Grow your own house», Vitra Design Museum, 2000, p.151

²⁴ Rendement du poids de matière / surface / an. La notion de coût ne rentre pas ici en considération, on parle seulement de la quantité de matière.

DUNKELBERG, Klaus, *Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben*, IL 31, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, 2000

assemblage sur site, on travaille donc quasiment uniquement avec des éléments manipulables à la main. Ceci engendre une forme de simplicité des procédés de traitement et de mise en œuvre.

Cette facilité à manipuler les cannes invite également à s'intéresser au potentiel de la préfabrication d'ouvrages en bambou. On peut monter et démonter facilement une ossature, préfabriquer en atelier et livrer par morceaux, sans pour autant nécessiter des moyens de levages trop contraignants.

Le poids et la possibilité de préfabrication sont des facteurs déterminants notamment pour la construction en zone peu accessible, où la plupart des matériaux sont héliportés. Ce sont des contraintes que l'on retrouve régulièrement sur les chantiers de l'île de la Réunion, territoire à la topographie accidentée, aux routes d'accès parfois étroites, sinueuses et peu praticable pour des engins de chantiers.

Du low-tech au high-tech : un équilibre entre standardisation et énergie dépensée

Si il est possible de développer une industrie lourde de transformation du matériau, comme les industries chinoises en ont fait la preuve avec la mise en place d'usines de lamellé collé à partir de lattes de bambou ²⁵, il est aussi possible de travailler ce matériau avec des outils très simples. Il est ainsi envisageable d'adapter le niveau de transformation du matériau au sein de la filière en fonction des besoins, demandes et évolutions de l'environnement constructif. A titre de comparaison pour éclaircir mon propos, ceci est impossible avec l'acier, qui à la base de son extraction et de sa mise en forme nécessite une grande dépense d'énergie et des transformations lourdes.

Une approche *low-tech* de la construction bambou, consiste à mettre en œuvre des cannes entières, en limitant au maximum les chutes et les déchets. La filière de transformation liée à ce type de mise en œuvre est très simple et rapide à mettre en place : des bains de traitement, des zones de séchage et des entrepôts de stockage.

On peut complexifier la filière de production en créant une industrie de transformation de lattes de bambou en sections lamellés collés aux géométries plus traditionnelles, des plaques de contrecollé ou encore des panneaux de copeaux de bambou agglomérés. On peut opérer le redressement de cannes arquées ou au contraire cintrer des cannes rectilignes. Ces produits transformés pour atteindre un certain niveau de standardisation nécessitent des infrastructures industrielles et un équipement machines qui mettront plus de temps à se structurer. Cependant ces étapes de standardisation des produits permettent de simplifier leur mise en œuvre et les procédés de construction par des entreprises conventionnelles.

Il y a donc un équilibre à trouver entre le degré de transformation des produits, dont la mise en œuvre sera simplifiée si ils ressemblent à des produits conventionnels (panneaux, poutres à section rectangulaire...) et l'énergie à déployer pour leur transformation.

²⁵ L'entreprise MOSO développe toute une gamme de produits en bambou lamellé collé, allant des éléments de charpente aux éléments de finition (bardage, terrasse, carrelé, faux plafond...). Voir site web *Moso Bamboo*, [en ligne], disponible à l'adresse : <https://www.moso-bamboo.com/fr/bambou/comment-les-produits-sont-fabriques/>

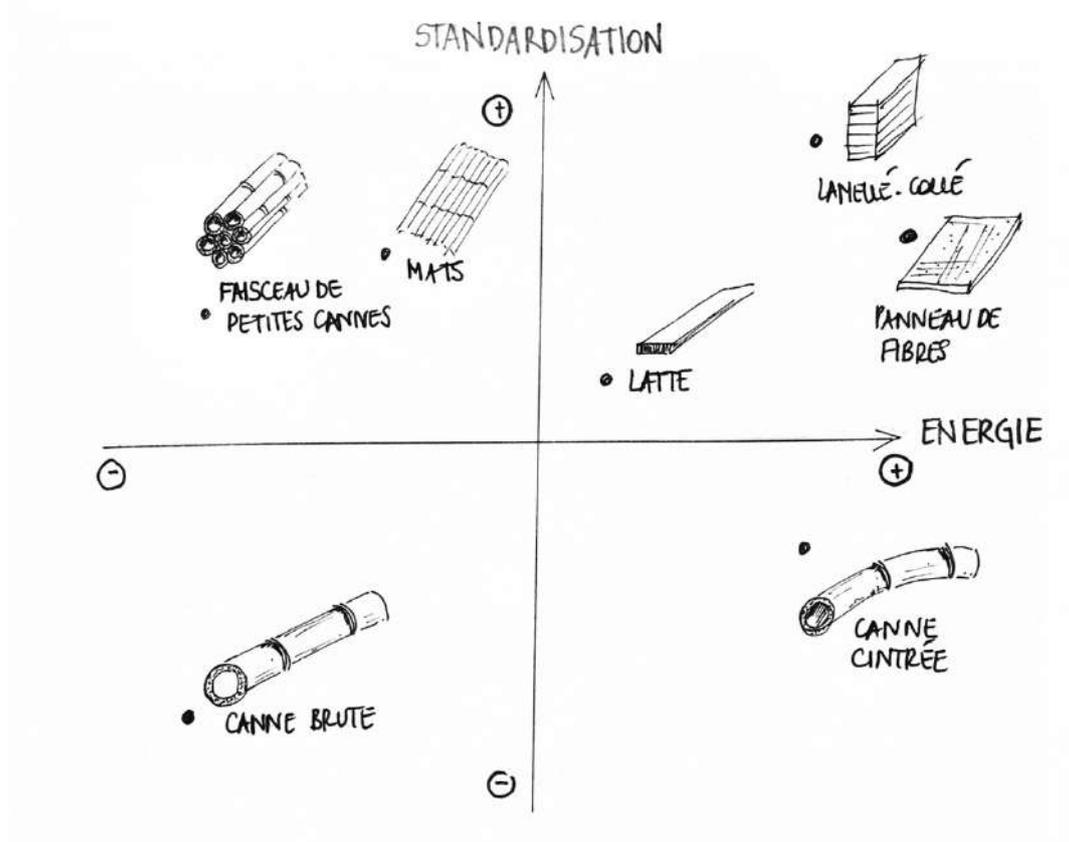


Figure 12 : Schéma représentant le rapport entre le niveau de standardisation d'un produit et l'énergie dépensée pour sa production (croquis personnel)

I.2.4. Plan de développement de la filière pour l'île de la Réunion

Imaginer comment développer le bambou à la Réunion est un travail de longue haleine auquel s'attèle le bureau d'étude *Bambooneem.re* depuis plusieurs années, disséminant avec patience les premières graines qui pourraient faire émerger la filière ²⁶.

Les ressources sauvage et génétique

L'île présente une richesse locale en ce qui concerne la ressource en bambou, même si elle n'est encore que très peu exploitée. D'un part, la ressource génétique se concentre à la bambusaie du Guillaume, dans les hauts de l'Ouest, dont la pépinière regroupe 120 espèces de bambous différentes. Cette richesse est garante d'une grande diversité de mises en culture possibles selon les besoins en matériau. D'autre part, la ressource locale sauvage est disséminée dans les forêts et les ravines, se composant majoritairement de *Bambusa vulgaris*, de *Bambus borbonicus* et de *Phyllostachys aurea*, mais comprenant aussi de belles touffes de *Dendrocalamus asper* et de *Dendrocalamus giganteus* (notamment dans les cirques).

Pour compléter la ressource sauvage difficile à exploiter pour des raisons d'accessibilité, l'heure est aujourd'hui à la plantation massive. « On a calculé que 2 % de l'espace agricole est constitué de délaissés sur les bords de champs ou emprises d'anciens andains, qui sont exploitables. 60 000 hectares de terre agricole signifient 1 200 hectares de délaissés [...] répartis sur les pourtours des parcelles. Ceci représente 240 000 pieds de bambous à raison de 50 m² par pied. La production potentielle annuelle d'une touffe est d'environ 10 cannes de bambou. On a donc un potentiel de production de 2,4 millions de cannes de bambou par an sans toucher les exploitations agricoles actuelles » ²⁷. C'est le potentiel estimé d'exploitation des seuls délaissés agricoles. Alors qu'est-ce que cela donnerait si l'on intégrait réellement le bambou aux plans de sylviculture à l'échelle de l'île ?

Les acteurs avérés et potentiels

Un certain nombre d'acteurs travaillent d'ores et déjà pour développer la filière bambou à la Réunion :

- le bureau d'étude et organisme de formation *Bambooneem.re* qui conçoit et réalise des structures en bambou et développe une activité d'import/export de matériau et de savoir-faire
- la Bambusaie du Guillaume qui a regroupé une grande diversité d'espèce et de plants qu'il met en culture et commercialise en petite quantité
- le collectif bambou
- Echobat qui met en réseau différents acteurs privés et publics de la construction pour développer les matériaux biosourcés et notamment le bambou
- l'entreprise PermaKiltire Réunion qui inclut la plantation de bambou dans une approche d'agriculture métissée et d'aménagements paysagers durables

²⁶ FUNG, Thibaut, RAT, Christophe, Schéma directeur de filière BAMBOU : Ile de La Réunion 2020-2030, disponible à l'adresse : <https://bambooneem.re/fr/plan-de-filiere-bambou-2020-2030-ile-de-la-reunion/>

²⁷ Ibib ²⁶

- le CAUE 974 qui mène une étude sur le potentiel des matériaux biosourcés, soutenant notamment le développement de la filière bambou
- Qualitropic qui mène actuellement une étude visant à développer un traitement alternatif au sel de bore avec une molécule naturelle
- L'université de la Réunion, dont les étudiants travaillent sur des essais et projets de recherche visant à caractériser la ressource bambou, les assemblages et systèmes constructifs associés
- des agriculteurs privés qui ont planté des touffes de bambou sur leurs terrains agricoles

Aujourd'hui, certains maillons pour passer de la matière première au matériau de construction manquent sur le territoire, notamment pour les phases de traitement, de stockage et l'apport d'un investissement déclencheur. Ceci permet d'identifier des acteurs potentiels qui pourraient s'intégrer au développement de la filière :

- les collectivités territoriales (Région Réunion, Département 974, intercommunalités, communes) en subventionnant des projets en bambou, en finançant les champs de la recherche et développement, en intégrant le bambou dans les projets de construction et d'aménagements publics
- FIBRES Industrie Bois, le principal importateur et transformateur de bois sur l'île, qui dispose de dispositifs industriels de traitement du bois et pourrait très rapidement et à moindre coût mettre en place une ligne de traitement/transformation de bambou
- la chambre d'agriculture, en incluant la plantation et l'exploitation de bambou dans la transition agricole en cours, en encourageant les agriculteurs à intégrer le bambou à leurs modèles d'exploitation et en finançant des structures agricoles en bambou structurel
- le CSTB ²⁸ en développant des réglementations et normes adaptées au bambou, en finançant des programmes d'essais de caractérisation, en formant les bureaux de contrôle

Les modes d'exploitation : qui fait quoi ?

Cultiver, récolter et préparer le bambou est une activité bien distincte de celle de bâtir avec ce matériau. La filière se développe à cheval entre les mondes agricole et constructif, et nécessiterait peut-être la création d'une activité intermédiaire constituant les maillons manquants de la chaîne. On peut esquisser deux principaux modes d'exploitation de la ressource qui ne sont bien sûr pas exclusifs et pourraient se compléter pour mailler le territoire :

- plantation, récolte, traitement et stockage par les entreprises agricoles sur leurs terrains avec leurs moyens d'exploitation propres; ils diversifient leurs cultures et vendent ensuite un bambou « prêt à l'emploi » aux entreprises de construction
- plantation de bambou sur des délaissés agricoles ou des portions de parcelles en concession; entretien, récolte par une entreprise d'exploitation spécialisée qui s'occupe ensuite du transport, du traitement, du stockage et de la commercialisation du matériau
- modèle mixte de coopérative, type CUMA²⁹

²⁸ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

²⁹ Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

Temporalité du développement de la filière

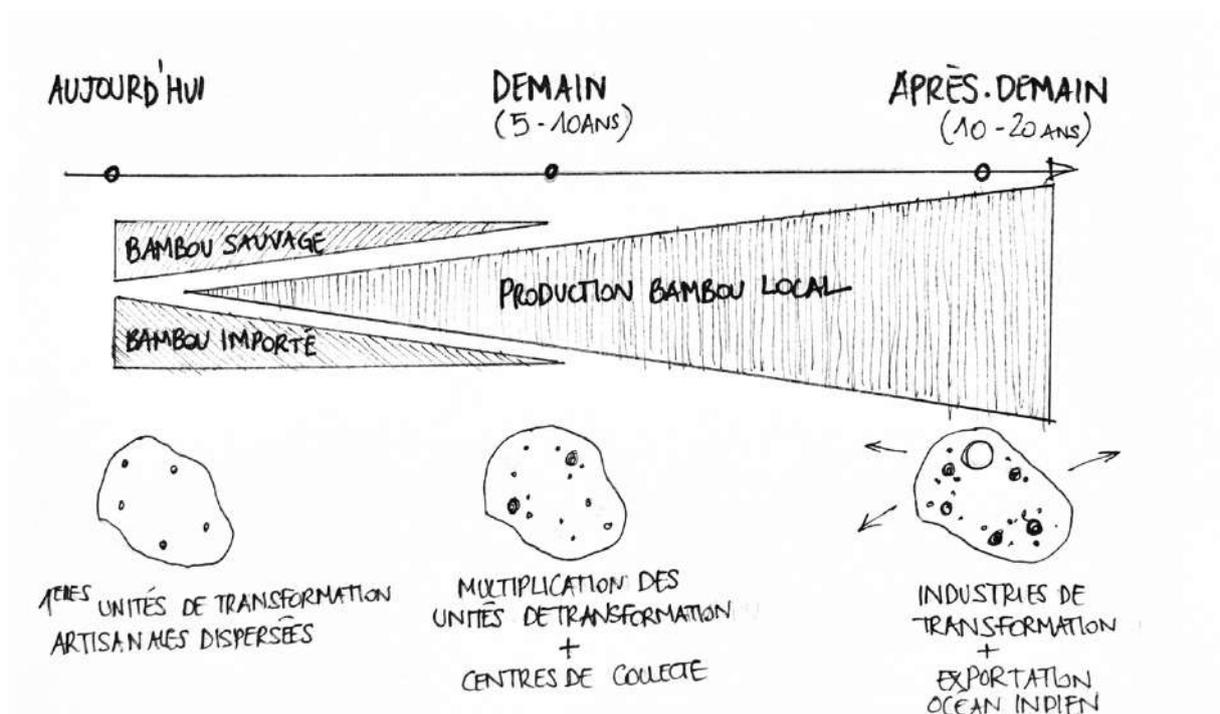


Figure 13 : Frise chronologique du développement schématique de la filière sur court, moyen et long terme (croquis personnel)

Aujourd'hui : Vision à court terme

De nombreuses touffes sauvages sont à exploiter et la bambusaie du Guillaume produit une petite quantité de bambou de construction à mettre en œuvre. En parallèle, il faut mettre en route les premières petites unités de transformation pour traiter et sécher ce bambou récolté. Il faut planter massivement de nouvelles touffes qui produiront la ressource de demain, en veillant à diversifier les essences et à les répartir sur des zones accessibles du territoire (délaisés agricoles ou urbains). L'import de matériel (de Chine, de Colombie, de Madagascar, de Mayotte) permet de compléter la ressource locale encore faible, permettant l'expérimentation constructive et la démocratisation du matériel sur le territoire.

Demain : Vision à moyen terme (5-10 ans)

Les touffes plantées hier sont arrivées à maturité et produisent une matière constructive biosourcée de qualité. L'île est maintenant autonome en matériel en ayant valorisé les délaisés des terrains agricoles. Les unités de transformation se multiplient, un réseau de collecte coopérative se met en place.

Après-demain : Vision à long terme (10-20 ans)

Le bambou est intégré dans les pratiques agricoles. Il n'est plus seulement cultivé sur les délaisés mais constitue une culture reconnue et lucrative pour les agriculteurs puisque la demande aura augmenté. Une industrie de transformation se développe pour créer des produits lamellés collés, des lattes normalisées, des panneaux tressés... La production locale pourra peut-être même s'exporter vers le reste de l'océan Indien.

I.3. Le matériau : un potentiel pour construire local et biosourcé

Les caractéristiques d'un bambou dépendent bien sûr de l'essence étudiée mais aussi de la région de pousse de la plante : le climat, la topographie, le type de sol, l'hydrographie participent à modifier ses caractéristiques physiques.

La caractérisation précise du matériau est un enjeu majeur de la filière puisqu'elle permet de mettre en place une certaine forme de standardisation et de justifier l'habilité structurelle du matériau à résister aux contraintes auxquelles il sera soumis.

I.3.1. Caractéristiques géométriques

Une des particularités des cannes de bambou est la variation de leur diamètre et de leur épaisseur de paroi. Le pied de canne présente une largeur et une épaisseur de paroi qui diminuent jusqu'à la tête de canne. C'est pourquoi, pour la mise en œuvre de doubles poutres, on associe deux cannes positionnées en tête bêche pour que la variation de leurs sections se compensent, afin d'obtenir une inertie quasiment constante sur toute la longueur de la poutre.

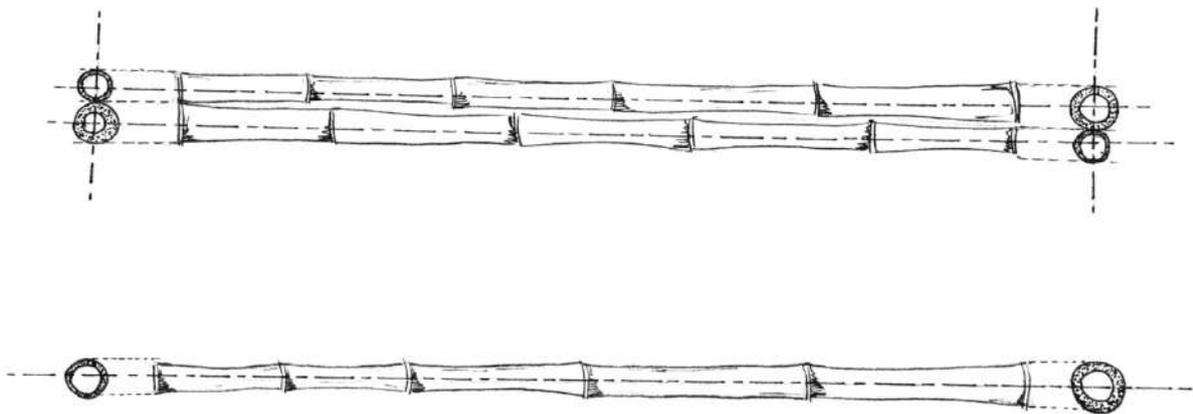
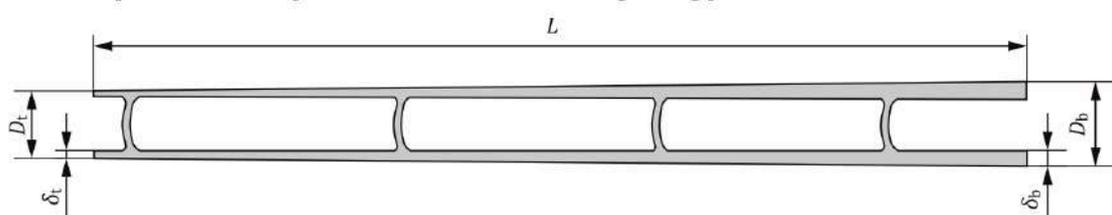


Figure 14 : Géométrie d'une canne de bambou du pied à la tête (croquis personnel)



Key

- D_b diameter at the base of the piece
- D_t diameter at the top of the piece
- L length of the piece
- δ_b wall thickness at the base of the piece
- δ_t wall thickness at the top of the piece

Figure 15 : Définition de l'effilement de la section d'après la norme ISO_19624_2018

L'aire nette d'une section est calculée de la manière suivante :

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (D - 2e)^2)$$

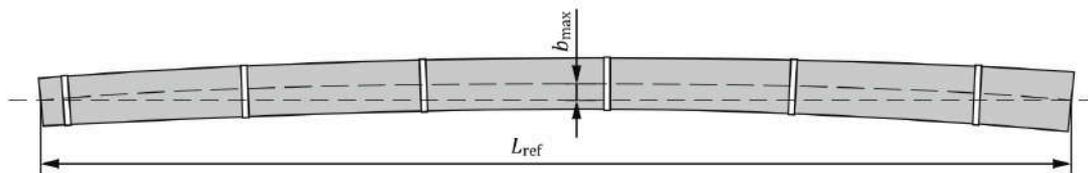
Avec,

D le diamètre extérieur de la section étudiée (en mm)

e : l'épaisseur de paroi (en mm)

Les cannes ne sont jamais exactement rectilignes. Elles présentent une courbure dans une dimension que l'on détermine de la manière suivante :

$$b_o = b_{\max}/L_{\text{ref}}$$



Key

b_{\max} maximum perpendicular distance from the centre of the culm section to the chord drawn from the centres of either end of the piece

L_{ref} reference length of the piece

Figure 16 : Définition de la courbure de la section d'après la norme ISO_19624_2018

Cette courbure naturelle peut être corrigée par des moyens techniques, notamment avec des techniques de chauffage. Mais elle peut être un atout à valoriser, par exemple, dans le cas de la mise en œuvre de poutres en flexion. La courbure naturelle augmentera la résistance à la flexion de l'élément, en s'opposant aux charges appliquées verticalement.

Cependant, il y a toujours un plan dans lequel la canne est droite, ce qui permet d'utiliser des cannes courbes pour générer une surface plane, pour des éléments de plancher ou de ceinturage par exemple.

Enfin, l'ovalité de la section est également variable. La section n'est jamais parfaitement circulaire. La géométrie des parois intérieures et extérieures varie d'une canne à l'autre, mais également au sein de la même canne.

La longueur des sections internodales est variable. Plus on monte dans la canne plus la distance internodale est grande.

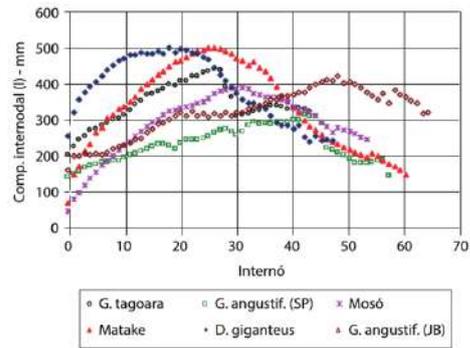
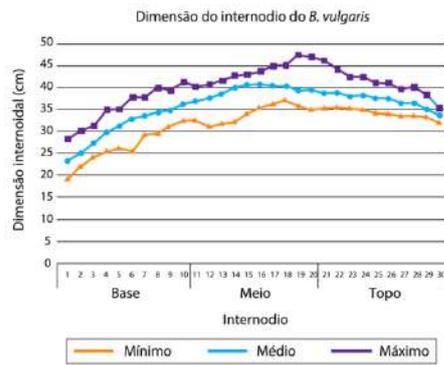


Figure 17 : Graphiques présentant les variations de la taille des sections internodales le long d'une canne et entre différentes espèces (source : Propriedades dos Bambus e suas aplicações nas obras de Engenharia, Arquitetura e Desenho Industrial, Ghavami K.)

Si l'on analyse la composition intrinsèque d'une section de bambou, elle est composée de fibres ligneuses (40%), de faisceaux vasculaires où circule la sève (10%) et de lignine (50%). Les fibres et la lignine fonctionnent comme un matériau composite. Si l'on compare au béton armé, les fibres jouent le rôle structurel de l'acier. On peut distinguer que les fibres sont beaucoup plus denses sur la périphérie externe de la section. Cette zone très dense en fibres, et donc très résistante, représente 30% de la surface de la section. La section est naturellement renforcée là où elle sera la plus sollicitée (l'extrados et l'intrados dans le cas d'une poutre). Ajoutée à la configuration tubulaire évidée de la canne qui lui donne un moment quadratique important, cette caractéristique est donc un véritable avantage structurel. Il est intéressant de noter que c'est l'inverse des grumes de bois qui, en plus d'être des sections pleines, présentent une couche d'aubier plus tendre et moins résistantes sur leur périphérie que le duramen du cœur.

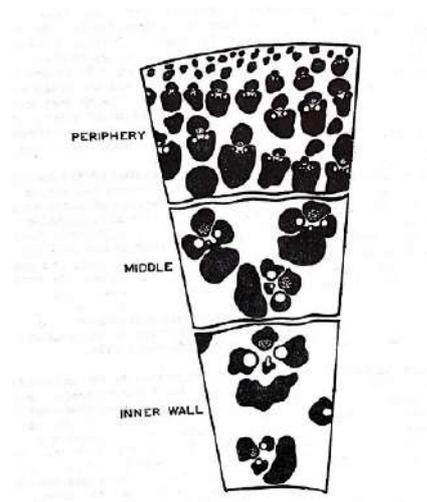
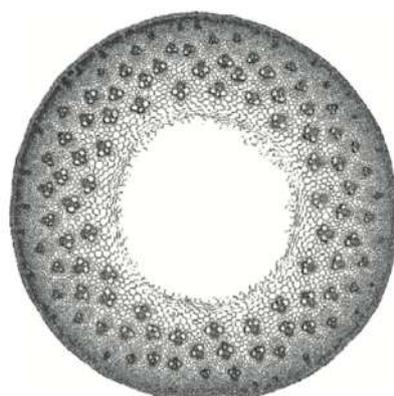


Figure 18 : Dessin d'une portion d'une section internodale de Dendrocalamus strictus, montrant la concentration des fibres sur la partie externe (source : The use of bamboo and reeds in building construction, United Nations)

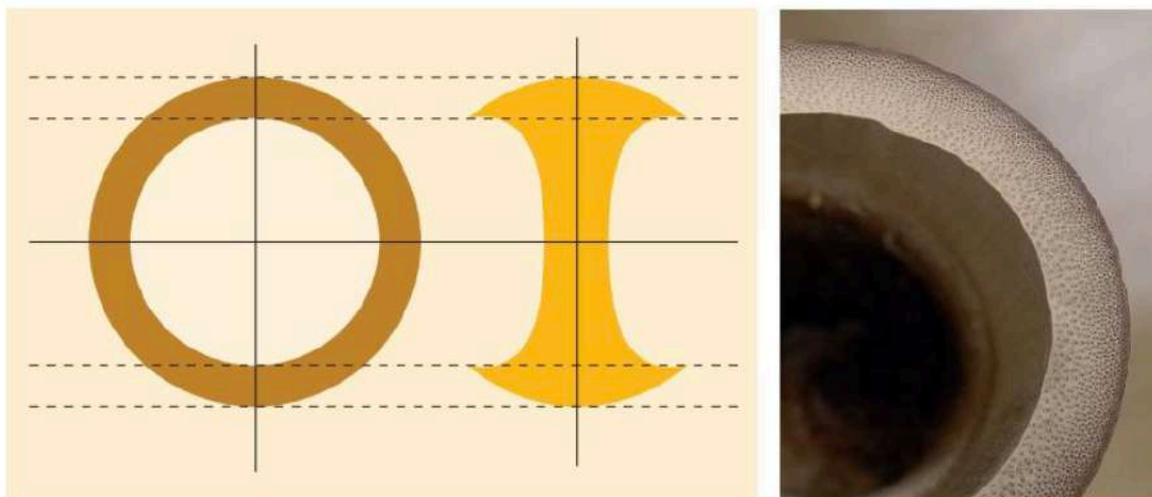


Figure 19 : Une section naturellement efficace d'un point de vue mécanique
(source : *Booming Bamboo*, Pablo VAN DER LUGT)

I.3.2. Caractéristiques mécaniques

Le comportement mécanique du bambou est difficile à définir de manière globale, puisque l'on s'aperçoit dans la littérature scientifique que les valeurs de résistance mécanique varient beaucoup d'une essence à l'autre, mais également pour une même essence selon le gisement étudié. Nous essaierons donc dans ce chapitre de caractériser le comportement mécanique du bambou en le comparant à d'autres matériaux de référence, tout en gardant à l'esprit la variabilité importante des différentes valeurs numériques sur lesquelles on s'appuiera.

La capitalisation des données issues d'essais réalisés à travers le monde représente une masse et une diversité de valeurs considérable et pourrait faire l'objet d'une étude à part entière. J'ai, pour ma part, commencé ce travail en synthétisant dans un tableau les données que j'ai rencontrées à travers mes recherches³⁰.

Module d'élasticité

Le bambou est un matériau non isotrope, on observe une variation du module d'Young au sein de la section. Une étude menée par le MIT sur la comparaison de plusieurs essences de bambou a mesuré des valeurs variant de 5 à 25 GPa³¹ pour le module d'élasticité du *Guadua angustifolia*, ce qui montre la variabilité de qualité du matériau au sein de la même espèce. Une autre étude, réalisée conjointement par l'université Valle de Cali et le CIBAM³², visant à caractériser le *Guadua* pour la construction du pavillon de Simon Velez à Hanovre, fournit une valeur de module élastique en compression variant de 13,5 à 27,7 GPa sur 65 échantillons, la moyenne étant de 21,50 GPa³³. Une étude similaire sur les bambous issus du même gisement, réalisée dans un laboratoire à Stuttgart en Allemagne, a fourni des valeurs

³⁰ Voir tableau en Annexe 2

³¹ DIXON, P.G. et al., *Comparison of the Structure and Flexural Properties of Moso, Guadua and Tre Gai Bamboo*, Construction and Building Materials 90, Elsevier Ltd, 2015, p.6

³² Research Centre for Bamboo and Vegetable Fibres

³³ MINKE, Gernot, *Building with Bamboo*, Birkhauser, Basel, 2012

sensiblement différentes, qui ont finalement été utilisées pour les calculs de structure du pavillon :

$$E_{\text{compression}} = 18,40 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{traction}} = 20,70 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{flexion}} = 17,90 \text{ GPa}$$

Certains bambous, séchés et conservés dans des conditions optimales atteignent un module d'Young de 22,5 GPa. Ainsi, le module d'élasticité du bambou est quasiment le double de celui du bois qui se situe autour de 11 GPa.

Au contraire, un bambou vert, juste après la récolte alors qu'il n'est pas encore sec aura un module d'Young de seulement 10 GPa³⁴, soit l'équivalent de celui du bois.

Ce qu'il est intéressant de comparer est le rapport du module d'élasticité et de la densité du matériau, et c'est sur ce point que le bambou est remarquable d'efficacité (voir le tableau Fig.20).

Masse

Un avantage structurel du bambou est sa légèreté, partiellement due à son évidement central. La masse volumique d'un bambou varie en 500 et 790 kg/m³, la densité médiane étant de 648 kg/m³.³⁵

En comparaison avec d'autres matériaux, le rapport des contraintes admissibles par rapport à la masse volumique nous démontre que le bambou a d'excellentes capacités de résistance pour un matériau de cette légèreté. De la même manière, le rapport du module d'Young sur la masse volumique dépasse largement tous les autres matériaux, notamment l'acier (Fig.20).

Matériau	Contrainte admissible / masse volumique [MPa / kg/m ³]	Module d'Young / masse volumique [MPa / kg/m ³]
Bambou	10 / 600 = 0,017	20 000 / 600 = 33
Béton	8 / 2400 = 0,003	25 000 / 2400 = 10
Acier	160 / 7800 = 0,02	210 000 / 7800 = 27
Bois	7,5 / 600 = 0,013	11 000 / 600 = 18

Figure 20 : Tableau présentant la comparaison du rapport résistance/poids volumique du bambou à d'autres matériaux conventionnels, (source : C. Legrand)

Résistance à la traction

Le matériau étant non isotrope, la résistance à la traction n'est pas uniforme sur toute la section. La couche externe présente une très haute résistance à la traction, due à la densité de fibres et à leur grande teneur en silice (SiO₂)³⁶. Elle peut atteindre jusqu'à 400 MPa, c'est-à-dire une résistance comparable à celle de l'acier, d'où son surnom d' « acier végétal ». Cependant, la résistance en périphérie est environ trois fois supérieure à la résistance de la partie interne de

³⁴ UNITED NATIONS, Department of Economic and Social affairs, *The use of bamboo and reeds in building construction*, New York, 1972, p.13

³⁵ *ibid* ³², p.12

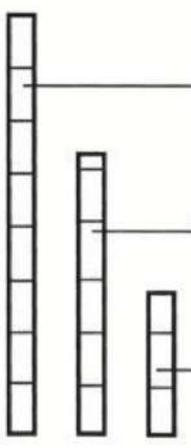
³⁶ La teneur en silice (SiO₂) est variable dans la section : fibres externes : 3,88% / fibres interne : 1,54% / noeud-diaphragme : 4,66%

la section qui descend en dessous des 100 MPa au centre. La section entière présente donc une résistance plus faible, de l'ordre de 100 à 250 MPa. Il est intéressant de noter que les cannes de petit diamètre ont une meilleure résistance en traction que les grosses cannes, car la proportion de fibres externes par rapport à la section totale est plus importante.

Des essais sur le *Guadua angustifolia* ont été réalisés par l'université de Cali et le Research Centre for Bamboo and Vegetable Fibres (CIBAM), sur des cannes de 10 cm de diamètre et d'épaisseur de paroi 1,5 cm. Sur les 163 échantillons testés, les valeurs de résistance s'étalent de 121,7 à 208,8 MPa ce qui montre l'amplitude d'écart possible entre des individus d'une même essence et d'un même gisement. Pour les études de la construction du pavillon de Simon Velez à l'exposition universelle de Hanovre en 2000, la résistance de référence qui a été prise en compte pour les calculs était de 95 MPa, prenant en compte des coefficients de sécurité très larges.

Résistance à la compression

La résistance à la compression d'une canne de bambou dépend de son élancement. En effet, une étude démontre par une série d'essais que la résistance à la compression diminue quand la taille de la canne augmente.



Length of culm sect.	Culm age (years)	Crushing strength Kg/cm ²	Base Diam cm	Wall thick. cm	Number of nodes
3 meters	1 to 3 years	Maximum 4,930	9.08	0.79	8
		Minimum 2,740	9.44	0.97	10
	3 to 5 years	Maximum 8,350	10.76	1.58	13
		Minimum 2,775	9.04	0.96	9
	more than 5 years	Maximum 16,600	13.09	1.92	13
		Minimum 3,200	9.89	0.87	9
2 meters	1 to 3 years	Maximum 10,125	11.33	1.15	7
		Minimum 3,830	7.86	0.71	6
	3 to 5 years	Maximum 12,830	11.73	1.52	7
		Minimum 5,100	9.53	1.26	7
	more than 5 years	Maximum 22,500	14.33	1.62	7
		Minimum 6,600	9.09	0.88	6
1 meter	1 to 3 years	Maximum 14,050	9.27	1.50	5
		Minimum 7,350	8.39	0.73	3
	3 to 5 years	Maximum 19,000	11.57	1.72	4
		Minimum 8,000	8.28	0.98	4
	more than 5 years	Maximum 23,650	13.50	1.55	4
		Minimum 9,910	10.23	1.20	5

Source: Martin, Mateus, Hidalgo (1981) - Total number of tested samples 129

Figure 21 : Résistance à la compression de cannes de *Guadua angustifolia* de 1m, 2m, 3m (source : *Building with Bamboo*, Gernot Minke)

Les valeurs moyennes de résistance à la compression que l'on trouve dans la littérature se situent autour de 50 MPa. Un rapport des Nations Unies propose 52 MPa³⁷ comme valeur moyenne de mesures s'étalant entre 31,5 et 72,5 MPa. Les études pour la construction du pavillon de Simon Velez à l'exposition universelle de Hanovre en 2000 prennent pour référence une résistance de 56 MPa³⁸. La résistance des bétons courants étant comprise entre 20 et 50

³⁷ UNITED NATIONS, Department of Economic and Social affairs, *The use of bamboo and reeds in building construction*, New York, 1972, p.13

³⁸ MINKE, Gernot, *Building with Bamboo*, Birkhauser, Basel, 2012

MPa, le bambou présente donc, dans les deux cas, une résistance en compression supérieure à celle du béton.

Le rôle des nœuds

Les nœuds exercent une grande influence sur le comportement mécanique d'une canne. Ils limitent la flexibilité et rigidifient la canne, augmentant la résistance dans la direction transversale aux fibres. En effet, ils permettent de reprendre 45% de charges perpendiculaires supplémentaire et 8% de charges en compression parallèle, par rapport à une section qui ne comporterait aucun nœud³⁹. De plus, dans le cas de fissuration d'une section du bambou, ils permettent d'arrêter la propagation des fentes longitudinales.

Cependant c'est une singularité du matériau qui rend sa modélisation complexe. Les nœuds sont trop importants dans le comportement d'une canne pour ne pas être pris en compte, mais ils exercent une influence trop ponctuelle pour pouvoir la discrétiser sur la longueur de l'élément.

Humidité relative

L'humidité intrinsèque de la plante varie beaucoup, passant de plus de 70% pendant sa croissance, à 20% à la fin de la phase de lignification, à 10-15% lors de sa mise en œuvre. Ceci engendre un retrait progressif à prendre en compte pendant la phase de maturation, puis pendant la phase de séchage. Entre la première année et la cinquième année de développement du chaume, on observe un retrait longitudinal pouvant aller de 4 à 14% sur la longueur de la canne, et une contraction transversale faisant varier le diamètre de 3 à 12%.⁴⁰

I.3.3. Mise en œuvre : outils et techniques d'assemblage

Le travail traditionnel du bambou ne nécessite que des outils de base très simples. Historiquement, les maisons en bambou étaient construites avec pour seul outil des machettes, avec lesquelles on pouvait réaliser toutes les opérations de base. Bien entendu, on bénéficie désormais des technologies d'outils mécanisées actuelles, mais le travail peut être réalisé avec un jeu de machines portatives assez réduit. La légèreté des cannes les rend, même les plus grosses, manipulables à la main, générant un gain de temps et de praticité. Les outils utilisés pour travailler le bambou doivent être d'une qualité supérieure car le fort taux de silice contenu dans sa peau abîme prématurément l'outillage. Une des règles d'or est de ne mettre en contact percussif que du métal contre du métal ou du bois contre du bois. Ainsi pour taper sur un bambou on utilisera un maillet en bois, tandis que pour travailler l'acier on utilisera un marteau métallique. Les outils de base du charpentier bambou sont la machette, la scie (la scie japonaise est particulièrement adaptée à la coupe du bambou), la hache, le ciseau à bois, le marteau, le maillet en bois, le couteau et les croix de différentes tailles pour fendre les bambous en lattes. L'usage de la scie cloche est particulièrement utile pour les assemblages en gueule de poisson ou les emboitements.

³⁹ DUNKELBERG, Klaus, *Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben*, IL 31, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, 2000

⁴⁰ Ibid³⁷

Les assemblages sont essentiels et doivent être parfaitement maîtrisés puisqu'ils transfèrent les forces d'un élément à l'autre et assurent la cohésion globale de la structure. Il existe une grande diversité d'assemblages, certains faisant preuve d'une épatante simplicité, d'autre développant une grande complexité au service d'une élégance constructive. Leur particularité réside dans la forme circulaire des cannes de bambou et l'absence de fibres transversales dans les sections internodales.

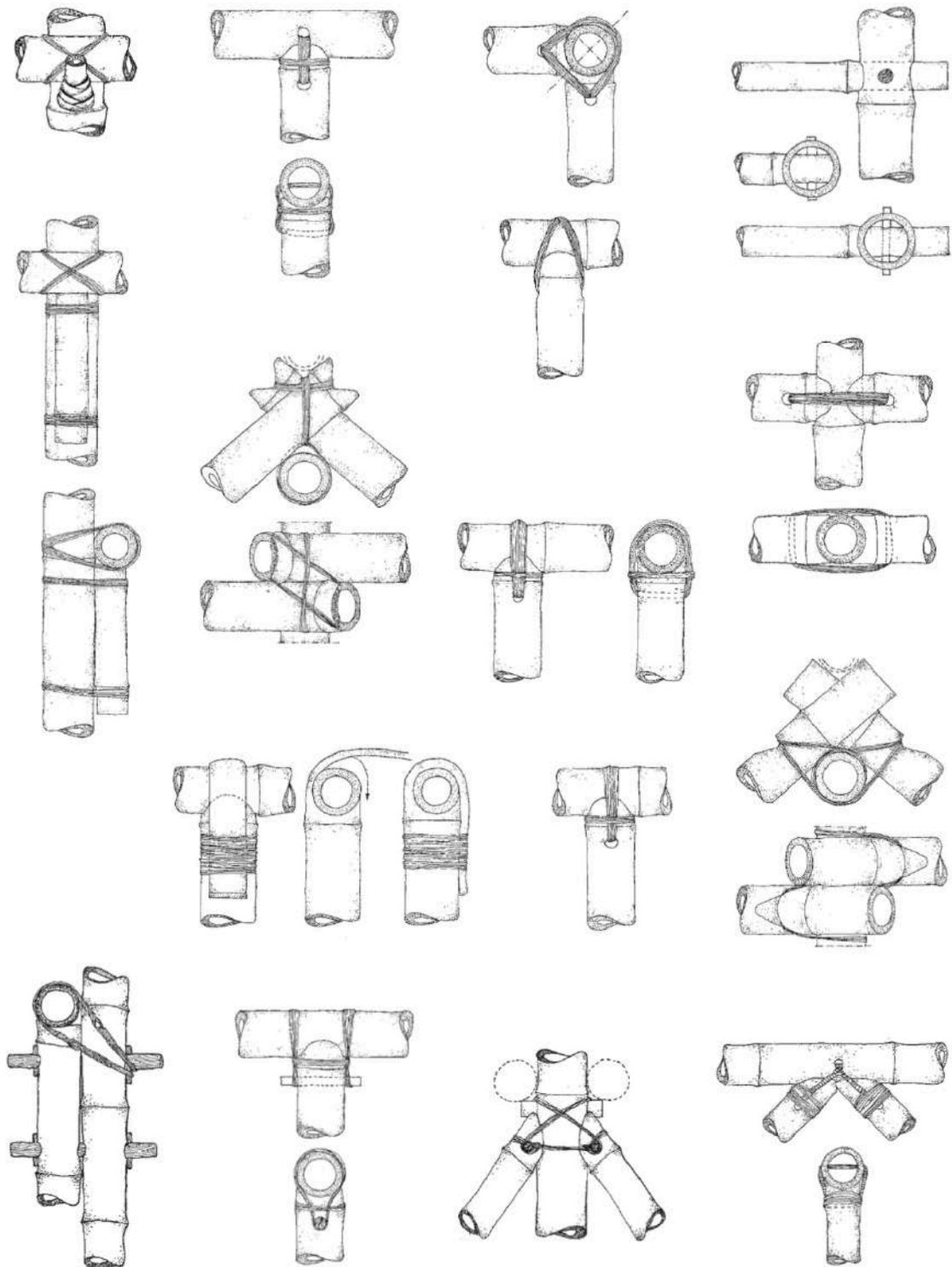


Figure 22 : Dessins d'assemblages traditionnels (source : *Building with Bamboo*, Gernot Minke)

On peut distinguer plusieurs grandes familles d'assemblage (non exhaustif) :

-les assemblages en gueule de poisson : technique particulière à la géométrie circulaire du bambou, générant un emboîtement

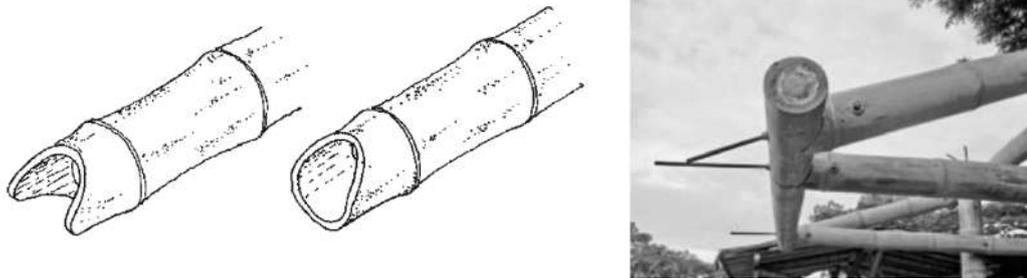


Figure 23 : Assemblage en gueule de poisson (croquis et photo, *Building with Bamboo*, Gernot Minke)

-les assemblages moisés : consistent à prendre en sandwich une barre entre deux autres barres. Les barres qui se croisent dans différentes directions peuvent être maintenues en place par des pines en bambou, des pièces de bois ou des barres métalliques boulonnées.

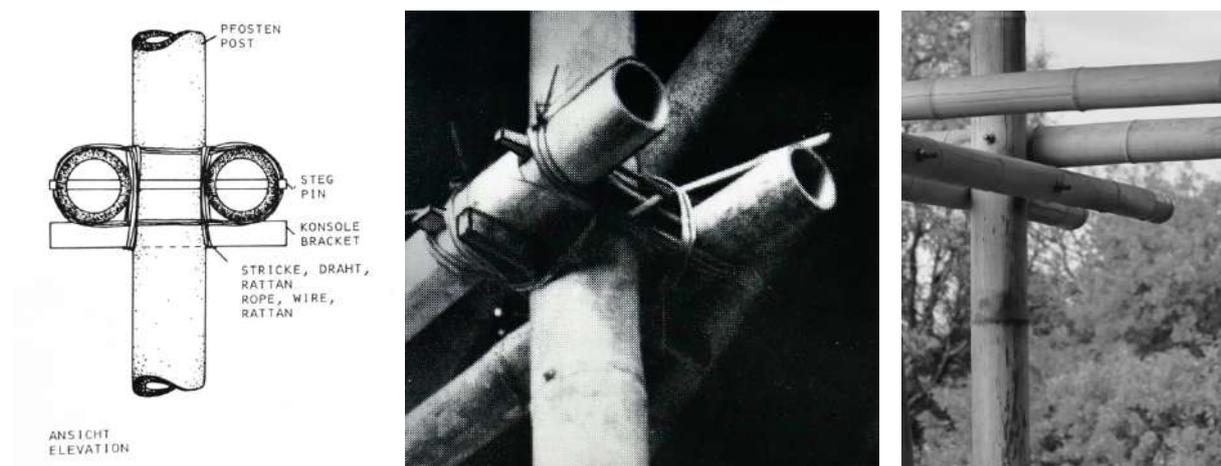


Figure 24 : Assemblages moisés (croquis *Bambus Bamboo*, photo *Bambus Bamboo*, photo personnelle)

-les emboitements longitudinaux : l'assemblage est fait par la différence de diamètre de deux pièces en bambou qui peuvent s'emboîter l'une dans l'autre. L'ajustement de ce type d'assemblage est précis et délicat.

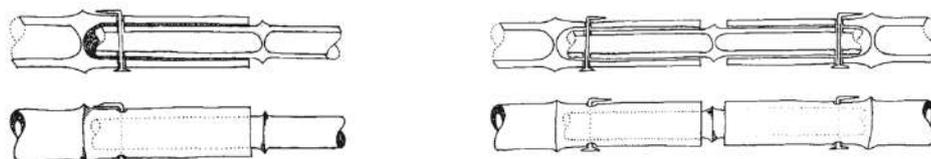


Figure 25 : Assemblage par emboîtement longitudinal (croquis *Building with Bamboo*, Gernot Minke)

-les ligatures : utilisent de la corde, souvent en chanvre, pour maintenir les pièces entre elles

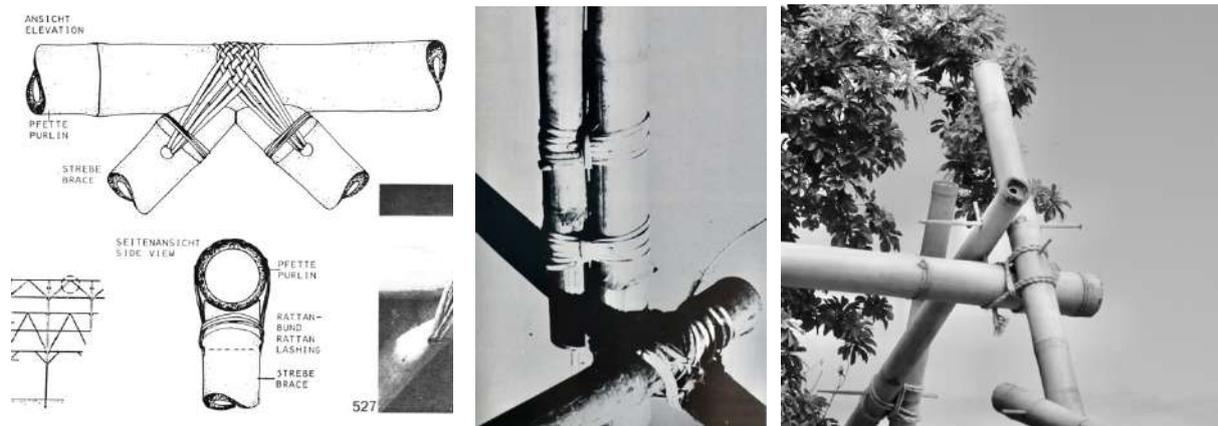


Figure 26: Assemblage avec ligature (croquis Bambus Bamboo, Photo Bambus Bamboo, photo personnelle)

-les connecteurs multipodes : assemblage qui dissocie les éléments bambou de l'assemblage, les pièces ne sont pas en contact entre elles directement mais par l'intermédiaire de platines en acier ou de plug bois.



Figure 27 : Assemblages par connecteurs métalliques (photos Building with Bamboo, Gernot Minke)

Cette liste n'est pas exhaustive, les techniques sont nombreuses et les constructeurs regorgent d'inventivité pour mettre au point de nouvelles techniques d'assemblage en fonction des spécificités de chaque chantier.

Lorsque les assemblages entre les barres sont assurés par des éléments métalliques, il faut surveiller leur corrosion, notamment lorsqu'ils sont exposés aux intempéries et aux embruns marins.

On privilégie la coupe à proximité d'un nœud au niveau des assemblages, afin d'éviter que des insectes ne rentrent et pour assurer la solidité transversale des barres au niveau des zones de transfert de charge. Si il n'est pas possible de s'arrêter proche d'un nœud, on peut ajouter un cerclage métallique extérieur ou un plug en bois intérieur pour assurer la résistance transversale de la section à l'extrémité de la barre.

En Colombie, il est courant de recourir à l'adjonction de mortier à l'intérieur des cannes au niveau des assemblages, pour garantir la non-fissuration de l'extrémité des cannes et la cohésion entre l'élément connecteur et la canne elle-même.

I.3.4. Normes et réglementations

Si des réglementations nationales sont utilisées couramment dans certaines régions du monde (Chine, Colombie, Equateur, Inde, Pérou), il n'y a pas de réglementation européenne concernant la construction en bambou, probablement parce que cette plante est rare sous les latitudes européennes. Mais cette lacune réglementaire prend une tout autre importance sur les territoires tropicaux des DOM (la Réunion, Maurice, Mayotte, Antilles), qui ne disposent d'aucun appui normatif, à la différence de leurs voisins ayant un climat similaire.

En Europe, les rares projets mettant en œuvre du bambou sont donc gérés au cas par cas. Ils font l'objet de batteries d'essai spécifiques et d'ATEX particuliers à un projet. Pour cela, les maîtrises d'œuvre s'appuient sur la base réglementaire ISO internationale, ainsi que sur des réglementations étrangères plus complètes dans ce domaine, notamment la réglementation colombienne. On pourra citer notamment comme textes de références :

Réglementation internationale :

- ISO 22156 : 2021 : Bamboo structures – bamboo culms – structural design
- ISO 22157 : Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test methods
- ISO/NP 23478 – Bamboo structures – Glued laminated bamboo – Test methods for determination of physical and mechanical properties -
- ISO 19624 Bamboo structures – Grading of bamboo culms – Basic principles and procedures

Réglementation colombienne :

- NSR-10 - chapitre 12 (mis à jour en 2010) : norme de résistance aux séismes, structures en Guadua
- NTC 5300 : récolte et traitement des cannes de *Guadua angustifolia* Kunth
- NTC 5301 : Séchage et protection des cannes de *Guadua angustifolia* Kunth
- NTC 5405 : Multiplication végétative du *Guadua angustifolia* Kunth
- NTC 5407 : Assemblages pour les structures construites en *Guadua angustifolia* Kunth
- NTC 5458 : Artisanat et mobilier en *Guadua angustifolia* Kunth
- NTC 5727 : Terminologie du Guadua

Mais ceci a des limites car la réglementation colombienne s'intéresse quasi exclusivement au *Guadua angustifolia*, espèce endémique colombienne. Au vu de la diversité des bambous et de la variabilité de leurs propriétés mécaniques, il faudrait en réalité développer une réglementation plus adaptée qui prenne en compte cette diversité.

Cette réglementation lacunaire freine certainement le développement de projets mettant en œuvre le bambou, en engendrant une grande complexité dans les études à réaliser. Prenons pour exemple le pavillon ZERI pensé par l'architecte Simon Velez pour l'exposition universelle de Hanovre en 2000. En plus d'essais de caractérisation du bambou *Guadua* réalisés en laboratoire à Stuttgart, l'architecte a dû réaliser une maquette à l'échelle 1 :1 identique au pavillon final. Celui-ci a été soumis à des essais non destructifs (lesté avec des sacs de sable notamment) pour étudier les limites et la résistance de la structure. Pour de nombreux projets de ce type, la maquette est alors utilisée comme outil de conception d'ingénierie.

Les essais de caractérisation du matériau bambou sont décrits dans la norme ISO221571:2019. La batterie de tests à effectuer pour caractériser le matériau comprend a minima :

- essai de compression
- essai de traction perpendiculaire aux fibres
- essai de traction parallèle aux fibres
- essai de flexion
- essai de cisaillement

Les normes internationales sur le bambou sont relativement récentes et sont donc à faire évoluer pour les faire correspondre au mieux aux enjeux constructifs soulevés par ce matériau. Elles sont essentielles pour renforcer la confiance dans la construction en bambou pour les maîtres d'ouvrage, les architectes, les assureurs et les contrôleurs techniques. Mais l'établissement d'une norme n'est en fait que le début du processus d'après le Pr. Harries, qui confie que « pour que la norme soit aussi utile que possible, les concepteurs doivent l'utiliser, la critiquer, la compléter et enfin contribuer à l'améliorer »⁴¹. C'est dans cette optique que la norme ISO 22156, parue en 2004, a été revue et modifiée en 2021.

Le travail du bambou revêt une dimension artisanale, liée à la non-uniformité de ce matériau vivant, qui nécessite une grande part d'intelligence humaine pour le mettre en œuvre. Il faut savoir choisir les cannes, les positionner à la juste place dans une structure en fonction de leur morphologie singulière, prévoir comment le matériau va réagir à une certaine forme de sollicitation. C'est ce qui fait l'intérêt mais aussi la complexité du développement d'une réglementation complète pour la construction bambou.

L'apparition de normes sur l'impact carbone et environnemental des constructions pourrait bien faire évoluer l'aspect réglementaire concernant ce matériau biosourcé dans les années à venir.

⁴¹ INBAR, Nouvelles du bambou et du rotin, n°4, vol.2, décembre 2021, p.5

. CHAPITRE II .
LES CONTRAINTES CYCLONIQUES EN CLIMAT TROPICAL



Figure 28 : Photographie aérienne du cyclone Firinga, 1989

Les constructions en climat tropical sont exposées à des contraintes climatiques bien différentes de celles que l'on connaît en métropole. La conception technique et architecturale des bâtiments doit donc prendre en compte ces particularités afin de construire des ouvrages durables et confortables au sein de cet environnement.

En environnement tropical, les moyennes de température sont globalement plus élevées et plus constantes, le taux d'humidité de l'air est plus élevé qu'en climat tempéré. L'équilibre thermique, un enjeu complexe du bâti tropical, repose sur différents paramètres : l'inertie, la ventilation et l'isolation. A la Réunion, dont le territoire habité s'étend de 0 à 3000m d'altitude, la question thermique est d'autant plus complexe qu'on distingue de nombreux microclimats associés aux différentes altimétries de l'île. Il faut donc garder en tête que chaque région présente un climat singulier. Il n'y a pas de recette miracle ou de stratégie unique, la conception thermique d'un bâtiment devra s'adapter au cas par cas à l'environnement dans lequel il s'inscrit.

De manière globale on peut cependant émettre quelques lignes directrices qui s'appliquent à une grande partie du territoire construit. L'inertie d'un bâtiment ne doit pas nécessairement être élevée puisque la stabilité des températures entre le jour et la nuit ne permet pas à un bâtiment massif de se décharger totalement de l'énergie calorifique accumulée la journée. On préférera, pour un habitat confortable, une structure légère à faible inertie thermique qui, couplée à un dispositif de ventilation naturelle efficace, permettra de rafraîchir rapidement le logement. La ventilation naturelle est primordiale pour évacuer l'humidité et ainsi éviter les phénomènes de condensation qui conduisent à la détérioration des matériaux. L'isolation est un paramètre controversé et la plupart des constructions ne sont pas ou peu isolées. Cependant, une couche isolante permettra de réduire leur sensibilité aux changements de température, que ce soit la surchauffe estivale sur la zone littorale ou la fraîcheur hivernale dans les *hauts* de l'île. La problématique réside dans la préservation de l'intégrité de l'isolant qui doit être correctement ventilé et mis en œuvre pour apporter une réelle amélioration du confort.

Si d'un point de vue thermique, on voudrait donc privilégier des constructions légères, plus faciles à réguler, des considérations structurelles orientent à l'inverse vers des structures lourdes, résistant aux contraintes d'arrachement qui sont généralement dimensionnantes. En effet, la principale contrainte mécanique est liée aux cyclones, engendrant d'« immenses tourbillons de vent d'une violence inouïe »⁴². Considérés comme des catastrophes naturelles, les cyclones sont des événements exceptionnels, mais qui frappent régulièrement l'océan Indien. On pourra citer, parmi les exemples récents les plus violents, le cyclone *Firinga* qui a frappé violemment l'île de la Réunion en février 1989 ou encore *Dina* en 2002. C'est aux contraintes cycloniques, particularité complexe et contraignante de la construction en milieu tropical, que s'intéresse donc la suite de ce chapitre, pour comprendre leur origine et leurs effets sur les structures.

⁴² POTHIN, Jean, *Cyclones ... Environnement - Constructions - Désordres - Remèdes*, 1990, p.15

II.1. Qu'est-ce qu'un cyclone ?

Les cyclones sont des tempêtes tropicales qui peuvent prendre différents noms. Ils sont aussi appelés *typhons* dans le pacifique ouest, *ouragans* autour de l'atlantique, *baguios* dans les Philippines et les Caraïbes ou encore *willy willy* en Australie. C'est une perturbation météorologique caractérisée par des vents violents tourbillonnants, pouvant atteindre jusqu'à 300 km/h, combinés à des pluies intenses.

II.1.1. Cyclogénèse

La formation d'un cyclone, ou cyclogénèse, est due à la simultanéité de plusieurs paramètres, dans la zone de convergence des alizés australs, venant du sud-est, et des alizés boréals, venant du nord-est (Fig. 29).

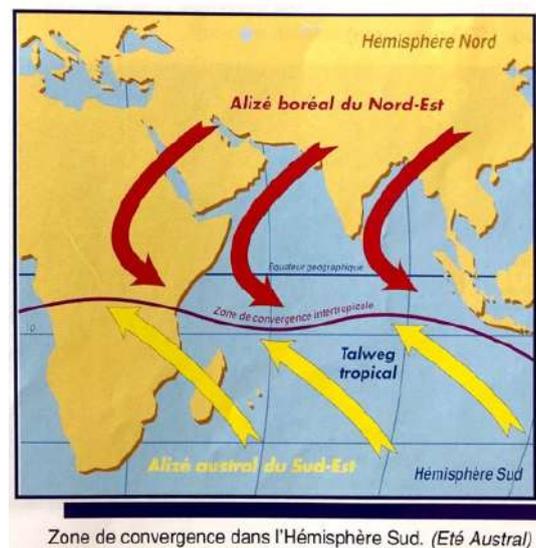


Figure 29 : Zone de convergence, zone de cyclogénèse, (source : Jean Pothin, Cyclones, p.15)

Ces dépressions apparaissent avec :

- une température élevée ($>26,5^{\circ}\text{C}$) à la surface de la mer, générant une couche d'air chaud et humide sur une grande surface marine,
- l'existence d'une dépression initiale, souvent dans la zone de convergence, dans les basses couches de l'atmosphère,
- des mouvements convectifs ascendants importants au sein de la dépression initiale,
- le renforcement des vents sur une face de la dépression, ce qui a pour effet d'accroître le mouvement tourbillonnaire,
- une zone de divergence, aussi appelée anticyclone, en haute altitude (entre 8000m et 18000m) au-dessus de la masse dépressionnaire, ce qui permet l'écoulement du flux vertical convectif et crée un fort courant ascendant.

Lorsque ces conditions sont réunies, la dépression initiale se creuse puis se déplace et s'accélère, générant des mouvements d'air de plus en plus rapides. A partir de vents de

118km/h⁴³ (force 12 sur l'échelle de Beaufort), on parle d'un cyclone tropical qui peut accélérer jusqu'à devenir un super cyclone (à partir de 300 km/h de vent).

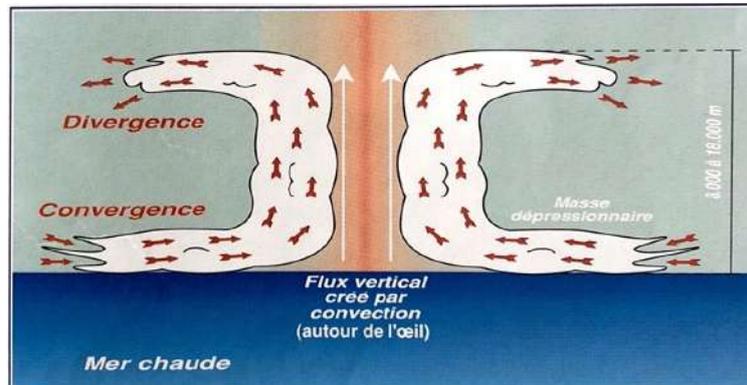


Figure 30 : Illustration de la cyclogénèse (source : Jean Pothin, *Cyclones*, p.20)

II.1.2. Caractéristiques d'une perturbation cyclonique

Une fois formé, un cyclone présente une géométrie caractéristique qui entraîne des formations nuageuses autour de son centre. L'œil du cyclone est une zone d'accalmie autour du centre de la zone dépressionnaire, qui peut mesurer de 20 à 100km de diamètre. Les conditions atmosphériques les plus violentes sont généralement observées dans la couronne de 20 à 50km autour de l'œil du cyclone. Les perturbations atmosphériques peuvent s'étendre jusqu'à 400km du centre.

Une des particularités des perturbations cycloniques par rapport à un vent à écoulement permanent est le changement de sens du vent. Il tourne de 180° de part et d'autre de l'œil du cyclone (Fig. 31). Les contraintes extrêmes subies par les structures construites, végétales ou minérales, sont soudainement inversées lorsqu'elles traversent l'œil du cyclone. Les déformations se font dans l'autre sens, renversant les efforts, cassant les fibres sur leur face opposée, la compression devient traction, la pression devient dépression. De plus, par la combinaison des actions combinées de vents complexes, l'énergie libérée par les vents cycloniques quadruple lorsque la vitesse du vent double (un vent cyclonique de 120km/h est ainsi 4 fois plus dévastateur qu'un vent dépressionnaire de 60km/h).

Les vents cycloniques sont accentués par les « effets de site » liés à la topographie. Par exemple, on observe une accélération des masses d'air par effet venturi dans les vallées encaissées. Les zones aux reliefs accidentés peuvent donc être soumises à des vents encore plus violents.

La durée de ces vents violents peut être longue et la tempête peut sévir plusieurs jours d'affilés sans faiblir. Par exemple, pendant le cyclone *Firinga*, la station météo de la plaine des Cafres a été soumise à des rafales dépassant les 150km/h pendant 15h successives et à un vent supérieur à 100km/h pendant 28h.

⁴³ Échelle de valeurs pour le sud-ouest de l'océan indien, issu de la « classification depuis 1982 des perturbations suivant l'association régionale I (Afrique) sur propositions du comité des cyclones tropicaux pour le sud-ouest de l'océan indien », source : Météo France

POTHIN, Jean, *Cyclones ... Environnement - Constructions - Désordres - Remèdes*, 1990, annexe 4, p.325

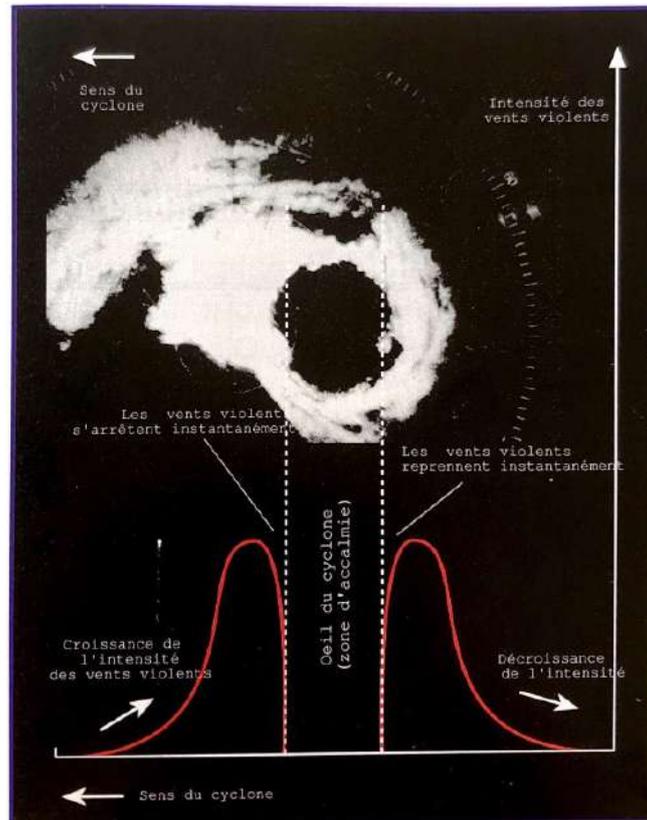


Figure 31 : représentation de la vitesse de vent dans les différentes zones de la dépression (source : Jean Pothin, Cyclones)

II.1.3. Cyclolyse

La fin d'un cyclone, ou cyclolyse, peut avoir différentes causes :

- la dépression atteint la terre et se désagrège à la rencontre du relief
- la température devient trop basse et le système dépressionnaire n'est plus alimenté en vents
- la dépression arrive dans les basses latitudes et est absorbée par le courant des perturbations polaires

En conclusion, les actions combinées du vent violent et des pluies torrentielles ont des effets dévastateurs sur les territoires traversés par un cyclone. Les vents peuvent atteindre 250 à 300km/h en vitesse de pointe ⁴⁴. Les pluies engendrent des crues soudaines et incontrôlables⁴⁵, occasionnant l'empatement de radiers, des inondations, des glissements de terrain et des éboulements. Des « raz-de-marée » dus au passage de ces tempêtes sont également dévastateurs sur les régions côtières en générant une élévation soudaine du niveau de la mer couplé à une houle violente.

⁴⁴ Un vent de 306 km/h a été mesuré le 11 octobre 1979 dans le super typhon TIP dans le Nord-Ouest du Pacifique.

⁴⁵ Au passage du cyclone Firinga en 1989, 1309mm de pluie ont été observés en 24h, à Bellecombe (Réunion)

II.2. Désordres générés par les cyclones et guides de conception anticyclonique

Ce paragraphe a pour but de décrire de manière non exhaustive les pathologies observées sur les bâtiments ⁴⁶ suite au passage d'un cyclone, dans le but d'élargir la culture constructive du lecteur. Cette liste a pour but de révéler l'effet global dévastateur d'un cyclone sur le bâti en général avant de s'intéresser plus précisément à son effet sur les ossatures en bambou. Ne sont pas abordés ici les dégâts sur l'environnement et les bouleversements de la morphologie des terrains fragilisés par l'activité humaine.

II.2.1. Action du vent sur les structures lourdes

Les vents violents provoquent des dommages irréversibles sur les bâtiments, allant de la fissuration d'un mur à une destruction complète. Les structures lourdes ont une masse qui leur confère une bonne résistance à l'arrachement, mais elles se déforment peu avant la rupture. On observe notamment :

- Le renversement des ouvrages : il peut notamment être généré par la géométrie des pignons, qui trop grands ou trop hauts, constituent une surface sur laquelle s'exerce une pression trop importante.
 - on peut noter que la géométrie de toiture à quatre pans des « kaz créoles » traditionnelles limite la taille des pignons, puisque toutes les façades sont rectangulaires et de même hauteur.
- Le glissement des ouvrages : il est dû à un mauvais ancrage de l'ouvrage. Une poussée latérale important désolidarise la structure de son système de fondation.
 - il faut absolument assurer l'encastrement de la structure aux fondations
- La fissuration ou démolition partielle des parois : sous des contraintes trop importantes, on observe la rupture totale ou partielle des surfaces perpendiculaire à l'effort de vent.
 - il faut veiller à limiter l'élancement des parois. Le cas échéant, il faut prévoir poutres, poteaux, contreforts ou chaînage si la surface de paroi est grande par rapport à son épaisseur. Il faut également prévoir des renforts autour des grandes baies qui sont des points de fragilité des parois.

II.2.2. Action du vent sur les charpentes et ossatures



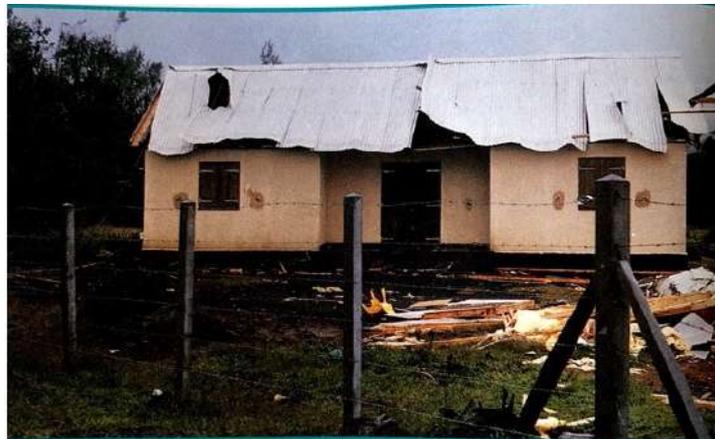
⁴⁶ Chambre des Métiers de la Réunion, *Le guide de construction en région cyclonique (clos et couvert)*, [non daté]

Les vents violents sollicitent de façon extrême les systèmes structurels d'ossature. La géométrie globale de la structure ainsi que les assemblages doivent répondre à ces efforts extrêmes.

On observe notamment :

- La déformation des portiques sous l'action des vents transversaux
→ il faut assurer le contreventement global de la structure : poutres au vent triangulées, palées verticales triangulées, diaphragmes horizontaux qui transmettent les efforts horizontaux aux refends transversaux.
- L'arrachement de la charpente
→ il faut assurer le scellement et l'ancrage de la charpente à l'ossature des murs, et établir une continuité mécanique jusque dans les fondations.
- Une fragilité au niveau des assemblages : desserrage des écrous du fait des vibrations occasionnées par les rafales de vent, rupture des soudures, arrachement des points fixations de charpente bois
→ il faut réduire l'excentrement et générer des géométries aux lignes de forces concourantes. Un contrôle du serrage doit être effectué régulièrement sur les assemblages boulonnés. Les soudures doivent être réalisées par cordons d'angles continus et les soudures par points sont à proscrire. Il faut mettre en œuvre des bois suffisamment secs, privilégier les assemblages boulonnés par rapport aux systèmes de vissage, et favoriser les assemblages en compression.

II.2.3. Action du vent sur les toitures



Les dégâts de toiture représentent 85% des sinistres observés après le passage d'un cyclone. 60% de ces sinistres sont dus à une instabilité de la charpente entière et 40% se limitent à des arrachements du système de couverture.

Il est intéressant de noter qu'aujourd'hui quasiment toutes les toitures sont en tôle (matériau léger) ou en bardeaux de bois (technique traditionnelle). On n'observe que très peu de toitures en tuiles qui sont beaucoup trop lourdes et donc vulnérables aux cyclones.

On observe donc principalement :

- la déformation ou l'envol des toitures
→ pour l'éviter, il faut assurer la solidité de la fixation d'appui des pannes, en utilisant des rondelles épaisses et larges pour éviter les effets de poinçonnement. Le

- diamètre de perçage des bois doit être limité au maximum. Il faut limiter les débords de toiture pour diminuer la prise au vent.
- le risque d'infiltration liés aux pluies cycloniques : les actions combinées de la pluie et du vent conduisent à des pluies parfois horizontales ou tourbillonnantes qui génèrent des infiltrations d'eau
 - il faut prévoir des pentes de toiture suffisantes, positionner les éléments d'étanchéité sur un support non déformable, orienter la toiture par rapport aux vents dominants, assurer la finitions étanche des rives.

II.2.4. Actions de l'eau sur le sol



Les fortes pluies qui accompagnent les cyclones créent des phénomènes de ravinement, qui peuvent éroder les couches meubles du sol et déstabiliser voire déchausser les fondations.

→ c'est pourquoi il ne faut pas s'implanter à proximité de ravines ou de talwegs, et absolument assurer le drainage autour des fondations (notamment avec des barbacanes)

→ il peut être intéressant de s'ancrer directement dans le rocher qui est souvent affleurant ou non loin de la surface du terrain

II.2.5. Action de l'eau sur les structures

Les pluies violentes et soudaines peuvent entraîner des dommages liés aux infiltrations d'eau dans les bâtiments.

On observe notamment :

- Des remontées d'humidité engendrant la détérioration des matériaux des murs (pourriture, moisissure)
 - il faut assurer la coupure de capillarité par des arases étanches (minimum 15cm au-dessus du niveau du sol, 25cm conseillés), assurer l'étanchéité des dalles de rez-de-chaussée
- La détérioration des bois due à l'humidité et au développement de champignons et attaque d'insectes xylophages
 - le choix des essences de bois est déterminant, ainsi que le type de traitement qui y est appliqué et le temps de séchage
- La corrosion des aciers de béton armé, et des structure métallique (surtout au niveau des assemblages)

→ pour le béton armé, il faut être vigilant sur la compacité et l'enrobage (enrobage minimal des aciers $c=5\text{cm}$ sur parement extérieur et $c=3\text{cm}$ sur parement intérieur) et assurer la continuité mécanique des armatures filantes. En construction métallique, il faut appliquer un traitement adapté pour limiter la rouille (galvanisation, quincaillerie inox...).

II.2.6. Synthèse

On a vu que les dommages causés par les perturbations cycloniques sont multiples. La résistance du bâti à ces tempêtes exceptionnelles dépend pour beaucoup de la qualité d'exécution. Aujourd'hui, on construit à la Réunion principalement en béton armé ou en parpaings chaînés avec du béton armé. Mais historiquement, les cases créoles étaient constituées d'une ossature bois robuste confectionnée par les charpentiers navals. L'épuisement progressif des ressources locales et la puissance des vendeurs de matériaux pétrosourcés ont peu à peu conduit l'île à s'uniformiser sur le modèle européen. On peut donc se poser, de manière légitime, la question de la pertinence d'utiliser ces matériaux sur une île tropicale.

Prenons l'exemple du béton armé pour essayer de comprendre comment il fonctionne sous une sollicitation cyclonique. Le béton est le support direct de transmission des charges, il apporte de la masse pour s'opposer aux forces d'arrachement et assure la protection des aciers contre la corrosion. Les aciers, quant à eux, absorbent une partie des efforts de compression transmis aux poteaux béton, s'opposent au flambement des poteaux, résistent au moment de flexion dans la zone tendue des poutres et poteaux. Les aciers transversaux résistent aux efforts tranchants. On utilise donc le béton pour protéger les aciers et compléter sa faible résistance en compression.

Sachant que le bambou présente une résistance en compression supérieure à celle du béton et s'approchant de l'acier en traction, il apparaît comme un matériau intéressant à mettre en œuvre dans des bâtiments exposés aux contraintes cycloniques. De plus, il présente l'avantage de ne pas être sujet à la corrosion contrairement à l'acier.

Au-delà des seules considérations constructives la plante présente le potentiel de renforcer les sols fragilisés par l'érosion par ses racines, de protéger les cultures et les constructions par sa grande hauteur. « Le bambou plie mais ne rompt pas », la touffe se déforme au passage d'un cyclone mais la plupart des cannes ayant développé un système racinaire sain se relèveront et continueront leur développement une fois la tempête passée. Ainsi ce matériau pourrait participer à accroître la résilience du modèle constructif face aux cyclones sur tout son cycle, de la pousse à la mise en œuvre.

II.3. Modélisation des vents cycloniques et effets sur les structures

Dans le contexte cyclonique que l'on vient de décrire, le critère dimensionnant des structures aux États Limites Ultimes (ELU) est donc largement le vent. Les structures travaillent très souvent à l'arrachement sous les effets de soulèvement générés par les rafales de vent.

Deux approches différentes sont possibles pour déterminer les contraintes de vent sur une structure :

- l'Eurocode 1 - Action sur les structures
- la NV65 (révisée en 2009)

II.3.1. Eurocode 1

La réglementation Eurocode se base sur une approche statistique pour déterminer une vitesse de référence avec une période de retour de 50 ans. La vitesse du vent est basée sur une vitesse moyenne sur 10 minutes à 10 m du sol en terrain de catégorie II.

Pour la Réunion, l'Eurocode préconise une vitesse de référence : $v_{b,0} = 34$ m/s

La topographie locale d'un site permet ensuite de déterminer la rugosité du terrain qui est divisé en 4 catégories :

- I : Haute mer, lacs offrant au moins 5 km de longueur au vent, régions lisses et plates sans obstacles
- II : Régions de cultures avec haies et avec quelques petites fermes, maisons ou arbres
- III : Zones industrielles ou suburbaines et forêts permanentes
- IV : Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface est occupée par des bâtiments de hauteur moyenne supérieure à 15 mètres

A partir de la vitesse de référence $v_{b,0} = 34$ m/s, on obtient les vitesses et pressions de pointe pour chaque catégorie de terrain :

Catégorie de terrain	Vitesse moyenne	Vitesse de pointe	Pression dynamique de pointe
1	40 m/s \cong 144 km/h	60 m/s = 216 km/h	2 260 Pa
2	34 m/s = 122 km/h	57 m/s = 205 km/h	2 000 Pa
3	26 m/s = 95 km/h	52 m/s = 189 km/h	1 700 Pa
4	23 m/s = 82 km/h	51 m/s = 184 km/h	1 600 Pa

Figure 32 : Vitesse et pression dynamique de pointe pour chaque catégorie de terrain à la Réunion ⁴⁷

D'après l'Eurocode 1, la vérification à l'ELU se fait en majorant de 50% les charges de vent, on aboutit donc aux pressions dimensionnantes suivantes :

Catégorie de terrain	Pression dynamique de pointe E.L.U.
1	3 390 Pa
2	3 000 Pa
3	2 550 Pa
4	2 400 Pa

Figure 33 : pressions dynamiques de pointe, pondérées à l'ELU, pour l'île de la Réunion ⁴⁸

⁴⁷ HUGODOT, Philippe, DUBOIS, Pierre, *Rapport de l'inspection générale de l'environnement*, « Cyclone Dina à la Réunion les 22 et 23 janvier 2002 : caractérisation, conséquences et retour d'expérience », Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 29 janvier 2003

⁴⁸ Ibid ⁴⁵

II.3.2. La NV65 - Neige et Vent

Cette réglementation se base sur des pressions de vent de référence à 10m au-dessus du niveau du sol, desquelles sont déduites des vitesses de vent de référence. Le territoire français est séparé en 5 zones de vent auxquelles sont associées une pression normale et une pression extrême. Ces zones sont elles-mêmes séparées entre sites dit protégés, normaux et exposés.

Les DOM, dont la Réunion fait partie, sont classés en zone 5 sur la carte des vents.

La pression dynamique qui leur est associée est donc la suivante :

$$q_{\text{normale}} = 120 \text{ daN/m}^2 \quad \text{et} \quad q_{\text{extrême}} = 210 \text{ daN/m}^2$$

Un site exposé est défini de la manière suivante : *"Au voisinage de la mer : le littoral en général (sur une profondeur de 6 km), le sommet des falaises, les îles ou presque îles étroites. A l'intérieur du pays : les vallées étroites où le vent s'engouffre, les montagnes isolées ou élevées et certains cols"*. Toute la Réunion est ainsi considérée comme un site exposé, ce qui induit une majoration de 20% de la pression dynamique avec un coefficient de site $k_s = 1,20$

D'où,

$$q_{\text{normale,exp}} = 144 \text{ daN/m}^2 \quad \text{et} \quad q_{\text{extrême,exp}} = 252 \text{ daN/m}^2$$

On en déduit ainsi les vitesses de vent de référence par la relation suivante :

$$q = v^2 / 16,3$$

d'où,

$$v_{\text{normale}} 44,5 \text{ m/s} = 159,12 \text{ km/h} \quad \text{et} \quad v_{\text{extrême}} 58,5 \text{ m/s} = 210,6 \text{ km/h}$$

en site exposé,

$$v_{\text{extrême,exp}} = 64,1 \text{ m/s} = 230,7 \text{ km/h}$$

Les vérifications aux ELU sont faites sur les valeurs extrêmes définies par cette norme, sans majoration complémentaire⁴⁹. Cette réglementation invite donc à dimensionner les structures pour résister à une pression dynamique de pointe de 2520 Pa, soit une vitesse de 230,7 km/h.

II.3.2. Comparaison et limites de ces méthodes de calcul

Une étude menée par le ministère de l'écologie et du développement durable⁵⁰ s'est attachée à l'analyse des effets du cyclone DINA, qui a touché violemment la Réunion les 22 et 23 janvier 2002. Ce rapport synthétise notamment les pressions dynamiques extrêmes mesurées par Météo France, s'élevant à :

-1700 Pa sur la station « Gillot », située à Saint Denis, sur la côte Nord, proche du littoral

-2850 Pa à la station de « La Montagne », situé sur un relief montagneux au-dessus de la mer, au niveau de l'agglomération de Saint Denis

⁴⁹ Ces valeurs sont valables pour une altitude $z < 1000\text{m}$.

⁵⁰ HUGODOT, Philippe, DUBOIS, Pierre, *Rapport de l'inspection générale de l'environnement, « Cyclone Dina à la Réunion les 22 et 23 janvier 2002 : caractérisation, conséquences et retour d'expérience »*, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 29 janvier 2003

Il est intéressant de remarquer que la pression dynamique dimensionnante aux ELU donnée par la NV65 est inférieure aux pressions réelles mesurées pendant le cyclone (NV65 : 2520 Pa < mesure Météo France : 2850 Pa). En suivant l'approche Eurocode, les sites se situeraient dans une zone de catégorie I, la pression préconisée par l'Eurocode est bien supérieure à la valeur mesurée (Eurocode : 3390 Pa > mesure Météo France : 2850 Pa). Cependant l'approche Eurocode a aussi ses limites. Basée sur une approche statistique pour déterminer la vitesse de référence (période de retour de 50 ans), elle pourrait ne plus être adaptée aux tempêtes à venir, dont la fréquence et l'intensité pourraient être modifiées par le changement climatique. Ceci invite donc à prendre des coefficients de sécurité supplémentaire en fonction de l'exposition des sites de construction.

Un scénario de modification des Eurocodes est d'ailleurs actuellement en étude pour augmenter la vitesse de référence de vent de 34 à 38 m/s, à la Réunion. Ceci pourrait engendrer une augmentation des charges de vent allant jusqu'à 20%.

La Réunion est donc un territoire au climat hostile soumis à des vents violents, à des pluies intenses, aux embruns marins corrosifs et à un soleil brûlant. Ce territoire est complexe à construire mais également complexe à cultiver. C'est pourquoi les infrastructures agricoles sont primordiales pour protéger les cultures. Mais malheureusement peu de recherche sont menées sur l'adaptation de ces structures au climat tropical, le modèle conventionnel métropolitain faisant souvent figure de modèle chez les constructeurs.

. CHAPITRE III .
LES INFRASTRUCTURES AGRICOLES
DE LA TERRE A LA SERRE



La visite de différentes exploitations agricoles sur l'île et les échanges avec des agriculteurs ont permis de mieux comprendre les modes de culture locaux et les enjeux liés aux infrastructures agricoles, afin d'établir un cahier des charges local précis pour la conception de serres en bambou structurel.

La description des modes de culture est ici synthétique et n'aborde pas la complexité agronomique en climat tropical, l'intérêt réside dans la compréhension de l'impact des modes de culture sur les infrastructures.

III.1. État des lieux des pratiques agricoles locales et influence sur les structures

III.1.1. Les différents types de culture à la Réunion

L'île de la Réunion abrite une grande diversité de techniques productives, qui se déploient aux différentes altitudes offertes par le territoire.

- le maraichage : culture de légumes pour la distribution directe aux consommateurs, représente 100 hectares dont 25% sont en culture sous serres ; un des enjeux est la gestion de l'ombrage en fonction des différents légumes cultivés et de leur altitude de production
- la culture de jeunes plants qui seront distribués aux maraichers : nécessite des tables de travail pour surélever les jeunes plans (protection, interventions et manutention), les jeunes plants sont fragiles et vulnérables aux attaques animales et climatiques
- l'horticulture et les plantes en pot pour la distribution aux jardineriers : usages ornementaux et thérapeutiques
- les vergers : culture d'arbres fruitiers, exploitation de tiges et feuilles pour distribution aux fleuristes
- la culture de canne à sucre : basée sur un modèle d'exploitation industriel de monoculture, représente 20 000 hectares (soit 1/3 des terres agricoles)
- l'élevage : on ne détaillera pas ici les différents types d'élevage car ce n'est pas le principal enjeu de l'étude, mais on le cite en considérant la reconversion potentielle des serres en hangar pour du bétail

Il est intéressant de prendre en compte la vulnérabilité des différents types de culture face aux cyclones, pour pointer du doigt celles qui ont le plus besoin de protection supplémentaire. Les dégâts relevés suite au cyclone DINA en 2002 ⁵¹ ont rapporté que :

- le maraichage a souffert à 90% : ce qui est énorme malgré le fait que c'est un secteur à récoltes pluriannuelles sous le climat tropical, ce qui donne la possibilité aux maraichers de rebondir rapidement pour relancer leur production suite à un dommage des récoltes.
- l'horticulture a souffert de 50% de pertes
- l'arboriculture fruitière a été touchée entre 15% et 100% selon les types de fruits : il est impossible d'envisager ce type de culture sous serres au vu de la taille des sujets d'arbres. Il est cependant possible de protéger les jeunes plants en pépinière.

⁵¹ HUGODOT, Philippe, DUBOIS, Pierre, *Rapport de l'inspection générale de l'environnement*, « Cyclone Dina à la Réunion les 22 et 23 janvier 2002 : caractérisation, conséquences et retour d'expérience », Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 29 janvier 2003

- canne à sucre atteinte seulement entre 15 et 20%
- élevage : exploitations avicoles sont les plus sinistrées à 70% (perte d'animaux + dégât bâtiments en construction légère).

Les principales niches de besoin en infrastructure semblent donc être le domaine du maraichage et de la pépinière, en considérant la culture des plants à ses différents stades de développement du jeune plant à la maturation pour la consommation. Les techniques de maraichage sont cependant très variées et il est nécessaire de distinguer les différents modes de culture.

III.1.2. Les différents modes de culture

On distingue deux grands modes de culture :

- la culture de plein champ : aussi appelée culture de *pleine terre* ; les cultures sont plantées sur le sol dans une couche de terre végétale. Il est nécessaire de prévoir des zones de circulation stabilisées pour l'exploitation.
- la culture hors sol : les cultures sont plantées dans un substrat artificiel séparé du sol (bacs, big bags, hydroponie, aquaponie...) en général disposés sur une grande dalle en béton.

Pour la culture en plein champ comme la culture hors sol, il est possible d'adopter une technique :

- non suspendue : les plants sont rampants, la plante garde sa forme « naturelle ».
- suspendue : les plants grimpent sur des fils qui guident leur développement en verticalité, ce dispositif nécessite une structure supportant des câbles de suspension capables de résister au poids des cultures qui vont au cours de leur croissance mettre les câbles en tension.

Enfin, chaque type de culture plein champ ou hors sol, suspendue ou non, peut se faire sous serre ou en extérieur.

Il est donc possible de cultiver de différentes manière une même plante. Ce qui détermine le mode de culture est principalement son rendement et son prix de vente qui déterminent sa valeur au sein de l'exploitation. L'espace disponible, la morphologie du terrain agricole et le climat orientent également la stratégie des agriculteurs. Les serres sont des structures coûteuses qui sont donc souvent réservées aux productions à plus haute valeur ajoutée.



Figure 34 : culture en plein champ sous serre (à gauche) culture suspendue à droite de l'image et non suspendue à gauche, culture en plein champ en extérieur (au centre), culture hors sol sous serre (à droite)
(crédits personnels)

III.1.3. Le rôle des serres sur les cultures

Les serres sont construites pour créer un environnement le plus favorable possible au développement des plantes afin de favoriser leur croissance.

- **Régulation de la température** : l'objectif est d'atteindre une température la plus constante possible, d'éviter les variations entre le jour et la nuit, mais aussi les trop grandes variations saisonnières. La gestion de la température passe par l'ombrage et la ventilation. L'ombrage est réglé soit par un système de toiles amovibles suspendues qui permettent d'ajuster le taux d'ombre voulu ou bien par chaulage⁵². Dans les bas, il s'agit surtout d'abaisser la température l'été, dans les hauts, la recherche d'apport de chaleur est plus grande.

- **Régulation de l'hygrométrie** : tout comme la température, l'hygrométrie doit être stable pour favoriser le développement des cultures. La gestion de l'hygrométrie passe par l'irrigation et la ventilation. L'irrigation dans les serres peut se faire de deux manières : par aspersion en pluie ou par un système de goutte à goutte, selon le type de culture et le stade de développement des plants. La ventilation peut être naturelle et fonctionne alors sur le principe de tirage thermique entre des entrées d'air basses et des sorties d'air hautes en toiture, positionnées de manière favorable par rapport aux vents dominants. Parfois un système mécanisé est nécessaire pour forcer la circulation d'air avec des extracteurs d'air. Un rideau d'eau positionné au niveau des entrées d'air peut être utilisé pour rafraîchir l'air entrant dans la serre.

- **Protection contre les insectes et ravageurs** : la serre est une enveloppe fermée qui permet de protéger les cultures des attaques de ravageurs. Le type de protection est défini par le revêtement de façade et de toiture. Les filets *insectproof* sont largement utilisés pour permettre la circulation de l'air tout en empêchant le passage des insectes et des oiseaux.

- **Protection contre les intempéries** : la serre est une protection contre les pluies fortes, les vents violents, les tempêtes, et à l'extrême les cyclones, qui peuvent endommager les cultures.

Ce qui ressort des échanges avec une sélection d'agriculteurs travaillant à différentes altitudes de l'île est la priorité de cultiver sous serre une production fragile à haute valeur ajoutée : les tomates et cucurbitacées surtout. Ce sont des légumes qui sont difficiles à faire pousser sur le territoire réunionnais. Ils sont victimes des ravageurs, notamment de la mouche des fruits, dans les *bas*. Ils supportent mal les grandes variations de température et le taux d'humidité très élevé des *hauts*.

⁵² Le chaulage est une technique qui consiste à asperger une solution blanche à base de chaux sur les bâches de toiture pour augmenter leur réflectivité. Ceci augmente la réverbération de la surface et réduit la quantité de lumière qui se diffuse à l'intérieur de la serre.

III.2. État des lieux et étude des serres existantes « conventionnelles »

III.2.1. Structure souple ou rigide

Il existe plusieurs types de serres qui peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Les structures souples :

Ce sont des structures légères, l'enveloppe est constituée de matériaux souples amovibles comme des bâches, des filets ou des toiles *insectproof*.

Géométrie : plusieurs géométries sont possibles mais les serres sont souvent en forme de tunnels avec ou sans pied droit. La structure métallique est composée d'éléments tubulaires.
Hauteur et portée : portée variable entre 8 et 10m, hauteur au centre entre 2,50 et 3,50m.
Cout : 50-60€/m²



Figure 35 : serres tunnel avec pieds droits, revêtement bâche plastique (à gauche : Agrilogic systems) et filet *insectproof* (à droite : exploitation Jean Vidal, Fleurimont, credit personnel)

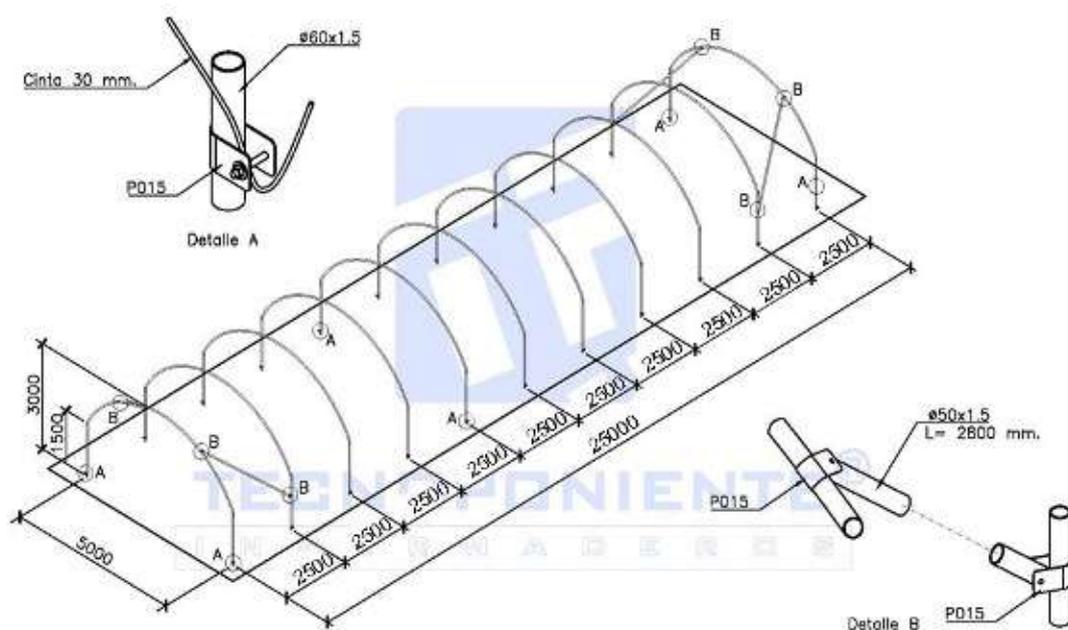


Figure 36 : axonométrie type d'une serre tunnel avec pied droit (Agrilogic systems)

- Les structures rigides :

Ces structures sont plus résistantes et supportent des parois rigides en polycarbonate ou en verre. A la Réunion, les serres certifiées « anticycloniques » sont de ce type et sont censées résister à des charges de vent importantes.

Géométrie : une travée de serre est appelée une chapelle. On trouve des serre bi-chapelles, tri-chapelles ou multi chapelles, selon les besoins des exploitations. L'adjonction de plusieurs chapelles permet de mutualiser des trames de poteaux. Les bi-chapelles sont les plus répandues à la Réunion compte tenu du besoin important en ventilation naturelle.

La forme de la toiture peut être en arc ou à 2 pans inclinés pour permettre l'ajout de panneaux solaires photovoltaïques.

Hauteur et portée : portée variable entre 8 et 12m ; hauteur sous cheneau entre 3 et 4m.

Cout : 150€/m² pour une bi-chapelle (le prix augmente pour une simple chapelle car le ratio de matériau par rapport à la surface augmente)



Figure 37 : exploitation Jean Vidal à Fleurimont (à gauche), serre Agrinea (au centre)

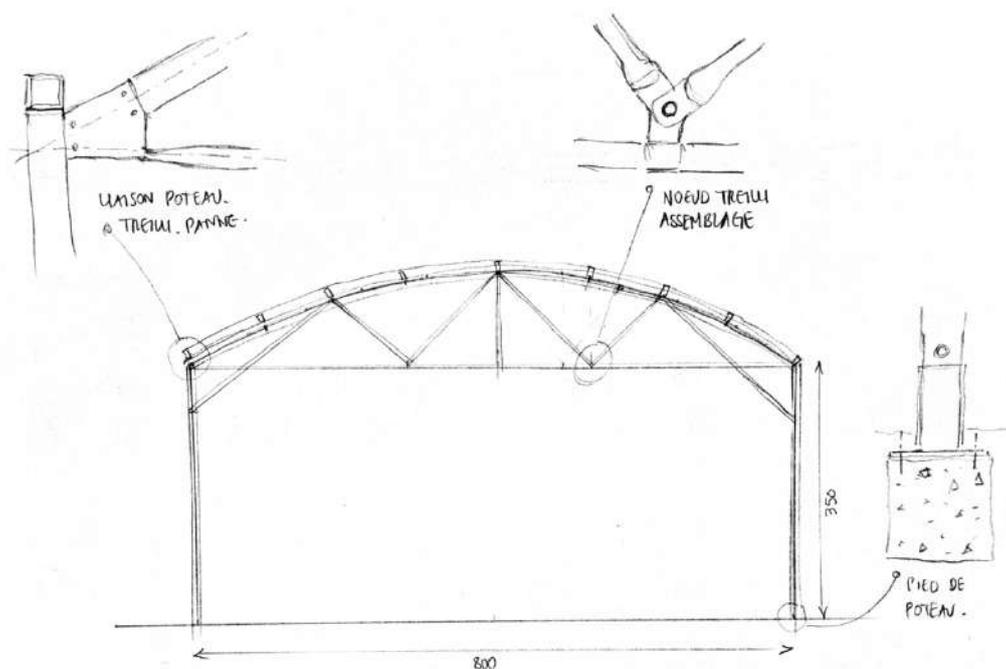


Figure 38 : Croquis d'une trame structurale de serre agricole anticyclonique (croquis personnel)

- Les alternatives en bambou existantes :

Des alternatives de serres agricoles en bambou existent, mais ces ouvrages restent ponctuels et très artisanaux, c'est souvent de l'auto-construction à l'échelle de petites exploitations qui n'ont pas les moyens de financer des structures de la grande distribution. Un des plus grands projets de ce type se situe au Nigeria, où l'entreprise *GCity Farm Venture Nigeria Ltd* a fait construire environ 80 serres agricoles en bambou. En utilisant du bambou local nigérian, le prix d'une serre a été divisé par deux par rapport aux serres métalliques⁵³.



Figure 39 : serres en bambou, Nigeria (source : AgriMag)

Cependant, on peut observer que les bambous sont mis en œuvre verts, et sont donc très probablement non traités. Ceci témoigne d'un manque de structuration de la filière, il n'y a pas de véritable chaîne de préparation du matériau de construction. Ces structures, en séchant, pourront être fragilisées et leur durée de vie réduite.

Le principal frein pour utiliser ce type de modèle à la Réunion est qu'elles ne sont pas adaptées à résister aux charges de vent générées par les cyclones, ni aux insectes ravageurs (notamment les termites qui attaquent les ouvrages en bois non traité). Le manque de standardisation de ces systèmes constructifs rend compliqué la démocratisation de ces serres à l'échelle de l'île, régit par les règles de l'administration française.

⁵³ 2466 € pour 500 m² de serre bambou au lieu de 4511 € en serre métallique.

Agriculture du Maghreb, « Les serres en bambou ont la côte », 2016 [en ligne], [consulté le 29 novembre 2022], disponible à l'adresse : <https://www.agri-mag.com/2017/06/28/les-serres-en-bambou/>

III.2.2. Les contraintes sur la structure de la serre

Les structures des serres sont, pour la plupart, en acier galvanisé et sont soumises à un lot de contraintes liées à leur usage :

- **le poids propre de la structure** : la structure supporte son poids propre, le poids de la couverture et des éventuels dispositifs d'ombrage suspendus à l'ossature primaire. Les revêtements choisis sont sélectionnés pour leur légèreté (polycarbonate, tôle, bâche, filet) ce qui permet de minimiser les sections de l'ossature porteuse.
- **le vent** : les contraintes mécaniques liées à la poussée du vent sont souvent le facteur dimensionnant de ces ouvrages légers. Elles peuvent être caractérisées par une pression/dépression sur les surfaces de façades et toiture⁵⁴.
- **le poids des cultures suspendues** : met la structure en compression via le réseau de câbles qui supporte le système de suspension. Ces câbles ont pour rôle de ramener les efforts de traction directement dans les poteaux (dans les angles de préférence). Ce type de charge peut être favorable en cas de tempêtes puisqu'il s'oppose aux forces de soulèvement et participe à garder la structure en place.
- **récupération des eaux pluviales** : la récupération des EP est un enjeu majeur puisqu'elle participe à réduire la consommation d'eau du réseau pour l'irrigation en redistribuant directement l'eau de pluie. Il faut donc intégrer des cheneaux bien dimensionnés et un réseau permettant d'acheminer l'eau jusqu'à une cuve de stockage (si possible en haut du terrain pour utiliser la gravité pour la redistribution). En cas de forte pluie, l'eau accumulée dans les cheneaux est une charge supplémentaire à prendre en compte dans le dimensionnement de la structure.
- **l'humidité** : le taux d'humidité de l'air intérieur est élevé car les cultures sont irriguées de manière régulière et s'y ajoute le phénomène d'évapotranspiration des plantes. Les éléments de structure sont également exposés à l'aspersion d'eau directe quand l'irrigation se fait par aspersion en pluie. Ceci génère une exposition prolongée à l'eau de la structure, des pieds de poteaux notamment. On observe sur les structures métalliques une corrosion des pieds de poteaux qui peut se propager aux aciers des massifs de fondation. Pour pallier à ce problème, une couche d'étanchéité bitumineuse est régulièrement appliquée sur la base des poteaux métalliques.
- **produits chimiques** : dans le cas d'exploitations non biologiques, des produits de synthèses pesticides, insecticides et fongicides sont aspergés régulièrement dans la serre et viennent au contact de la structure. On observe que ces produits attaquent le métal des structures notamment au niveau des pieds de poteau.
- **automatisation des systèmes** : les systèmes d'irrigation, d'ouverture des ouvrants, de ventilation, d'ombrage peuvent être automatisés en lien avec une série de capteurs, pour une gestion plus simple et efficace de l'environnement de culture. Il faut donc intégrer des réseaux de câbles et d'instrumentation ainsi qu'une zone de contrôle. Cependant, une gestion manuelle doit toujours être possible pour pallier aux problèmes d'alimentation électrique, notamment en cas de tempête.

⁵⁴ cf chapitre II : caractérisation des vents cycloniques

III.2.3. Coût économique et environnemental de l'investissement

Pour évaluer le potentiel de développement de serres en bambou, il faut prendre en compte l'intégralité du cycle de vie de la serre et pas seulement le coût économique brut de la structure primaire.

Coût matériaux de structure

Serre structure rigide en acier : environ 150 €/m²

Serre en bambou : 230 €/m²

Ce premier chiffrage de serre en bambou se base sur les prix du bambou importé, car au vu de l'état actuel de la filière locale, il est impossible de s'appuyer sur des standards de bambou péi. Ce coût pourra être significativement réduit au fur et à mesure du développement de la filière. Au contraire, le prix des structures en acier est amené à augmenter du fait de l'augmentation des coûts de la matière première et de l'énergie pour la transformer et la transporter.

Les infrastructures agricoles sont pour beaucoup financées par un système public de subventions. Le coût est donc moins un frein que la durabilité de ces ouvrages pour les agriculteurs qui investissent dans ce type d'ouvrage.

Coût terrassement et fondations

Aux coûts de structure, il faut ajouter les travaux de terrassement et de création des massifs de fondation pour assurer l'assise de l'ouvrage. Ils sont à peu près équivalents pour les deux types de structure, car les mêmes techniques conventionnelles sont utilisées. Cependant, les entreprises proposant la construction de serres conventionnelles sont souvent basées en métropole et s'adaptent peu au terrain particulier à chaque exploitation. La flexibilité et la modularité des structures en bambou pourraient permettre de mieux s'adapter à chaque terrain et donc de réduire notablement les coûts de terrassement.

Coût main d'œuvre

Le coût de main d'œuvre peut être considéré comme équivalent pour les deux configurations de serre. Développer une solution préfabriquée « en kit » pourra permettre de diminuer les temps de main d'œuvre sur site et est donc une priorité pour proposer une solution concurrentielle.

Coût maintenance

Les structures en acier sont particulièrement sensibles à la rouille et au phénomène de corrosion, surtout si elles sont exposées aux intempéries et aux embruns marins comme c'est le cas sur une grande partie du territoire réunionnais. De plus, les structures sont exposées de manière quasiment constante à l'humidité intérieure élevée de la serre et potentiellement à

des pesticides pour certains types de culture. La protection des éléments structurels se fait par l'application de peintures spéciales très coûteuses (30€/L) qui stoppent la corrosion.

Les structures en acier sont davantage sensibles au flambement et à la fatigue que les autres matériaux. Dans le cas d'une exposition répétée aux cyclones qui engendrent des efforts de traction très élevés dans les barres, l'acier peut perdre en résistance, et à l'extrême même perdre sa ductilité. Il devient alors susceptible de subir une rupture fragile. Dans ce cas de fragilisation des structures, la solution adoptée est souvent l'ajout de colonnes en acier supplémentaires pour rigidifier la structure primaire. Ce type d'intervention peut s'avérer coûteuse en matière et demande une main d'œuvre spécialisée.

Le bambou demande un entretien régulier mais peu coûteux et qui peut être réalisé par l'exploitant lui-même. Il s'agit d'appliquer annuellement un mélange d'huile de lin et de térébenthine pour renforcer la peau extérieure du bambou et prolonger sa durabilité. Si une pièce présente une faiblesse, il sera possible de la remplacer ou de la renforcer sans changer l'intégralité de la structure.

Coût carbone

Une étude de l'ADEME ⁵⁵ sur le patrimoine bâti français révèle que les bâtiments agricoles sont, avec les bâtiments industriels, les constructions qui ont le facteur d'émission de CO₂ le plus élevé, s'élevant à 220 kg eq CO₂ /m² (fig. 34) ⁵⁶. Puisque les bâtiments agricoles représentent plus de 10 millions de m² construits par an ⁵⁷, il est primordial de s'attacher à réduire l'impact de ce secteur de la construction.

Type de bâtiment	kg équivalent CO2 par m ²	
	Construction métallique (hangar...)	Construction béton (immeuble de bureaux)
Bâtiments agricoles	220	656
Bâtiments industriels	275	825
Garages	220	656
Commerces	183	550
Enseignement	147	440
Santé	147	440
Loisirs	169	506

Facteurs d'émission au m² des bâtiments en fonction de leur type et de leur activité.

Figure 40 : facteurs d'émission au m² des bâtiments en fonction de leur type et de leur activité (source : ADEME)

Si l'on s'intéresse à l'impact carbone de la construction d'un ouvrage en bambou, il présente un double avantage. D'une part, il stocke du carbone puisque le matériau, par sa composition organique capture du carbone qu'il garde tant qu'il reste intègre ⁵⁸. En fin de vie, un élément de construction en bambou pourra être réduit en copeaux puis brûlé pour produire de l'énergie. Il relâchera alors du CO₂ dans l'atmosphère mais aura remplacé la combustion d'un

⁵⁵ ADEME : Agende De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

⁵⁶ Bilan GES, ADEME, [en ligne], [consulté le 06 janvier 2023], disponible à l'adresse : https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?batiments.htm

⁵⁷ Chiffre issu d'une étude du CNRS menée en 1998 sur la répartition des bâtiments mis en chantier en 1990, comptabilisait 12 733 000 m² de bâtiment agricole (source : ADEME)

⁵⁸ L'ADEME considère que si l'objet construit a une durée de vie supérieure à 10 ans et que l'exploitation pour produire la matière première est gérée durablement (ressource renouvelée, pas de déforestation) alors le matériau peut être considéré comme un puit de carbone.

combustible fossile non renouvelable. D'autre part, il sauve du carbone par substitution à un matériau pétrosourcé très consommateur de carbone et d'énergie fossile pour sa production.

Une étude d'analyse de cycle de vie menée par l'INBAR⁵⁹ a établi une base de données chiffrée pour évaluer l'impact carbone de produits manufacturés en bambou. L'analyse est basée sur une filière de production chinoise transformant du bambou Moso en lattes, mats, et lamellé collé, pour constituer des éléments de plancher et de façade. Cette étude prend en compte l'intégralité du cycle de vie du matériau (fig. 41).

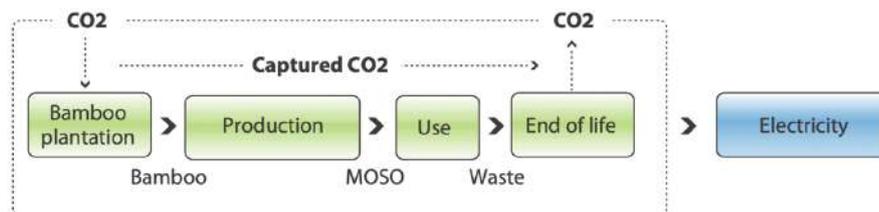


Figure 41 : Cycle d'absorption et d'émission de CO₂ d'un produit manufacturé en bambou (source : INBAR)

Le tableau suivant présente la synthèse du calcul de l'empreinte carbone des différents produits en bambou en comparaison de matériaux de construction conventionnels.

Carbon footprint (CO ₂ e per kg product)	Density (kg/m ³)	Production cradle to gate	End of Life small elect. power plant (32% efficiency)	Carbon seq based on land use change	Total / kg	Total / m ³
Flattened bamboo (d.m. 90%)	850	0,620	-0,704	-0,6370	-0,721	-613
Plybamboo (Caramel) (d.m. 90%)	700	1,018	-0,704	-0,6290	-0,315	-220
SWB indoor (Natural) (d.m. 90%)	1080	0,878	-0,704	-0,6230	-0,449	-484
SWB outdoor (d.m. 90%)	1200	1,193	-0,704	-0,6070	-0,118	-141
Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant/RER 5 (d.m. 90%)	460	0,260	-0,817	-0,1700	-0,727	-334
Idemat2014 Meranti plantation	640	0,710	-0,704	0,000	0,006	4
Idemat2015 Meranti natural forest	640	3,950	-0,704	Included in prod	3,246	2077
Idemat2014 PVC (Polyvinylchloride, market mix)	1380	2,104			2,104	2904
Idemat2014 Steel (21% sec = market mix average)	7850	1,838			1,838	14429
Idemat2014 Aluminium trade mix (66% prim 33% sec)	2800	11,580			11,580	32423
Idemat2014 Concrete (reinforced, 40 kg steel per 1000 kg)	2400	0,231			0,231	554

Figure 42 : Empreinte carbone sur l'intégralité du cycle de vie (en kg CO₂e / kg ou /m³ de matériau) de différents matériaux de construction (source : INBAR)

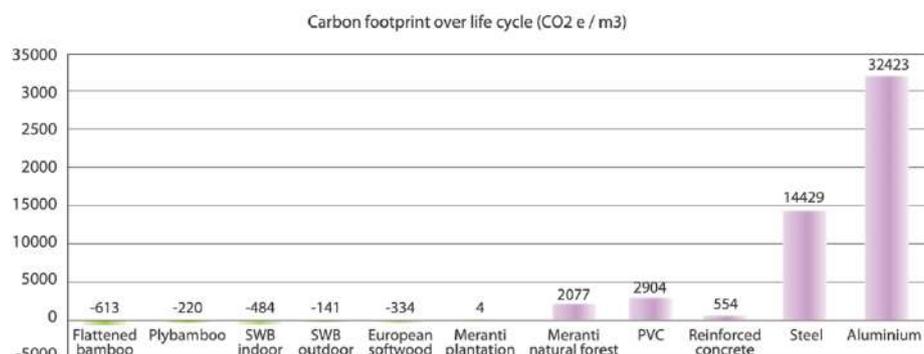


Figure 43 : Graphique présentant la comparaison de l'empreinte carbone de différents matériaux de construction (en kg CO₂e / kg ou /m³ de matériau) (source : INBAR)

⁵⁹ INBAR : International Network for Bamboo And Rattan
 VAN DER LUGT, Pablo, VOGTLANDER, J.G., *The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products, Life-cycle assessment and carbon sequestration*, INBAR Technical Report n°35, 2015

En se basant sur ces données, on peut par un simple calcul comparer l’empreinte carbone d’une structure de serre conventionnelle en acier galvanisé à celle d’une structure en bambou ayant la même emprise. La comparaison est réalisée sur les seuls éléments de structure (poutres, poteaux, barres de contreventements, pannes), en faisant l’hypothèse que dans les deux cas la quantité d’éléments de quincaillerie pour les assemblages est équivalente. Le quantitatif des éléments de charpente métallique se base sur des observations faites sur des serres anticycloniques existantes à Fleurimont (commune de Saint Paul, La Réunion). Le quantitatif des éléments de charpente bambou se base sur un des modèles de notre étude de faisabilité.

Pour une serre de 50 m², on mettra en œuvre environ 720 kg d’acier ou bien 210 kg de bambou. On prend pour référence de l’empreinte carbone des matériaux les valeurs de l’étude présentés ci-dessus. L’acier émet 1,838 kg eq CO₂ / kg. On prend pour le bambou la valeur calculée pour les mats⁶⁰ (nommés « *flattened bamboo* » dans l’étude) qui absorbe 0,721 kg eq CO₂ / kg. En réalité, la valeur d’étude prise pour le bambou est largement minorée puisqu’elle caractérise un matériau récolté en Chine, transformé de manière industrielle et mis en œuvre en Europe. Dans le cas des serres, le matériau serait, à terme, récolté et mis en œuvre au même endroit à savoir la Réunion (maximum 200km de transport). Cette valeur pourrait donc être ajustée pour avoir une valeur plus favorable au bambou, mais nous garderons la valeur d’étude de l’INBAR pour les calculs qui comprennent donc une marge défavorable.

	Acier	Bambou
Volume de matériau (m3)	0,1	0,3
Masse volumique (kg/m3)	7850	700
Masse de matériau (kg)	720	210
Emprunte carbone matériau (kg eq CO ₂ / kg)	1,838	-0,721
Emprunte carbone de la serre (kg eq CO ₂)	1320	-150
Emprunte carbone ratio au m ² (kg eq CO ₂ / m ²)	26	-3

Figure 44 : Tableau présentant la comparaison de l’impact carbone d’une structure de serre de 50m² en acier ou en bambou

Ainsi la structure d’une serre de 50m² en acier produit 1,32 tonnes CO₂ eq, soit un aller-retour entre Paris et la Réunion d’une personne en avion ou encore les émissions annuelles moyennes d’un français pour le chauffage de son domicile⁶¹. Alors que construire cette structure en bambou, c’est stocker 150 kg CO₂ eq. Sachant que les surfaces d’exploitation sous serre font en moyenne entre 600 et 1000 m² à la Réunion, construire une telle surface en acier revient à émettre 15 tonnes de CO₂, alors que construire en bambou revient à absorber 1,8 tonnes de CO₂.

⁶⁰ Les mats sont des bambous transformés en panneaux plan par fendages multiples, après traitement et séchage. C’est un des produits transformés qui utilise les moins de d’énergie, qui se rapproche donc le plus des cannes entières mises en œuvre dans le projet de serres étudié, en terme d’empreinte carbone.

⁶¹ Calculateur d’émissions de gaz à effet de serre de l’aviation, Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, Ministère de la Transition Energétique, disponible à l’adresse : <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr>

D'un point de vue de l'impact carbone, le modèle de serre en bambou est donc bien plus intéressant que les serres métalliques. Si l'on relie cette observation à une potentielle augmentation de la prise en compte de l'impact carbone des constructions via une taxe ou des obligations de compensation, c'est un paramètre qui pourrait rapidement devenir prépondérant dans les choix constructifs.

Synthèse

Tableau récapitulatif de la comparaison entre une structure conventionnelle en acier et une structure innovante en bambou (+ avantage / -inconvenient)

Pour une serre de 50 m ²	Acier	Bambou
Logistique et approvisionnement		
Volume de matériau (m ³)	0,1 + transport bateau (conteneur)	0,3 -transport bateau (conteneur)
Masse de matériau (kg)	720 -mise en œuvre -transport par camion	210 + mise en œuvre + transport par camion
Distance parcourue entre site de production et chantier (km)	10 000 km	200 km max
Coûts		
Prix structure (€/m ²)	150	230
Prix fondation et terrassement	Standard	Minimisé
Prix maintenance	Elevé : peinture anti-corrosion + main d'œuvre	Faible : huile de lin et thérébenthine + entretien facile
Impact environnemental		
Emprunte carbone de la serre (kg eq CO ₂)	1320	-150
Emprunte carbone ratio au m ² (kg eq CO ₂ / m ²)	26	-3
Fin de vie	-déchet à traiter	+biodégradable

Ce tableau permet de rendre compte de la multiplicité des critères à considérer pour comparer ces deux approches de la serre agricole. Le prix de construction de la structure est un critère souvent décisionnel pour les maitrises d'ouvrage, mais les questions de transport de maintenance et d'impact environnemental sont également à prendre en compte pour un investissement durable.

III.3. Élaboration d'un cahier des charges répondant aux enjeux agricoles locaux

Dans le contexte agricole réunionnais que l'on vient de décrire, le bambou s'affirme comme une solution durable aux problématiques infrastructurelles. Sous l'impulsion de multiples sollicitations d'acteurs du monde agricole, ce projet est une opportunité de construire un processus d'innovation répondant aux logiques d'économie circulaire et de développement du bâti tropical réunionnais, afin de développer la filière bambou au service du monde agricole.

L'aspect innovant de la démarche n'est pas seulement d'associer le bambou aux infrastructures agricoles, chose qui a été faite maintes fois dans différentes régions du monde à travers les âges. Le but est de développer un modèle viable, dont on puisse prouver la durabilité et la pertinence dans le système économique local actuel.

III.3.1. Définition des enjeux

Le projet répond à deux enjeux majeurs :

- Réduire la dépendance des agriculteurs réunionnais à l'importation des matériaux de construction, à la fois coûteuse et consommatrice d'énergie

Le premier objectif du projet est de proposer une alternative durable aux ouvrages agricoles conventionnels pétrosourcés et monofonctionnels. La mise en œuvre du bambou, matériau biosourcé qui présente de nombreux potentiels sur les plans constructif et écologique, participe à accroître l'accessibilité et la durabilité de ces ouvrages. Son utilisation structurelle permet de réduire les coûts de construction liés aux matériaux en s'approvisionnant localement. Cet approvisionnement s'intègre aux circuits d'économie circulaire en stimulant la filière bambou en développement sur l'île. C'est un véritable levier pour développer un modèle viable économiquement qui se pérennise sur le territoire.

- Développer un système constructif résilient avec un matériau biosourcé

Le second objectif de ce projet novateur est de proposer un modèle d'ouvrage agricole présentant une capacité de polyvalence dans les usages qu'il accueillera, d'adaptabilité au terrain et au besoin en infrastructure de chaque exploitation, de reconversibilité dans le temps et de robustesse face aux contraintes cycloniques.

L'utilisation du bambou, matériau biosourcé à croissance rapide, permet de réduire considérablement l'impact carbone de ces constructions par rapport aux structures métalliques et plastiques conventionnelles. Le bâtiment stocke du carbone qu'il relâchera en étant rendu à la terre à sa déconstruction.

A ces enjeux globaux s'ajoutent des enjeux de site, propres à chaque exploitation : adaptation au terrain et sa topographie, proximité avec un espace naturel protégé, contraintes particulières dues à l'altitude du site ou à son accessibilité...

La conception doit donc être guidée par plusieurs critères, construisant la stratégie d'une conception résiliente.

III.3.2. Règles de conception

Économie de matière

Des considérations écologiques et économiques nous invitent à optimiser la matière extraite et mise en œuvre. La structure proposée devra être économe en matériau, mettant en œuvre le minimum de matériau pour un maximum de résistance. L'étude de plusieurs modèles structurels permettra une comparaison détaillée pour déterminer celle qui sera la plus optimisée.

La minimisation des chutes et la valorisation des déchets de chantier est un des critères d'étude. Le design est donc guidé en partie par les dimensions des bambous à disposition, afin de limiter les coupes générant des chutes inutilisables. Cette attention permet aussi un gain logistique car moins il y a de déchet plus simple est leur évacuation et leur traitement.

Étant donné que les portions de cannes non utilisées peuvent être transformées en lattes pouvant servir de bardage, de faux-plafond ou de menuiserie, l'objectif est d'aboutir à zéro déchet de bambou sur le chantier.

Adaptabilité de la trame structurelle

Dans l'objectif d'aboutir à un ouvrage optimisé dont les pièces pourront être préfabriquées en atelier, il semble pertinent de mettre au point une trame structurelle unique, adaptable à une multitude de configurations spatiales. Ceci permet de répondre à une polyvalence d'usage sur le territoire mais aussi dans le temps.

A l'échelle de l'entreprise, si l'on réussit à mettre en place un système constructif unique et polyvalent, il sera plus simple de mettre en place rapidement une chaîne de production opérationnelle.

A l'échelle d'une exploitation agricole, ceci permet de faire évoluer la structuration de l'exploitation sans devoir remettre en cause toutes ses infrastructures. Une serre de maraichage en pleine terre pourra devenir serre d'aquaponie, hangar d'élevage ou halle de stockage des machines.

A l'échelle de l'île, une structure non utilisée pourra être démontée pour être remontée sur un autre terrain où elle trouvera une nouvelle occupation.

Reconvertibilité des ouvrages

Prenant en compte la transition agricole que l'on observe depuis quelques années, entre un modèle axé sur la monoculture de la canne à sucre pour l'exportation et une agriculture vivrière métissée, la reconvertibilité des ouvrages paraît essentielle. Il s'agit de pouvoir adapter la structure initiale à différents usages agricoles, à d'autres activités ou lui permettre de se transformer un jour en logements.

La réparation et la facilité d'entretien des ouvrages est aussi primordiale pour garantir leur durabilité. Les techniques d'assemblages devront permettre le remplacement individuel de chaque pièce.

III.3.3. Identification de 3 configurations infrastructurelles

Les besoins agricoles en infrastructure de serres identifiés peuvent être synthétisés en trois scénarios distincts présentant différents niveaux de performances répondant aux différents objectifs agronomiques : un dispositif d'ombrière pour protection solaire sans étanchéité à l'eau et à l'air, une serre de maraichage avec façades souples et étanchéité partielle, une serre mixte « high tech » avec façades rigides et étanchéité complète.

	Ombrière	Serre maraichage	Serre mixte « high tech »
Type de culture	-culture de jeunes plants (arbres ou graines) -plantes d'ombre -maraichage dans les « Bas »	-maraichage d'espèces vulnérables à la température, aux intempéries ou aux attaques d'insecte (notamment tomates et cucurbitacées) - culture de jeunes plans	-culture à haute valeur ajoutée -expérimentation -culture hors sol en milieu fermé -aquaponie -stockage de matériel fragile ...
Type d'irrigation	-naturel -à la main -goutte à goutte -aspersion en pluie	-goutte à goutte -aspersion en pluie	-goutte à goutte -aspersion en pluie
% ombrage	50%	0 à 30 % (réglable)	0 à 100 % (réglable)
Régulation hygrothermique	faible	bonne	totale
Protection vent	De nulle à partielle	partielle	complète
Protection pluie	partielle	totale	totale
Revêtement façade	-pas de revêtement -tressage lattes de bambou	Façades souples : -filets insectproof -toile translucide	Façades rigides : -polycarbonate -verre +menuiseries
Revêtement toiture	-tressage lattes de bambou -petites cannes juxtaposées ajourées	-toile translucide -polycarbonate	-polycarbonate -tôle translucide
Photovoltaïque	possible	non	possible

. CHAPITRE IV .
ÉTUDE D'UN MODELE DE SERRE ANTICYCLONIQUE EN
BAMBOU STRUCTUREL

Serres agricoles en bambou structurel
Une alternative durable aux serres agricoles conventionnelles pétrosourcées

BAMBOONEEM.RE
<https://bambooneem.re/fr/>

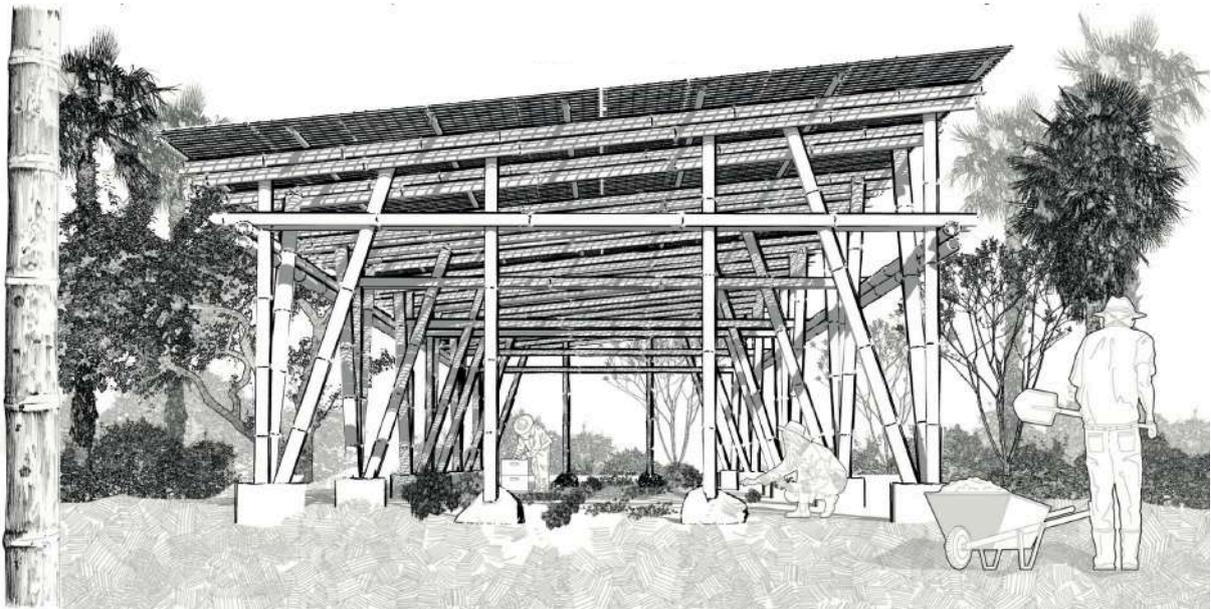


Figure 45 : Image perspective de présentation de l'étude d'un modèle de serre agricole (croquis personnel)

IV.1. Recherches volumétriques, développement de différents modèles, étude de faisabilité

Le projet de serres agricoles anticycloniques se nourrit des réalisations que l'entreprise réalise depuis déjà plusieurs années, certaines ayant déjà prouvé leur résistance aux cyclones. Cependant, dans de nombreux cas, les ouvrages réalisés auparavant s'appuient sur une structure primaire préexistante ou constituent une ossature secondaire ne reprenant que peu de charges. A travers ce projet de développement d'ouvrages agricoles, il s'agit de proposer une structure indépendante et auto stable en bambou structural, présentant une portée adaptée aux activités agricoles. Pour cela, plusieurs outils ont guidé les recherches pour concevoir un modèle à la fois ergonomique, viable sur le plan économique et dans le temps.

IV.1.1. Méthode et processus de conception

Dessin

Le dessin est une première approche qui permet de définir la géométrie de la structure : les portées, l'entraxe des trames, la hauteur, la pente de la toiture et la surface du module de base. Les premières esquisses se sont basées sur des modes constructifs déjà testés empiriquement par l'entreprise sur d'autres ouvrages. Puis ces premières esquisses ont évolué peu à peu pour adapter les systèmes constructifs pratiqués aux nouvelles géométries imposées par l'usage agricole de ces ouvrages.

Une première résolution des problématiques de contreventement s'effectue en plan et en coupe. Plusieurs solutions sont étudiées pour assurer la stabilité de l'ossature dans toutes ses dimensions en fonction des contraintes fonctionnelles imposées à l'ouvrage.

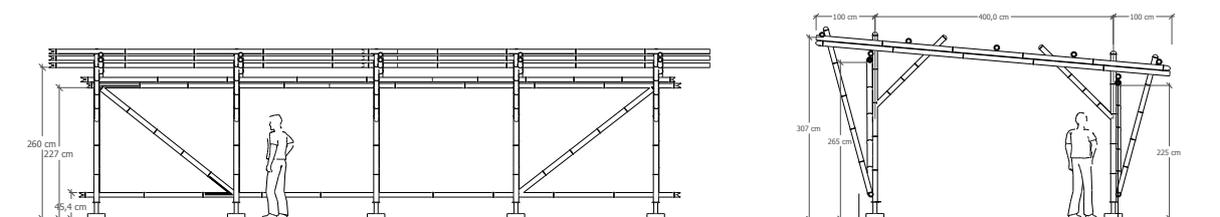


Figure 46 : Coupes de travail (crédit personnel)

Maquette d'étude

Assez rapidement, le processus de conception nous amène à travailler en maquette, à l'échelle 1 : 25 (fig. 48). Cette échelle permet d'étudier à la fois le comportement mécanique de la structure et le processus de mise en œuvre, à travers un travail de maquette minutieux. On utilise des baguettes en bambou pour modéliser les barres, qui ont un comportement très proche de celui du matériau. Leur diamètre, variant entre 4 et 6 mm, permet de les manipuler et de les assembler avec des techniques similaires à celles qui seront utilisées sur le chantier. Pour modéliser les assemblages avec des tiges filetées boulonnées, on utilise des clous métalliques. Pour les assemblages ligaturés on utilise du fil de couture ou du fil de pêche selon la nature du cordage envisagé. Pour modéliser les assemblages de barres ou consolidation en

bout de canne réalisés avec des bouteilles plastiques thermoformées, on utilise de fines gaines de fil électriques que l'on ajuste sur les baguettes par chauffage.

Le comportement des baguettes est étonnamment fiable. Il permet notamment de tester si il est nécessaire de pré percer les bambous (avec un foret très fin) pour éviter qu'elles ne fendent, de mesurer leur flèche, d'évaluer le comportement de la structure à différentes charges et sollicitations.

La construction des maquettes permet d'anticiper les problématiques de mise en œuvre, les conflits d'assemblage aux intersections des barres, les besoins de levage sur chantier.

En effet, on procède de la même manière que sur le chantier :

- Tracé du plan d'implantation : permet de fixer des tiges d'ancrage dans la plaque de bois qui sert de support. On utilise parfois des petits galets (coupés en deux pour avoir une face plane) pour ancrer la tige, afin de reproduire les ancrages sur roche qui est la technique utilisée lorsqu'on veut éviter la mise en œuvre de plots béton sur site.
- Tracé d'une épure sur le support plan
- Construction des fermes à plat sur l'épure
- Levage des fermes et encastrement sur les tiges d'ancrage
- Liaison des trames structurelles par ceinturage horizontal et systèmes de contreventement. A ce stade, avant la pose des pannes de toiture, la structure doit être parfaitement stable dans les deux directions.
- Pose des pannes et éventuellement du système de couverture sur une partie de la structure.

Ce travail en maquette permet de réajuster éventuellement les portées et entraxes pour optimiser la structure, mais aussi de se rendre compte d'un défaut de contreventement ou d'une fragilité ponctuelle du système.

La maquette est un outil utilisé très largement par les concepteurs d'ouvrages en bambou partout sur la planète, en complément ou substitution de maquettes numériques. On peut citer comme exemple le pavillon conçu par Simon Velez pour l'exposition universelle de Hanovre en 2000 ou le *Nomadic Museum* de Mexico (fig. 48). L'architecte témoigne que de nombreuses maquettes, à des échelles variées, ont guidé la conception de ses ouvrages et ont permis d'en planifier la mise en œuvre. Une maquette à échelle 1:1 a été réalisée en Colombie, avec les mêmes bambous que ceux qui allaient être exportés en Europe pour la réalisation de l'ouvrage final. Ce modèle grandeur nature a subi des essais non destructifs de chargement pour valider les résultats des modèles de calculs réalisés par les ingénieurs d'un bureau d'étude allemand.

La réalisation d'un modèle numérique pour un ouvrage en bambou se révèle en fait assez complexe, délicate et comporte de nombreux facteurs d'incertitude.



Figure 47 : Maquettes d'étude, échelle 1 :25, construction des fermes à plat sur l'épure (à droite), levage des fermes et ceinturage horizontal (au centre), maquette structure stable (à gauche) (crédits personnel)

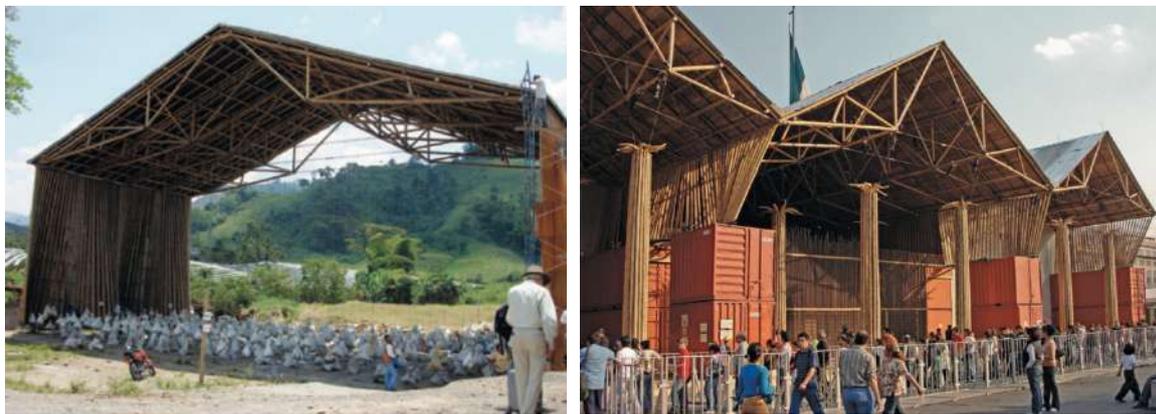


Figure 48 : Maquette d'étude échelle 1:1 soumise à un essai de chargement non destructif (à gauche), ouvrage final réalisé (à droite), Nomadic Museum, Mexico City, Mexique, Simon Velez

Modèle de calcul

La réalisation d'un modèle de calcul est très intéressante, notamment pour la comparaison de plusieurs systèmes structurels, de différentes géométries de fermes par exemple. Mais construire un modèle fiable se révèle complexe et son interprétation est délicate. Ceci est lié à la complexité de la structure même du matériau. Il n'est pas régulier, non homogène, non isotrope, et comporte des nœuds. L'influence des nœuds sur le comportement global du matériau est assez complexe puisqu'ils modifient notablement le comportement transversal du matériau, mais sont des singularités trop ponctuelles et aléatoires pour pouvoir être discrétisées.

Une autre limite des résultats donnés par un modèle de calcul est liée à la caractérisation lacunaire des différentes essences de bambou. Souvent, le matériau que l'on utilise n'est pas précisément caractérisé au niveau mécanique. Cela peut paraître impensable pour un ingénieur spécialisé en structure métallique, mais c'est en fait fréquent. Si des essais ont été

réalisés pour caractériser les différentes essences de bambou utilisée en construction, les valeurs peuvent être très éloignées d'un gisement à l'autre selon la région de pousse et les techniques de traitement. Or, réaliser des essais est coûteux, chronophage et demande un matériel spécifique. A titre d'exemple, l'entreprise travaille entre autres avec du bambou *Dendrocalamus asper* produit à Madagascar dont le fournisseur n'est pas en capacité de fournir les caractéristiques mécaniques. Étant donné que ce bambou est très robuste, l'entreprise travaille à sa caractérisation en partenariat avec l'ESIROI⁶² qui possède des bancs d'essai. Mais ce travail de fond est long et des ouvrages ont déjà été réalisés avec ce bambou sans connaître ses caractéristiques exactes. Dans ce cas, quelle valeur accorde-t-on à un modèle numérique de calcul, alors que les caractéristiques matériau ne sont qu'approximatives ?

Définir une méthodologie pour réaliser un modèle de calcul précis est une mission de R&D à développer. Il serait en effet très intéressant de le comparer ensuite au prototype réel pour en évaluer la précision. Mais ceci n'étant pas l'objectif principal de mon stage, mon travail s'est concentré sur la préparation d'un prototype réel à échelle 1 : 1, méthode aujourd'hui plus fiable et constructive pour l'entreprise. Cependant, il est prévu que l'ESIROI effectue ce travail de calcul numérique dans l'année à venir pour compléter l'étude prototypale.

La réalisation d'une comparaison de modèles numériques 2D des différentes trames structurelles étudiées a cependant été un appui pour l'analyse comparative des modèles. Ne connaissant pas les caractéristiques mécaniques exactes du matériau, le but n'était pas de déterminer les valeurs limites de dimensionnement des structures mais plutôt de comparer leur efficacité de transfert de charges et les déformations engendrées par les efforts de vent dans les différentes configurations. Pour ceci, il faut appliquer les mêmes charges à chaque modèle et associer aux barres les mêmes caractéristiques matériaux que l'on a approximé par des moyennes. Le modèle est dans ce cas un outil de conception, permettant de comparer le comportement des structures, davantage qu'un outil de dimensionnement.

Métrés et chiffrage

Après plusieurs aller-retours entre dessin et maquette, on aboutit à plusieurs modèles répondant aux exigences du cahier des charges défini au préalable.

Le calcul de quantitatifs matériaux basés sur des métrés relatifs à chaque modèle, permet de quantifier la consommation en matériau et les chutes générées. Dans un souci d'économie de matière et de moyens, d'efficacité de mise en œuvre, c'est un véritable critère de choix de conception.

Associer ces métrés à un chiffrage, permet d'amener un éclairage encore différent participant aux choix techniques adoptés. En effet, certains matériaux, notamment la quincaillerie pour les assemblages, ne représentent pas un volume énorme mais peuvent changer significativement le prix d'un ouvrage. Le coût de quincaillerie est d'ailleurs souvent supérieur à celui du bambou pour un volume bien inférieur. On privilégiera donc un système réduisant les éléments métalliques d'assemblage.

S'ensuit un travail d'ajustement pour optimiser la quantité de matière, le coût de l'ouvrage à court et long terme, la rapidité de mise en œuvre et son intégration paysagère.

⁶² École Supérieure d'Ingénierie Réunion Océan Indien

Serre agricole 100% Bambou - Recherche développement - Prototype Echelle 1			
Fondations en plots béton, Descente de charge en Bambou Guadua Dia 12-14, Ceinturage horizontale structure en guadua 10-12cm, Pannes toitures en Guadua 8-10 cm, Pannes bois et toles ondulée prélaquée, Planche de rives			
27/02/2023			
BAMBOO	Nombre	Prix à la canne	Prix
Guadua Dia 12-14cm, Traité sel de bore, L 6m	20	91,2	1 824,00
Guadua Dia 10-12cm, Traité sel de bore, L 6m	8,00	84,69	677,52
Guadua Dia 8-10cm, Traité sel de bore, L 6m	26,00	84,69	2 201,94
Provision pour Faux plafond ombrière + paroi latérale	92,00	70,00	6 440,00
TOTAL BAMBOUS			11 143,46 €
QUINCAILLERIE ET BOIS	Nombre	Prix à l'unité	Prix
Plots béton préfabriqué ferrailé 50*50*50cm	6,00	230,00	1 380,00
Mortier de remplissage	6,00	47,89	287,34
Tole prélaqué 2face, Longueur 6ml, largeur utile 1ml, avec quincaillerie	72,00	22,88	1 647,43
Planche de rive 28*140, 6ml, Pin 4,	6,00	53,20	319,20
Pannes Pin classe 4, section 70*70, Longueur 6m	14,00	49,00	686,00
TRC Longueur 18cm - Diamètre 12cm	50,00	1,90	95,00
Tige filetée inox dia 12	29,00	22,45	651,05
Ecrous et rondelles inox dia 12	240,00	0,78	187,20
Frais de structure sur quincaillerie			1 575,97
TOTAL QUINCAILLERIE			6 829,18 €
MAINS D'OEUVRE ET DEPLACEMENT	Nombre	Prix a l'unité	Prix
Conception PEO, coordination, approvisionnement	4,00	480,00	1 920,00
Creusement fondation et pose fondations	4,00	480,00	1 920,00
Elevation structure et pannes bois	12,00	480,00	5 760,00
Pose toiture et rives	8,00	480,00	3 840,00
Ancrage des descentes de charges	4,00	480,00	1 920,00
Finitions et repliements	4,00	480,00	1 920,00
Carburants et Déplacements (Ratio km)	1 680,00	0,70	1 176,00
TOTAL MAIN D'OEUVRE ET DEPLACEMENT		Total	18 456,00 €
TOTAL €HT			36 428,65
TVA 8,5%			3 096,43
TOTAL €TTC			39 525,08
Acpte à commande €TTC (Matériel)			15 810,03
Solde à livraison de l'ouvrage €TTC			23 715,05
Surface ouvrage en m² développé toiture			72
Prix au m² HT/toiture			505,95
Surface ouvrage en m² plancher Utile			45
Prix au m² HT/sol			809,53
Délai de chantier sur site en jours ouvrés			9,00
Nombre de charpentiers			4,00

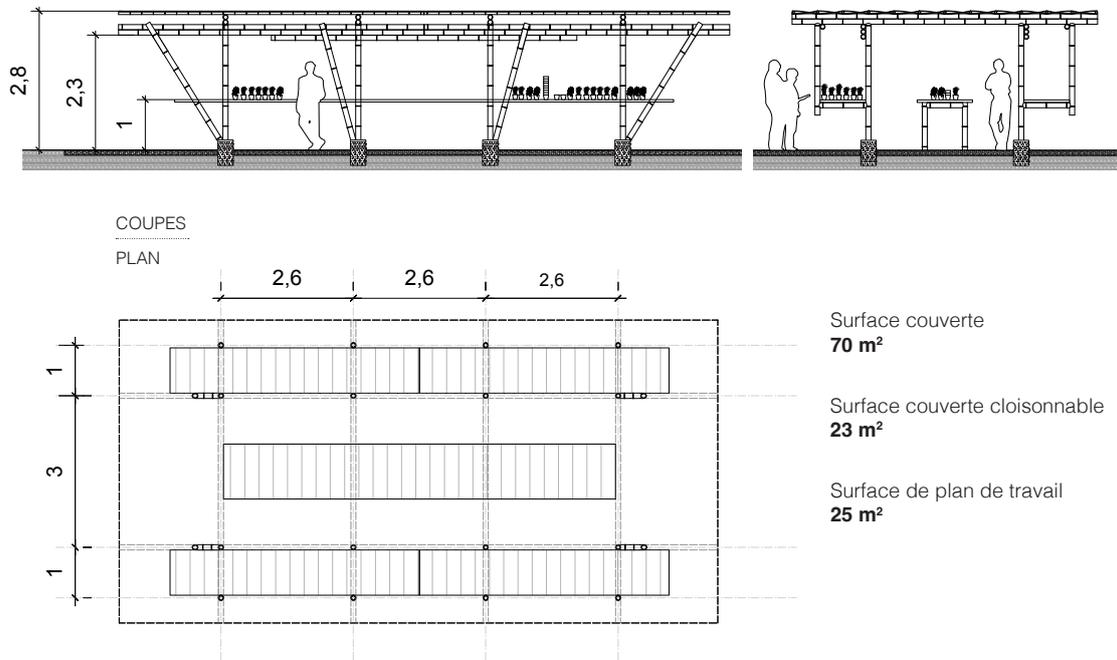


Figure 49 : Chiffrage du prototype final

IV.1.2. Présentation de trois modèles étudiés

La méthode décrite ci-dessus nous a menée à définir trois modèles potentiels.

1. Ombrière à toit plat : modèle de pépinière



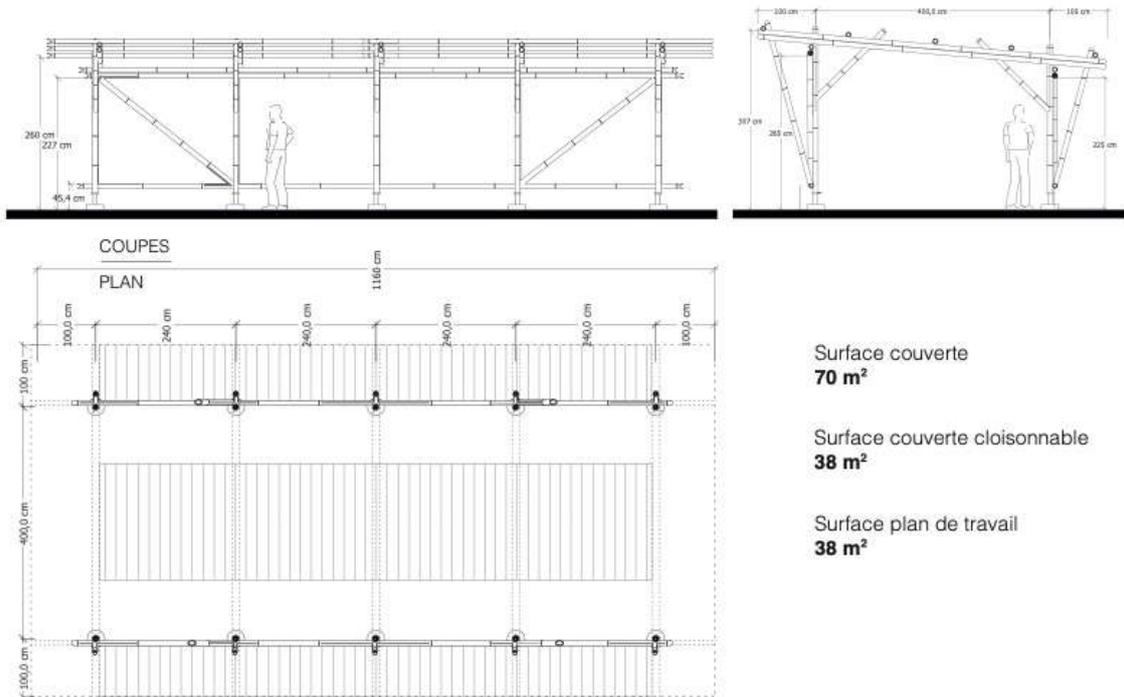
Matériaux

100 % de matériaux biosourcés

pour un système constructif **résilient**

- COUVERTURE**
 - Gestion de l'ombrage : réglage du % d'ombrage souhaité par l'écartement des lattes
 - Assure la circulation de l'air
- TOITURE**
 - Débords de toiture générant une protection solaire
 - Assemblages bambou et ligatures avec la structure principale
- OSSATURE**
 - Trame optimisée et duplicable
 - 1 ferme = 4 bambous (6m)
 - Plan de travail intégré dans la trame structurelle
- FACADES**
 - Panneaux amovibles : adaptabilité du dispositif à l'environnement, l'orientation, l'exposition de l'ouvrage
- MOBILIER**
 - Préfabriqués en atelier
 - Changeable facilement selon le revêtement de plan de travail souhaité
- FONDATIONS**
 - Ancrage de l'ouvrage avec des galets de site : adaptation aux ressources du terrain
 - Encastrement en pied de poteau

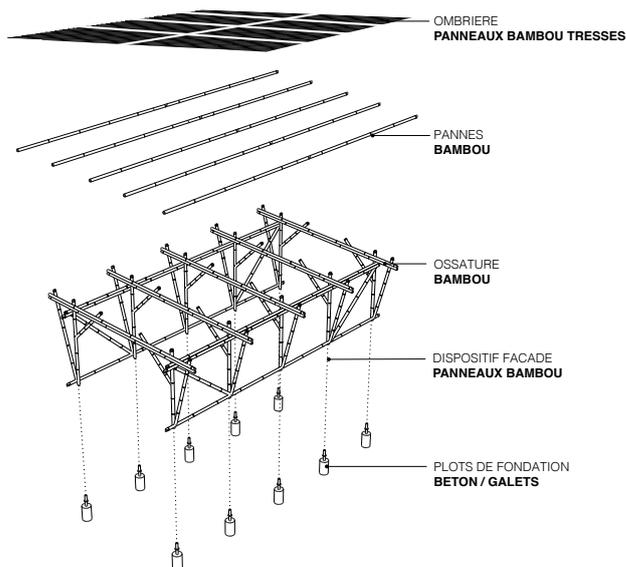
2. Ombrière à toiture inclinée : de la pépinière à la serre



Matériaux

Structure biosourcée

pour un système constructif **robuste**



COUVERTURE



- Gestion de l'ombrage : réglage du % d'ombrage souhaité par la trame de tressage des panneaux
- Assure la circulation de l'air

TOITURE



- Débords de toiture générant une protection solaire
- Assemblages bambou et ligatures avec la structure principale

OSSATURE



- Système de fermes permettant de réaliser des assemblages bambou ligaturés

FACADES



- Panneaux amovibles : adaptabilité du dispositif à l'environnement, l'orientation, l'exposition de l'ouvrage

MOBILIER



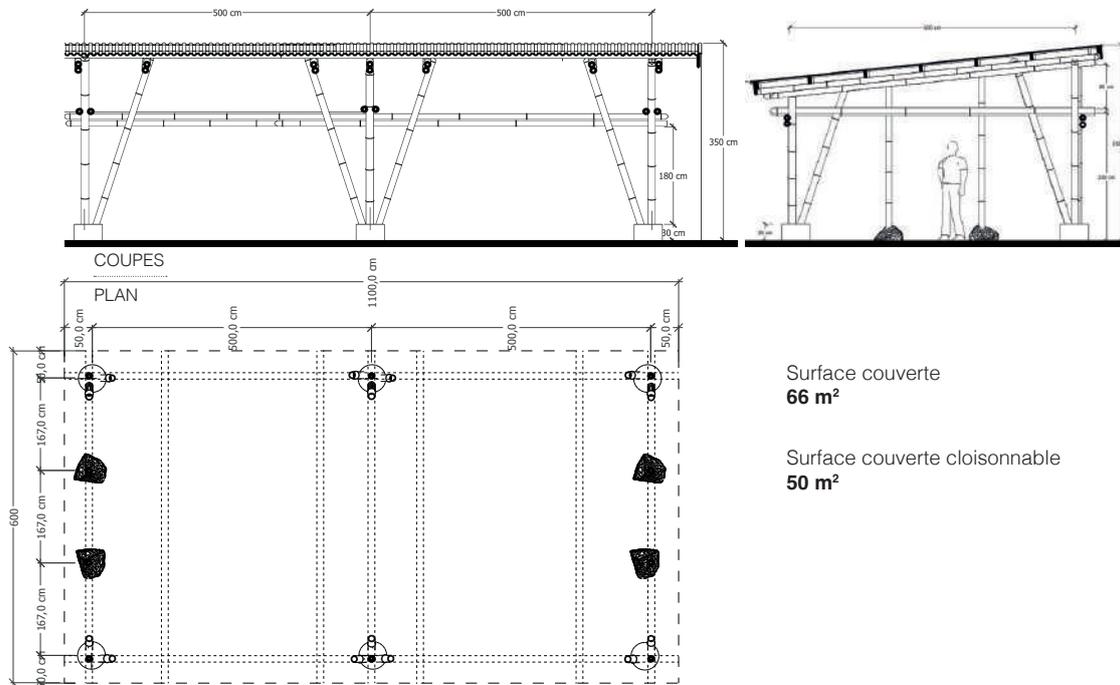
- Plans de travail indépendant de la structure principale
- Changeable facilement selon le revêtement de plan de travail souhaité

FONDACTIONS



- Ancrage de l'ouvrage avec des plots en béton : préfabrication possible des ancrages et adaptation à la topographie du terrain
- Encastrement en pied de poteau

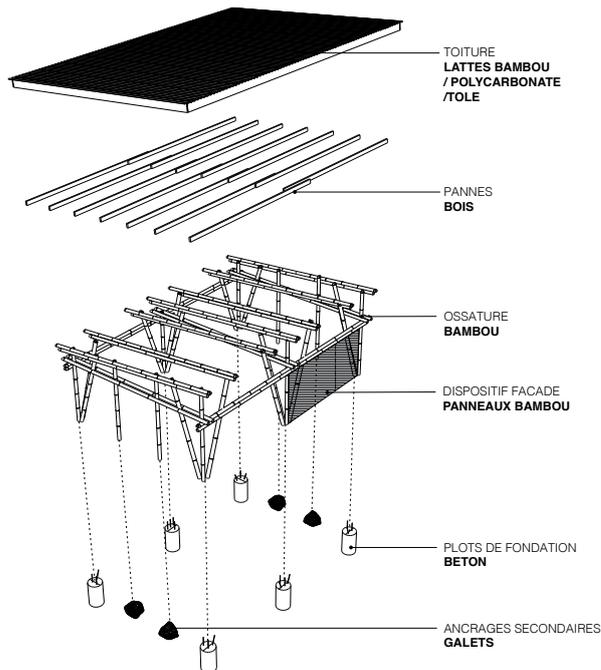
3. Serre à un plan incliné : vers une halle agricole polyvalente



Matériaux

Ossature biosourcée

pour un système constructif **polyvalent**



COUVERTURE



- Toit en pente : adaptabilité de la couverture (étanchéité / porosité / ombrage)

TOITURE



- Peut recevoir une toiture étanchée
- Métissage possible avec d'autres systèmes constructifs

OSSATURE



- Trame arborescente basée sur un système porteur de poteaux tripodes et quadripodes

FACADES



- Panneaux amovibles : adaptabilité du dispositif à l'environnement, l'orientation, l'exposition de l'ouvrage

FONDACTIONS



- Optimisation des points d'ancrage (tripodes / quadripodes)
- Limitation des plots en béton et utilisation de galets de site

IV.1.3. Comparaison et choix du modèle retenu pour la poursuite de l'étude

L'étude de ces trois modèles a permis d'établir une comparaison permettant de choisir le modèle le plus prometteur pour poursuivre l'étude.



Figure 50 : Photographies de maquettes d'étude des 3 différents modèles (crédit personnel)

Dans l'objectif de produire un modèle d'infrastructure agricole résilient, les critères de comparaison s'intéressent à l'optimisation, la durabilité, la polyvalence et l'adaptabilité de l'ouvrage.

Critères de comparaison + avantages - inconvénients	Modèle 1 Ombrière à toit plat	Modèle 2 Ombrière à toiture inclinée	Modèle 3 Serre à un pan incliné
Quantité de matière mise en oeuvre	+ 42 bambous structure - 13 pannes bambou + 8 plots de fondation	- 52 bambous structure + 5 pannes bambou - 10 plots de fondation	- 52 bambous structure + 7 pannes bois + 6 plots de fondation
Portée de la trame	3 m	4m	5 m
Potentiel de reconvertibilité	- pas d'étanchéité possible (toiture plate) +possibilité de création d'un plancher	+ adaptation tout types de couverture +possibilité de création d'un plancher	+ adaptation tout types de couverture +possibilité de création d'un plancher + portée généreuse
Polyvalence d'usage	+ ouvertures possibles sur tous les côtés - tables intégrées à l'ossature porteuse	- pas d'ouverture possible sur les grands côtés (ceinturage inférieur) - bracons structurels compliquent un cloisonnement ultérieur	+ ouvertures possibles sur tous les côtés + plan libre + large entraxe dans les deux dimensions + horizontalité des trames pour ajouter des dispositifs suspendus
Gestion Eaux Pluviales	- pas de récupération EP	+ récupération EP	+ récupération EP
BILAN	modèle léger et économe en bambou mais limité dans sa reconvertibilité	modèle robuste et fonctionnel mais limité dans la polyvalence de son aménagement	modèle polyvalent présentant un fort potentiel d'adaptation et de reconvertibilité

Figure 51 : Tableau comparatif des 3 modèles sur des critères de résilience

Dans l'objectif d'élaborer un modèle efficient, optimisé en termes de matière et de mise en œuvre, il semble pertinent de resserrer l'étude d'ingénierie sur un modèle unique, capable de répondre aux différents enjeux et besoins identifiés. Pousser la recherche vers un système constructif exclusif est une solution pour simplifier le processus de construction, optimiser la mise en œuvre sur chantier, envisager la préfabrication de ces structures et finalement être compétitifs face aux autres offres du marché.

Le choix du modèle retenu s'est ainsi porté sur le modèle de serre à un pan incliné, optant pour la polyvalence au service de l'adaptabilité.

Les potentiels du modèle choisi pour la poursuite de l'étude sont multiples.

Le dessin de la **trame structurelle** génère :

- un plan libre permettant une multitude d'usages et d'aménagements, suivant l'évolution des besoins en infrastructure
- une traverse horizontale permettant de fixer des cloisonnements ou de suspendre des dispositifs techniques
- des entrées / sorties d'air en sous toiture pour ventiler efficacement les serres, contrôler la température et l'hygrométrie

La géométrie de la **toiture** permet :

- l'accueil de tous types de couverture, permettant l'évolution de l'ouvrage et sa reconversibilité
- une meilleure gestion des eaux pluviales (récupération, stockage, distribution)
- une ventilation naturelle efficace en favorisant les mouvements convectifs
- l'installation de panneaux solaires photovoltaïques pour assurer une production d'énergie

Le système de descente de charge en **tripodes/quadripodes** :

- réduit le nombre de plots de fondations, préservant le sol et limitant l'usage du béton
- répartit la descente des charges, faisant travailler plus également les différents éléments de la structure
- intègre le dispositif de contreventement de manière efficace dans son dessin

Les caractéristiques de ce modèle permettent d'esquisser plusieurs scénarios pour s'adapter à deux facteurs changeants, prouvant la résilience du modèle proposé :

- il saura s'adapter dans le temps à l'évolution des pratiques agricoles sur une même exploitation
- il saura s'adapter dans l'espace à la diversité des terrains agricoles du territoire, qui sont à la fois la richesse et la complexité de l'île

Cette adaptabilité dans le temps et sur le territoire peut être illustrée par les différents scénarios que nous avons imaginé comme évolution potentielle de la structure.

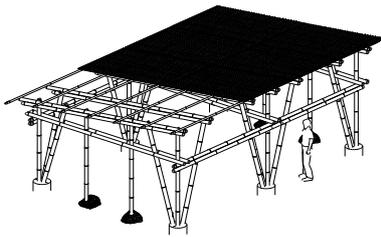
- Adaptabilité dans le temps

1. Structure légère

/ pépinière
/ culture en pleine terre ombragée

type de couverture : ombrière légère
--> bambou tressé (panneaux ou lattes)

façades ouvertes :
--> panneaux ombrières amovibles

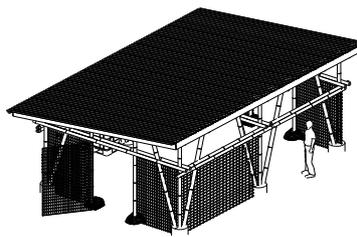


2. Structure intermédiaire

/ serre
/ nurserie

type de couverture : couverture translucide -->
polycarbonate / toile / filet insecte proof

façades légères :
--> panneaux d'ombrière / toile / filet insecte proof / bardage bambou

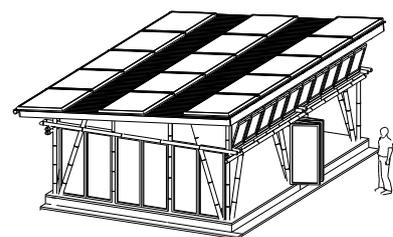


3. Structure complète

/ culture hors sol en milieu fermé
/ hangar élevage
/ infrastructure de transformation
+ production d'énergie

type de couverture : toiture pleine
--> tôle / tuile de bambou / bardeaux de bois
+ panneaux photovoltaïques

façades étanches :
--> menuiseries vitrées / bardage bambou



- Adaptabilité sur le territoire

Adapter la portée

/ serre à deux pans



Adapter la hauteur

/ serre à deux pans inversés



S'adapter à l'orientation

/ serres en shed



S'adapter à la pente

/ serres en terrasses



IV.2. Élaboration du protocole de construction d'un prototype à échelle 1 :1

IV.2.1. Objectifs

Étant données les lacunes réglementaires et caractéristiques sur le matériau étudié dans le cadre constructif européen, la construction d'un prototype à échelle 1 :1 est une étape cruciale du développement du projet. Ce modèle expérimental vise à prouver la pertinence et la résistance du système constructif, mais sera aussi support d'étude dans un processus itératif d'amélioration du modèle. Il poursuit des objectifs à plusieurs niveaux, sur les plans constructif et agronomique. A la fois exemple, témoin et support d'étude, ce prototype participera à la diffusion de ce nouveau modèle de construction agricole, activant le développement de la filière dans ce domaine.

Analyse structurelle : comparaison modèle réel et modèle numérique

Tout d'abord, ce modèle réel permettra de tester la structure en la soumettant à des tests de charge non destructifs. La mesure des déformations et flèches des différentes barres pourra être mise en relation avec un modèle numérique en cours de réalisation par des étudiants de l'ESIROI⁶³. L'analyse de cette comparaison permettra d'affiner la méthodologie de modélisation associée aux ouvrages en bambou afin de développer des modèles de calcul fiables et pertinents.

Analyse constructive : développement d'un process de préfabrication

La construction de ce prototype sera une première confrontation aux contraintes de mise en œuvre et problématiques d'assemblage. L'analyse du procédé de construction permettra d'affiner ensuite un process de préfabrication pour accélérer la mise en œuvre, simplifier les contraintes de chantier, abaisser le coût de réalisation de l'ouvrage et peut-être, à terme, concevoir un kit montable en auto-construction.

Analyse agronomique : mesures des paramètres agronomiques et évaluation de la réponse aux contraintes climatiques

La duplication de ce prototype sur plusieurs sites à différentes altitudes de l'île, au sein de microclimats différents, permettra de mener une étude comparative sur l'impact de la température, de l'hygrométrie et du type de culture sur la structure. Cela permettra de tester les différents types d'enveloppe envisagés (perméable, souple, rigide) en réponse aux contraintes climatiques et agronomiques des différents sites d'étude. Les prototypes seront équipés de matériel métrologique afin de mesurer les paramètres hygrothermiques (température, humidité, ensoleillement) à l'intérieur des serres, pour évaluer leur performance agronomique. Dans une temporalité plus longue, on pourra évaluer l'influence de la structure sur la productivité et le rendement des cultures.

⁶³ Ecole Supérieure d'Ingénieurs Réunion Océan Indien

Diffusion d'un modèle constructif résilient

Cet ouvrage aura une valeur démonstrative et pourra être utilisé à titre d'exemple, notamment par les collectivités qui poussent à la mise en œuvre de matériaux biosourcés sur leurs territoires. Ayant pour vocation de diffuser la culture de la construction en bambou, un de ses objectifs est donc de rassembler des acteurs variés autour de ce processus de recherche et d'innovation. Le ou les prototypes auront donc une vocation pédagogique, sensibilisant les acteurs du monde agricole à un mode constructif plus résilient.

Diffusion d'un modèle de production de la ressource

Enfin, ce prototype d'ouvrage agricole est une opportunité de diffuser un modèle de filière allant de la production de la ressource à sa mise en œuvre. Pour construire, il faut d'abord produire. C'est pourquoi, une idée pourrait être d'associer aux prototypes une dynamique de plantation. Plusieurs scénarios sont envisageables. Une ou plusieurs touffes de bambou pourraient être plantées sur le terrain en périphérie du prototype, dans l'objectif que dans dix ans quand certaines barres commenceraient à faiblir, on puisse puiser dans la touffe adjacente pour rénover, transformer ou agrandir la structure. Une deuxième idée serait d'implanter dans une petite partie de la surface de ces serres expérimentales des micro-pépinières de plants de bambou. Ceci permettra de disperser la génétique d'essences présentes sur l'île à différentes altimétries afin d'étudier leur adaptation et leur développement dans ces différents climats. Cette action qui peut paraître anecdotique puisqu'on parle d'à peine une dizaine de pieds mis en culture dans chaque prototype d'étude, est en fait le point de départ d'une sylviculture raisonnée, répartie sur le territoire, équitable et durable. Cette multiplication des lieux de production de plants permettra de se libérer de la dépendance à la *Bambusaie du Guillaume*, qui a aujourd'hui l'exclusivité de la production de plans de bambou *péi*. Cette dispersion des différentes essences de bambou de construction, permettra de sécuriser la ressource biologique, qui est pour l'instant capitalisée à la *Bambusaie*, sur plusieurs sites de l'île. De plus, ceci permettra de diversifier la production et la reproduction des plants qui sont, à la *Bambusaie*, cultivé à haute altitude (plus de 1000m), où il n'est pas possible de faire pousser tous les types de bambou. On peut notamment citer la difficulté de mettre en pépinière le bambou *Guadua* dans ces conditions climatiques, qu'il serait particulièrement intéressant de développer dans les basses altitudes pour la construction.

IV.2.2. Modèle économique inédit participant au développement de la filière

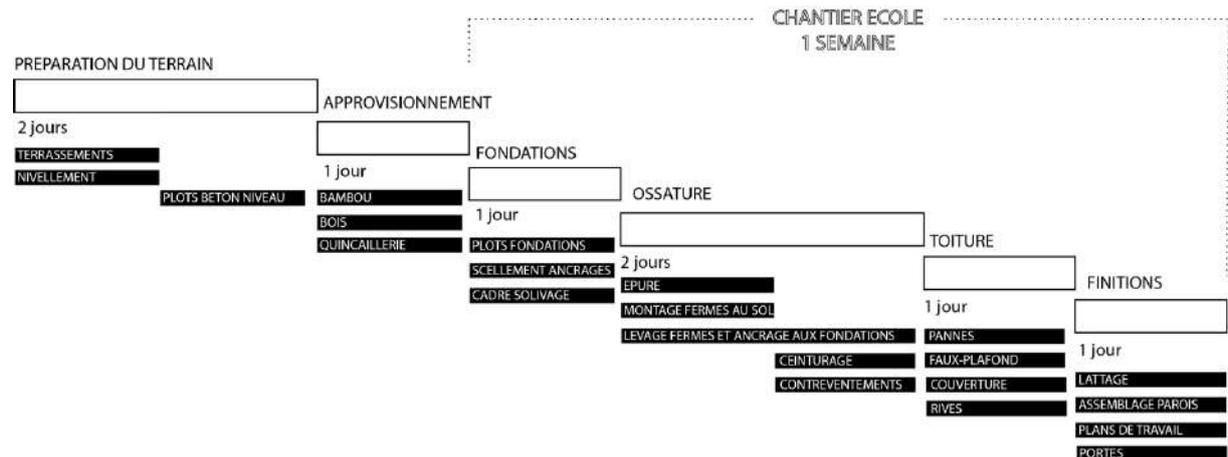
Le financement de la construction des prototypes d'étude se base sur un modèle économique mixte inédit, rassemblant plusieurs acteurs publics et privés autour d'un même projet. L'idée est d'obtenir des financements publics départementaux et régionaux pour financer la partie d'étude d'ingénierie qui participe au développement de la filière biosourcé sur le territoire. Pour que ce prototype soit confronté à des conditions réelles d'exploitation, afin d'étudier son évolution dans le temps, il semble essentiel qu'il soit implanté sur une parcelle agricole, et donc partiellement financée par son exploitant. L'agriculteur pourra financer une part, qui correspond au coût des matériaux de construction, soit sur ses fonds propres, soit via un système de subventionnement agricole (fonds européens FEADER notamment). Enfin, la construction de ce prototype serait idéalement réalisée dans le cadre d'un chantier de formation pour former des particuliers (professionnels ou non) à la construction en bambou.

Ce modèle économique mêlant financement public, financement privé et formation permet de rassembler différents acteurs tout en servant les intérêts de chacun :

- Faire un « chantier école » de formation : permet de réduire le cout de main d'œuvre par la vocation pédagogique du chantier. On transmet un savoir-faire tout en produisant un ouvrage expérimental permettant de continuer les études de développement.
- Mêler des financements publics et privés : permet d'impliquer les acteurs politiques locaux par une aide à l'innovation issue de fonds publics tout en ancrant le projet dans une réalité territoriale par l'investissement partiel d'un agriculteur privé. Cela permet d'implanter l'ouvrage sur un terrain pérenne où il sera exposé aux conditions réelles d'exploitation.
- Impliquer une part de financements publics : permet d'impliquer les pouvoirs publics dans le développement de la filière, de garder une possibilité de suivi et d'étude du prototype et de bénéficier de leur réseau de diffusion
- Impliquer une part de financement d'un exploitant agricole : permet d'intégrer le milieu agricole, de tester la pertinence agronomique du prototype et de rayonner pour diffuser ce système constructif sur les exploitations alentours. Dans l'idée d'adjoindre à cette expérimentation constructive une expérimentation sylvicole pour produire de la ressource, des contrats de sylviculture peuvent être élaborés avec les agriculteurs engagés, motivés et consultés au préalable, qui s'impliquent dans le projet. L'entreprise s'engagerait alors à l'acquisition de la ressource produite (plants ou cannes matures) sur un ratio de la surface de serre construite.

IV.2.3. Planning et descriptif du montage de la structure

La construction du prototype pourrait être réalisée sur une semaine dans le cadre d'un chantier de formation, avec un groupe de 6 à 8 stagiaires apprenants. Cet effectif permet de constituer 3 binômes (ou trinômes) de travail pour réaliser les étapes successives de réalisation. La préparation du terrain et l'approvisionnement seront réalisés en amont du chantier.



- Terrassements : l'implantation du prototype sera réfléchi pour minimiser les terrassements, mais il faudra à minima aplanir les zones recevant les plots de fondation
- Nivellement : repérage des différences d'altimétrie et réglage des niveaux d'implantation
- Massifs de fondation (figure 52-[1]) : positionnement des galets semi-enterrés (excavation, mise en place, remblais) ou coulage de plots en béton et mise à niveau des arases (si pas de galets disponibles sur site)
- Approvisionnement : sélection et marquage des bambous selon leurs géométries et singularités, transport de tous les matériaux de construction sur site. Stockage à l'abri de la pluie et de la lumière.
- Scellement des tiges d'ancrage : Insertion de tiges filetées dans les massifs de fondation (plots ou galets), fixation par scellement chimique
- Solivage (facultatif) : montage et ajustement du solivage, dans le cas où un plancher est nécessaire
- Épure : tracé de la géométrie des fermes au sol
- Montage des fermes au sol (figure 52-[2]) : découpe et assemblage à plat des bambous constituant les fermes principales

- Levage et ancrage des fermes (figure 52-[3]) : les fermes préassemblées au sol sont levées et disposées sur les ancrages en attente fixés au préalable. Les pieds des fermes sont fixés. A ce stade, elles ne sont pas contreventées, il peut donc être nécessaire de les étayer ou de les mettre en tension avec des cordes pour les maintenir en place temporairement.
- Contreventement des fermes dans leur plan (figure 52-[4]) : on assure la stabilité des fermes dans leur plan par l'ajout de barres diagonales partant des pieds de poteaux et rentrant vers l'intérieur de la structure. Les poteaux deviennent des bipodes.
- Ceinturage horizontal (figure 52-[5]) : on relie les fermes entre elles par les doubles poutres de ceinturage horizontal. C'est l'étape où est réglé l'équerrage de la structure. Il faut assurer la verticalité des fermes en fixant les poutres horizontales. Une vérification peut être faite par la mesure des diagonales en pied de poteau et au niveau du ceinturage horizontal.
- Contreventement longitudinal (figure 52-[6]) : on assure la stabilité de la structure dans le plan perpendiculaire aux fermes par l'ajout de barres diagonales entre les fermes. Les poteaux bipodes deviennent des tripodes (ou quadripodes pour la trame centrale).
- Poutres intermédiaires (figure 52-[7]) : les barres de contreventement longitudinales reçoivent des poutres qui seront support des pannes de toiture. L'ajout de ces 4 poutres en plus des 3 doubles poutres des fermes principales permettent de répartir la descente des charges de toiture et de réduire la portée des pannes (limitation de leur flèche).
- Pannes (figure 52-[8]) : pose et fixation des pannes sur les poutres principales.
- Rives (figure 52-[9]) : ajustement et fixation des rives de toiture
- Couverture (figure 52-[10]) : pose du revêtement de toiture (tôle, polycarbonate, fibres, toile...)

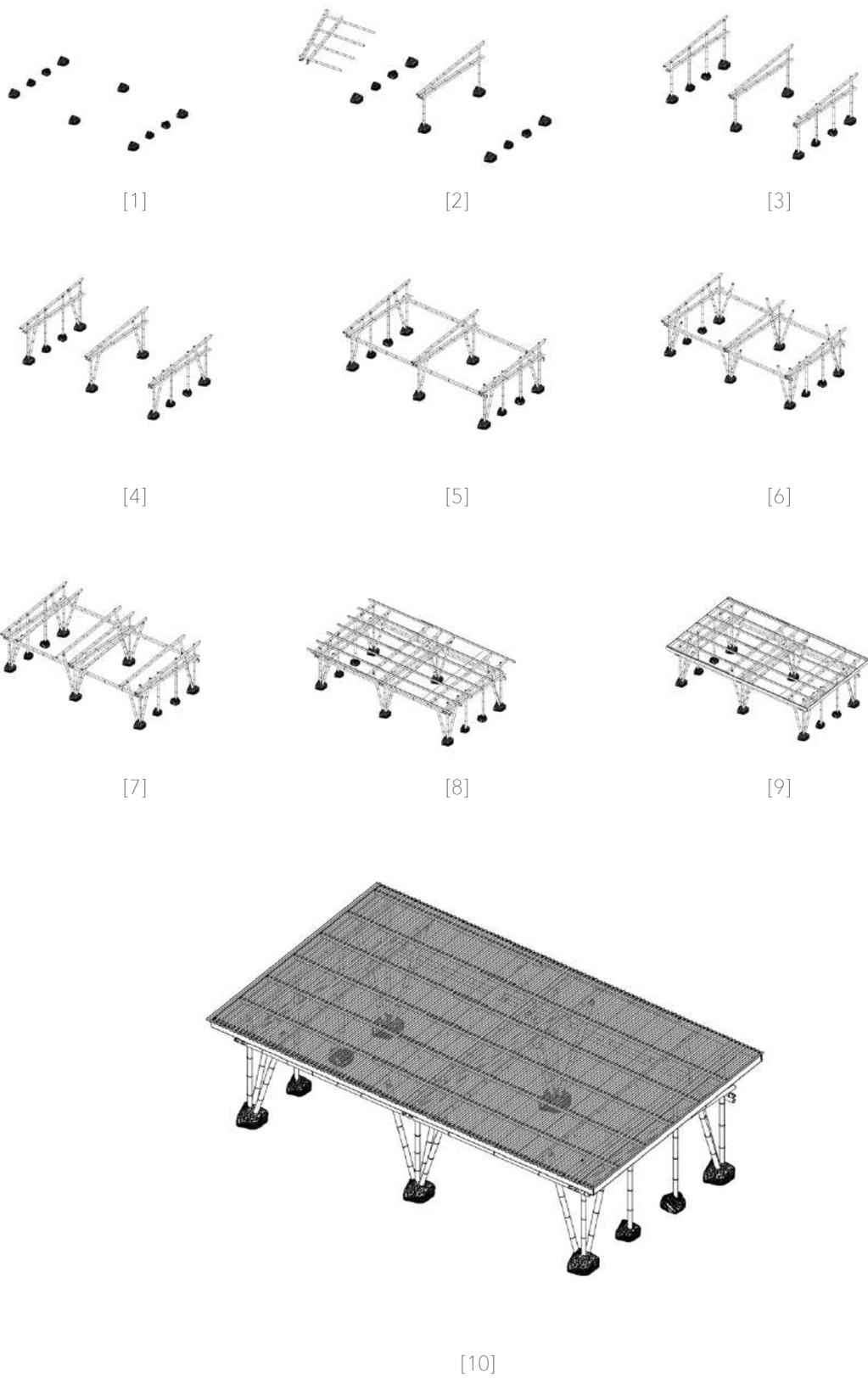


Figure 52 : Étapes de montage de la structure, vues axonométriques (crédit personnel)

IV.2.4. Détails et mise en œuvre

Aux différentes problématiques constructives liées à la réalisation de l'ouvrage, on peut apporter plusieurs solutions techniques. Les paragraphes qui suivent visent donc à décrire, illustrer et comparer la diversité des techniques de mise en œuvre possibles pour les différentes liaisons mécaniques.

Si le prototype complet n'a pas pu être réalisé dans le temps de mon stage, j'ai pu expérimenter ces différentes techniques de mise en œuvre sur d'autres ouvrages. Ceci m'a permis d'évaluer leur potentiel, avantages et inconvénients afin de choisir les techniques d'assemblage les plus pertinentes pour le projet d'étude.

On détaillera les liaisons aux massifs de fondation, les assemblages entre les cannes de bambou, les systèmes de fixation des parois ou dispositifs d'enveloppe sur l'ossature et les systèmes de toiture.

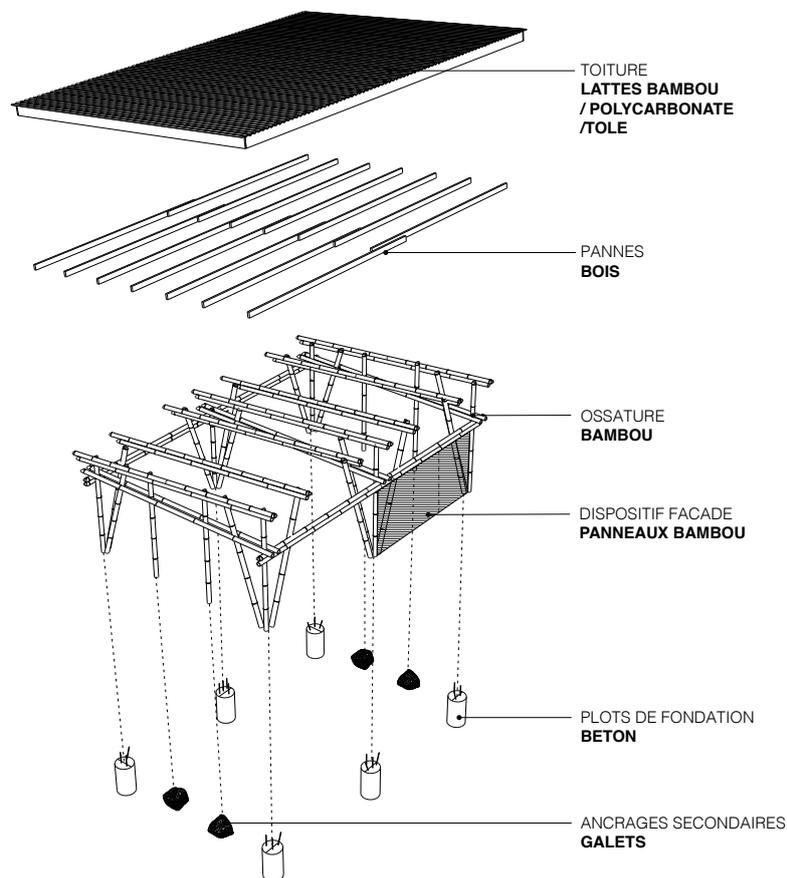
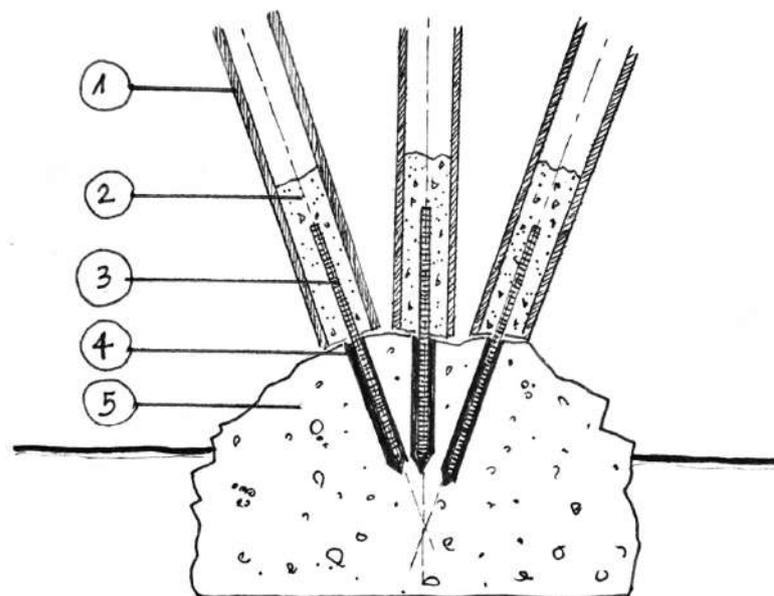


Figure 53 : Axonométrie de la structure du prototype d'étude (crédit personnel)

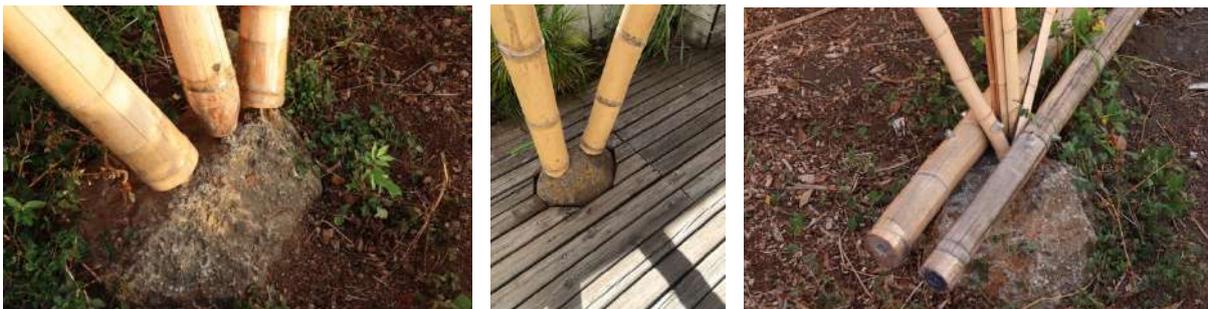
Massifs de fondation

Pour la réalisation des massifs de fondation assurant l'ancrage de la structure, plusieurs solutions techniques sont réalisables, permettant de s'adapter aux différentes configurations et contraintes de chantier.

- Encastrement des tripodes sur galets :



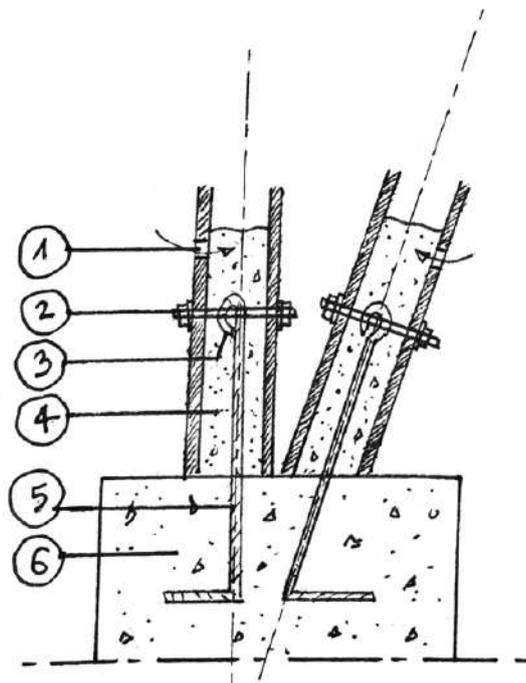
- 1 : poteau bambou
- 2 : mortier de ciment
- 3 : tige filetée
- 4 : scellement chimique
- 5 : galet de basalte



Avantage : limite l'utilisation du béton, les blocs de basalte sont une ressource présente sur la plupart des terrain agricoles, adaptabilité à un terrain en pente, forme et rugosité naturelle du rocher évite l'accumulation d'eau en pied de poteau, insertion paysagère élégante

Inconvénient : l'ajustement de la coupe des pieds de poteau demande beaucoup de précision et doit être fait sur site (facteur limitant la potentielle préfabrication des poteaux), impossible d'emboîter un tripode monté préalablement au sol (il faut ajouter les poteaux inclinés après le levage de la ferme)

- Tiges ancrées sur plot béton :



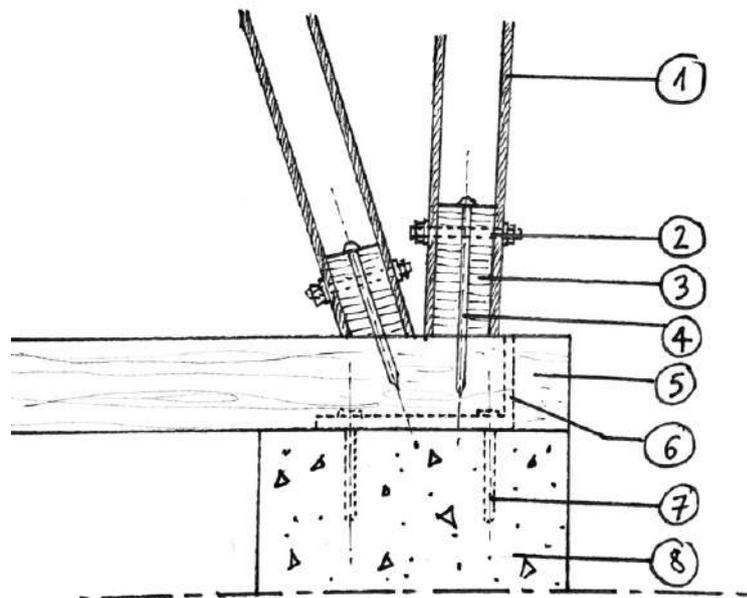
- 1 : percement dans poteau bambou pour coulage mortier
- 2 : tige filletée boulonnée
- 3 : anneau de levage OU armature BA recourbée
- 4 : mortier de ciment
- 5 : tige filletée OU armature BA
- 6 : plot béton



Avantage : ajustement de l'angle des poteaux inclinés sur chantier par torsion des tiges, toute la trame y compris les tripodes peuvent être montés au sol avant levage de la ferme, double système de résistance à l'arrachement, possibilité de préfabriquer les plots béton en y intégrant les tiges métalliques d'ancrage, pas d'utilisation de scellement chimique

Inconvénient : perte du pied de poteau au démontage, volume de béton important nécessaire dans les zones soumises à des contraintes d'arrachement

- Plug bois sur solivage



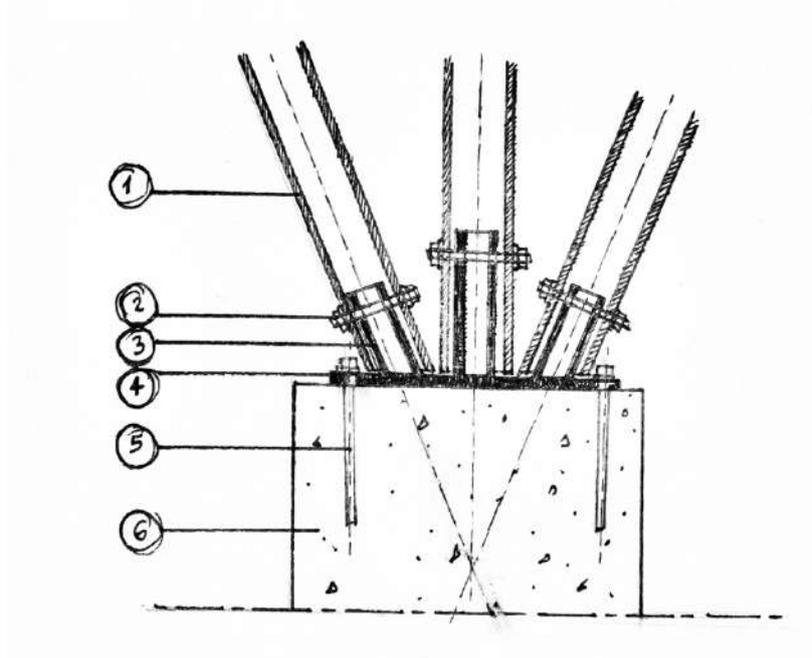
- 1 : poteau bambou
- 2 : tige filetée boulonnée
- 3 : plug bois (bois exotique imputrescible de classe 4)
- 4 : vis de charpente
- 5 : solive bois
- 6 : cornière métallique de fixation du solivage au plot béton
- 7 : goujon d'ancrage de la cornière dans le plot béton
- 8 : plot béton



Avantage : complètement démontable, facilement déplaçable et remontable car toute la structure est réglée sur le solivage, attention à la hauteur des plugs bois pour permettre l'emboîtement des tripodes préfabriqués au sol

Inconvénient : solivage obligatoire, ne convient pas pour les structures sans plancher (serres culture en pleine terre par exemple)

- Platines métalliques sur plots béton



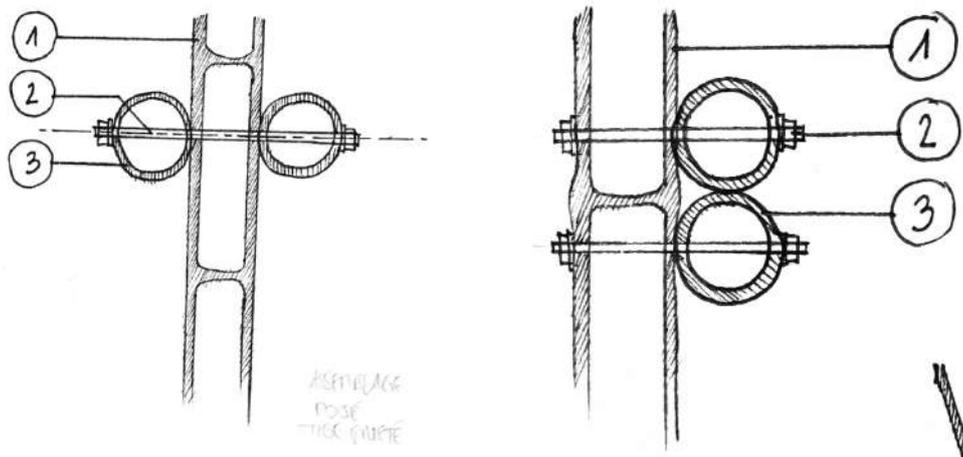
- 1 : poteau bambou
- 2 : tige filetée boulonnée
- 3 : tube platine métallique
- 4 : base platine métallique
- 5 : goujon d'ancrage de la platine dans le plot béton
- 6 : plot béton

Avantage : possibilité de préfabrication complète, pas nécessité d'ajustements sur site, complètement démontable

Inconvénient : platines métalliques à réaliser sur mesure pour chaque type d'ancrage, assurer l'ancrage des platines sur des plots bétons

Assemblages des cannes bambou

- Tiges filetées boulonnées :



- 1 : poteau bambou
- 2 : tige filetée boulonnée
- 3 : double poutre bambou

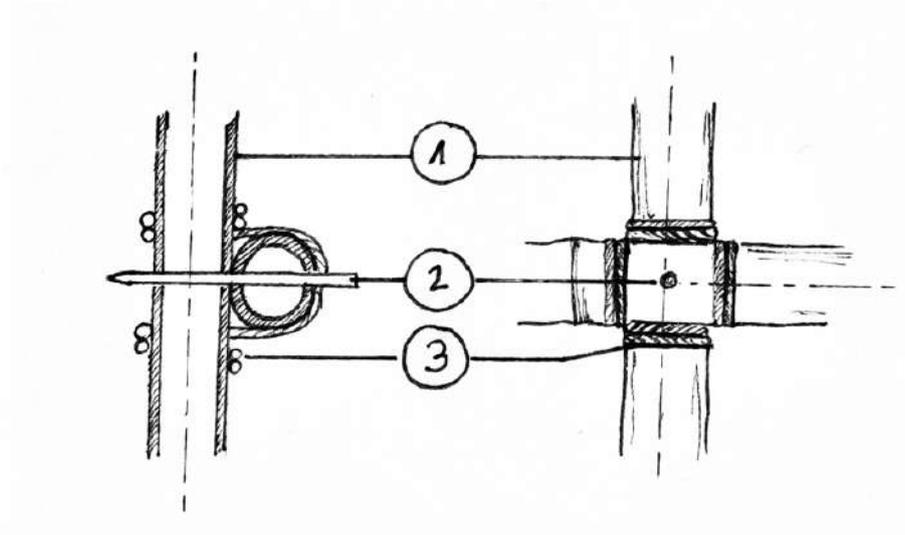
Les bambous sont mis en place et pré percés de la taille de la tige filetée. On peut ensuite passer la tige métallique à travers toutes les barres et boulonner aux deux extrémités. Une rondelle est placée entre l'écrou et le bambou pour limiter l'effet de poinçonnement, qui pourrait engendrer une fissuration. Lorsqu'une canne est prise en sandwich entre deux autres, on dira que l'assemblage est moisé (schéma de gauche ci-dessus). La fixation en deux points (schéma de droite ci-dessus), permet d'éviter un pivot au niveau de la liaison.



Avantage : rapide et simple à mettre œuvre, facilité de démontage/remontage, beaucoup de guides de bonnes pratiques sur ce type d'assemblage

Inconvénient : les boulons peuvent se desserrer dans le temps, il faut vérifier régulièrement le serrage, corrosion des aciers en milieu exposé aux embruns marins

- Pines bambou et ligatures cordes de chanvre



- 1 : poteau bambou
- 2 : pine bambou
- 3 : ligature cordage de chanvre

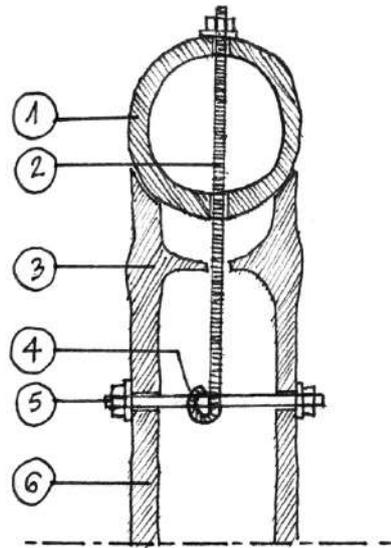
Les pines doivent être légèrement plus grosses que le diamètre de perçage à une de leurs extrémités. Elles sont placées en force au marteau et on ajoute des ligatures de chanvres pour consolider l'ensemble.



Avantage : assemblage 100% biosourcé, pas de risque de corrosion (pas d'éléments métalliques)

Inconvénient : risque de rupture des pines au démontage, pas de contrôle du serrage (déterminé par le diamètre des pines bambou)

- Gueules de poisson



- 1 : poutre bambou
- 2 : tige filetée
- 3 : nœud percé (au plus proche de la tête de poteau)
- 4 : anneau de levage
- 5 : tige filetée boulonnée
- 6 : poteau bambou

Assemblage dans un plan, intéressant en tête de poteau et pour fixer les barres de contreventement dans le plan des poteaux. Une tige filetée traversant la barre verticale assure la résistance à l'arrachement de l'assemblage.



Avantage : assemblage dans un plan, économie de matière, robuste à l'arrachement, bon transfert des charges verticales

Inconvénient : mise en œuvre fine et complexe, ajustement précis des découpes

Fixation des dispositifs de façade sur l'ossature

Les choix constructifs de conception des parois sont orientés par plusieurs questions fonctionnelles et architecturales. Les caractéristiques techniques à prendre en compte sont les suivantes :

- le besoin d'étanchéité à l'air et à l'eau va guider le choix des matériaux à mettre en œuvre
- le besoin de ventilation et de lumière va définir la porosité des parois
- le besoin d'isolation thermique et phonique va orienter vers une paroi plus ou moins épaisse
- la volonté de faire apparaître les éléments de structure à l'intérieur ou à l'extérieur va définir le positionnement de la paroi par rapport à l'ossature porteuse

En ce qui concerne le positionnement de la paroi dans l'épaisseur de l'ossature porteuse, on peut distinguer 5 grands types de configurations :

- Paroi plaquée au nu extérieur de la structure (fig 54-[1]) : la structure ne sera pas visible de l'extérieur mais sera ainsi mieux protégée des intempéries et agents extérieurs potentiellement agressifs. Si au contraire elle est plaquée au nu intérieur de la structure, cette dernière sera protégée d'agents agressifs produits à l'intérieur de l'ouvrage.
- Double paroi de part et d'autre de la structure (fig 54-[2]) : ceci génère une lame d'air entre les deux couches de la paroi, qui peut donc éventuellement être complétée d'une couche isolante.
- Système de double poteau qui prend en sandwich la paroi (fig 54-[3]) : la structure est visible à l'intérieur et à l'extérieur de l'ouvrage, la fixation peut être réalisée par emboîtement ou pincement, réduisant l'utilisation de quincaillerie pour la fixation.
- Paroi en remplissage entre les éléments de structure (fig 54-[4]) : nécessite l'ajout de cadres entre les éléments de structure pour fixer les revêtements intérieur et extérieur. Si cette solution est économe en matériaux, elle convient mieux aux structures qui n'ont pas besoin d'être étanches à l'eau et à l'air, car les joints avec les éléments de structure sont délicats à ajuster.
- Paroi auto stable dissociée de l'ossature (fig 54-[5]) : le mur est indépendant de la structure porteuse de la toiture. Cette solution est intéressante dans le cas de la transformation d'une structure qui était auparavant ouverte, car on n'intervient pas directement sur la structure soutenant la charpente, on ne modifie pas son chargement. Dans le cas d'exposition à des vents forts, l'ossature bambou travaillera principalement en soulèvement et sera protégée des efforts de poussée latéraux, réduisant les contraintes de flambement. Le mur auto stable extérieur devra en revanche être suffisamment robuste pour résister aux efforts horizontaux.

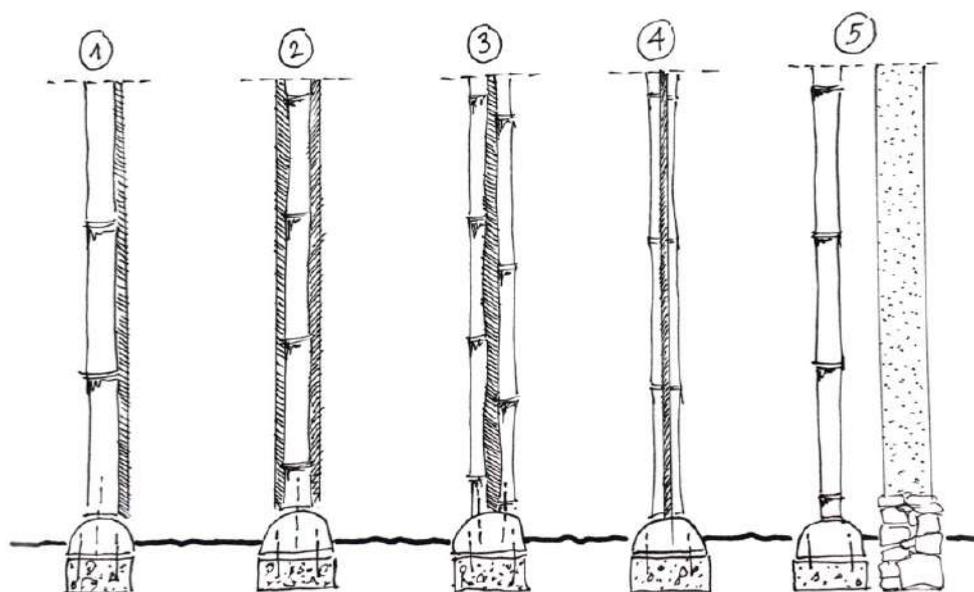


Figure 54 : Différentes configurations de positionnement des parois (croquis personnel)

Dans le cas particulier des serres et hangars agricoles en climat tropical, il n'y a pas un réel besoin d'assurer une étanchéité à l'air, la protection du vent et de la pluie sont en revanche primordiales, tout comme l'optimisation de la ventilation naturelle.

De nombreuses techniques sont possibles, mettant en œuvre une multitude de matériaux différents. On s'intéressera ici aux solutions bio et géo sourcées, mais il est aussi possible de mettre en œuvre des façades en polycarbonate, tôle ou bardage bois sur une ossature en bambou. La liste de solutions techniques présentée ci-dessous est loin d'être exhaustive, il existe une infinité de combinaisons possible, il s'agit ici de présenter les différents principes constructifs et les interactions générées avec l'ossature en bambou. Chacune des solutions peut être adaptée aux différentes configurations que l'on vient d'exposer, mais elles ne seront pas toutes détaillées.

Un des enjeux majeurs dans la réalisation des parois est de percer le moins possible les éléments de structure pour garantir leur intégrité et préserver leur résistance maximale.

Parois bambou :

Les parois réalisées avec du bambou sous différentes formes sont des parois légères, particulièrement adaptées aux climats chauds et humides puisqu'elles permettent une ventilation au travers de la paroi tout en protégeant de la pluie si elles sont associées à un débord de toiture suffisant. Ce type de paroi présente très peu d'inertie thermique.

Les techniques qui suivent pourront être laissées avec un revêtement bambou apparent ou pourront être recouvertes d'un enduit de finition (terre, chaux, ciment ...).

- Cannes entières de petit diamètre ou « gaulette » : on peut utiliser des cannes de petit diamètre simplement empilées et maintenues verticalement par des ligatures en corde de chanvre à intervalles réguliers.

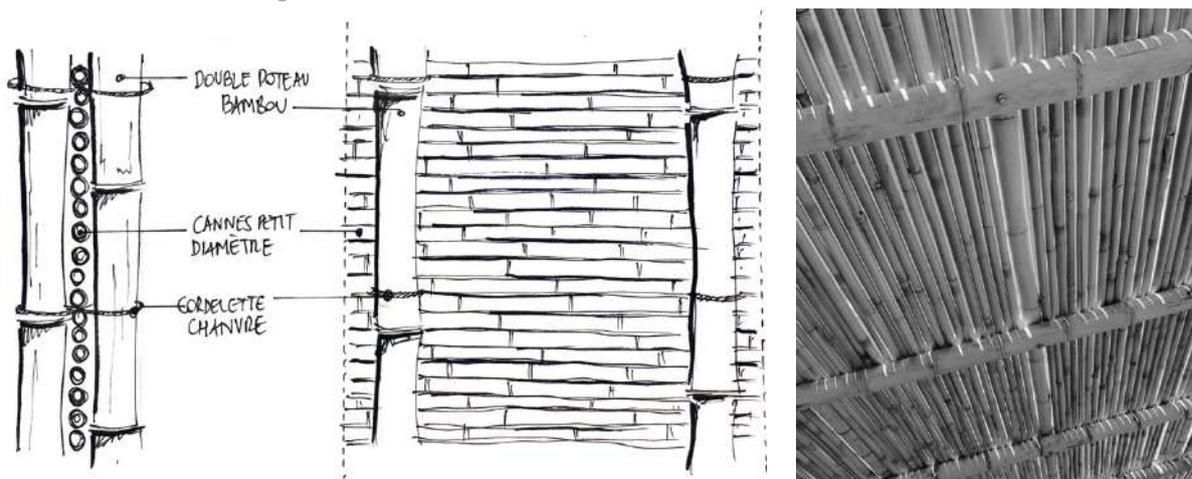


Figure 55 : Paroi réalisée avec des cannes de petit diamètre, coupe et façade détail (croquis personnel),
photographie de mise en œuvre (crédit personnel)

-Cannes entières de gros diamètre : on peut monter un dispositif auto stable en empilant des cannes de gros diamètres dont $\frac{1}{4}$ de la section a été retirée, offrant une zone d'appui stable et évitant les infiltrations d'eau. Reposant sur une fondation stable, l'empilement pourra être axé sur des armatures verticales (fines cannes de bambou ou aciers de ferrailage), la pile sera régulièrement ancrée horizontalement dans les poteaux.

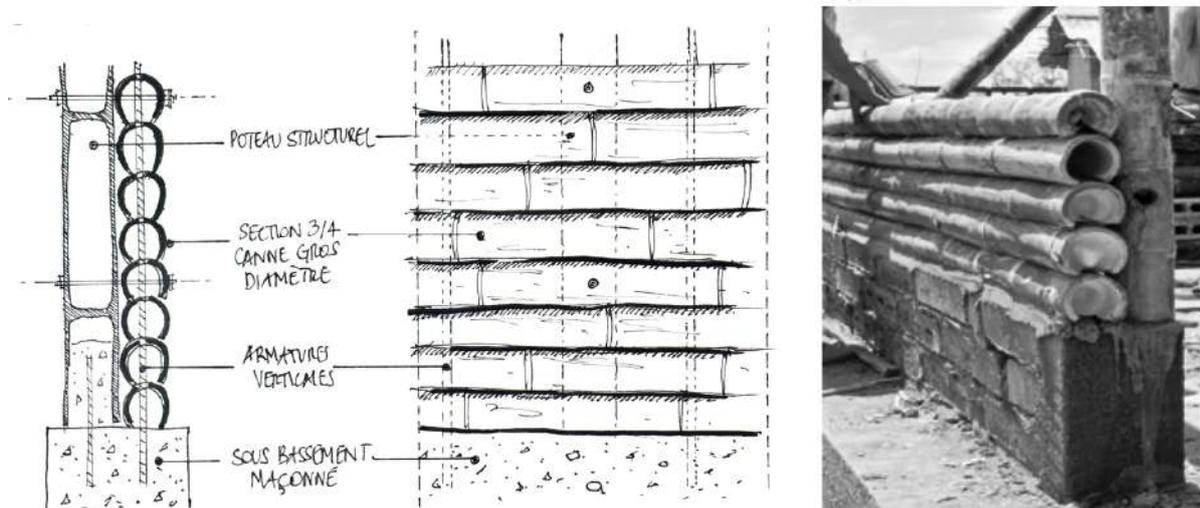


Figure 56 : Paroi réalisée par empilement de cannes entières de gros diamètre, coupe et façade détail (croquis personnel), photographie de mise en œuvre (Building with Bamboo, Gernot Minke)

-Lattage : le lattage est la solution qui se rapproche le plus du bardage traditionnel. Il consiste à mettre en place une trame (horizontale ou verticale) sur laquelle on vient fixer le lattage de façade (respectivement vertical ou horizontal). Des lattes plus petites peuvent être ajoutées en couvrir joint de dispositif, afin d'améliorer l'étanchéité du revêtement. Pour une étanchéité totale, il faudra appliquer un enduit de finition ou bien ajouter une couche de tôle (métallique ou polycarbonate).

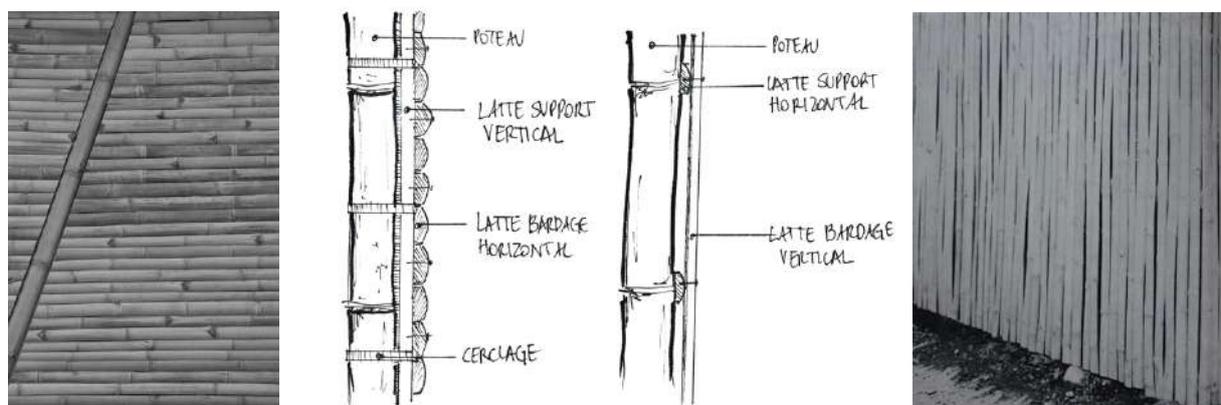


Figure 57 : Paroi en lattes de bambou, bardage horizontal (crédit personnel), coupe détail bardages horizontal puis vertical (croquis personnels), bardage vertical (Bambus Bamboo, Klaus Dunkelberg)

- Mats ou tressage : les panneaux de mats (bambou aplani par fendages multiples) sont fixés directement sur les poteaux constituant l'ossature du mur. Ils peuvent être juxtaposés ou tressés. On peut y adjoindre une couche d'enduit terre que l'on pose sur une trame (textile ou grillagée) qui sert de couche d'accroche pour l'enduit. Cette technique de paroi présente un potentiel de préfabrication sous forme de panneaux (cadre + mats ou lattes tressées) qui peuvent venir être posés directement sur les montants d'ossature.

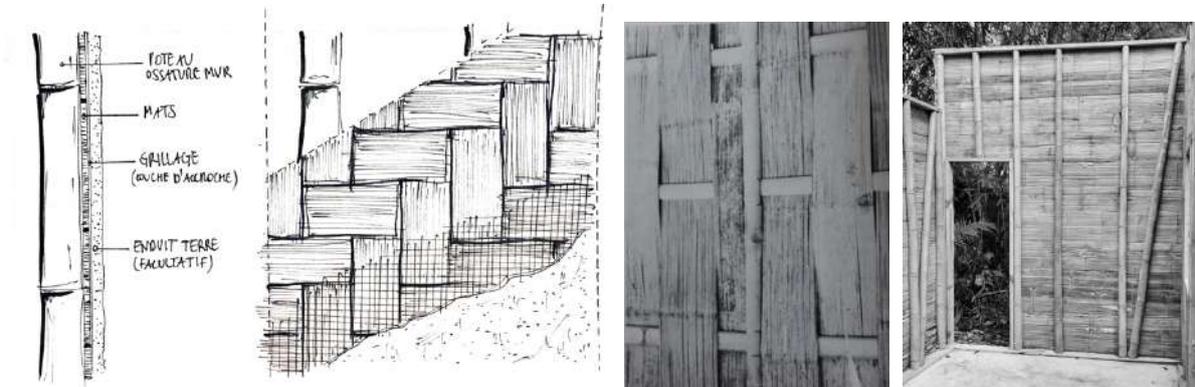


Figure 58 : Paroi en mats,
 coupe et façade détail (croquis personnel), mats verticaux tressés sur des lattes (Bambus Bamboo, Klaus Dunkelberg), mats horizontaux fixés sur ossature (Kawayan collective)

Paroi terre crue :

Les parois mettant en œuvre un mélange de terre crue et de fibres (paille, coco, chanvre, bambou...) sont des parois plus lourdes, qui apportent à l'enveloppe inertie thermique et régulation hygrothermique. Ici, le mélange à base de terre n'est pas seulement un enduit de finition comme celui qui a été évoqué précédemment, c'est l'élément constitutif de la paroi. Les propriétés isolantes de la paroi peuvent être accrues en augmentant la proportion de fibres du mélange. Mais alors la paroi perdra en masse et donc en inertie thermique. Les proportions terre / fibres sont donc différentes en fonction des qualités de paroi requises et de la technique de mise en œuvre employée. En effet, les fibres assurent la cohésion du mélange et participent à limiter la fissuration au séchage.

- *Bareque* (Colombie), *quincha* (Pérou), *bahareque* (Guatemala), *pao pique* (Brésil) : cette technique vernaculaire a différentes appellations et s'apparente au torchis. Un mélange terre fibres est appliqué à l'état plastique sur une fine ossature constituée le plus souvent de lattes clouées, vissées ou tressées sur les montants principaux. Le positionnement des lattes à l'envers favorise l'accroche de la terre.

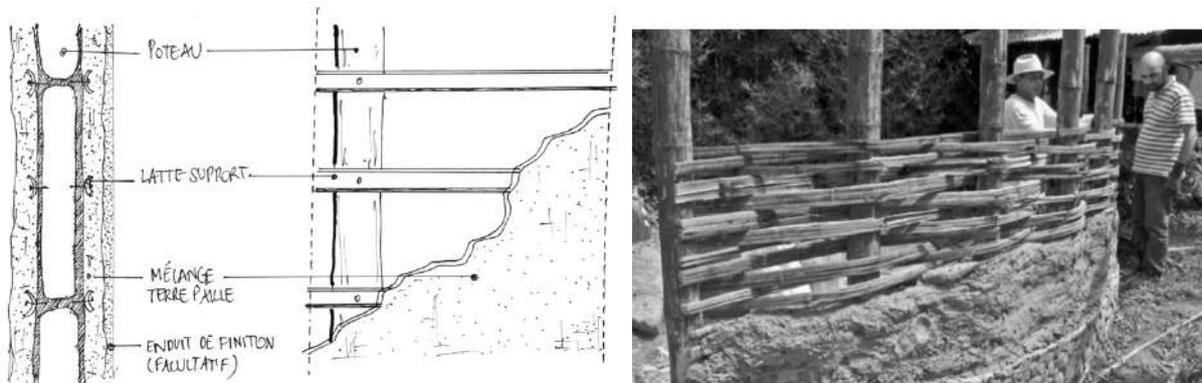


Figure 59 : Paroi « bareque »,
coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de mise en œuvre de terre crue sur des fragments de mats
tressés sur une ossature (*Building with Bamboo*, Gernot Minke)

- Baugé armée de bambou : le bambou peut être associé à un mur en baugé⁶⁴. A la manière du béton armé, la trame de bambou vient renforcer la résistance en traction du mur massif en terre crue, naturellement efficace en compression. L'ossature bambou est montée dans un premier temps, avant de recevoir le mélange terre / fibres qui va constituer le corps du mur.

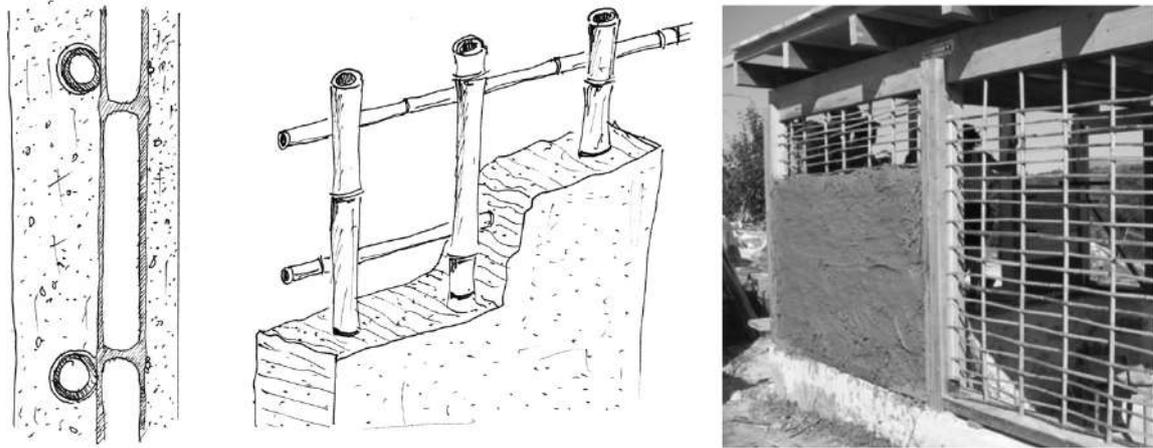


Figure 60 : Paroi en baugé armée de bambou, coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de mise en oeuvre (Building with Bamboo, Gernot Minke)

- Brique de terre crue ou adobe : le bambou peut servir d'armature à des briques de terre crue, la cohésion entre les deux matériaux se fait grâce à la forme des briques qui sont percées pour s'emboîter sur l'ossature bambou. Le bambou maintient donc les briques latéralement et la cohésion verticale se fait par gravité. Il est également possible d'utiliser des briques de terre en simple remplissage d'une ossature bambou.

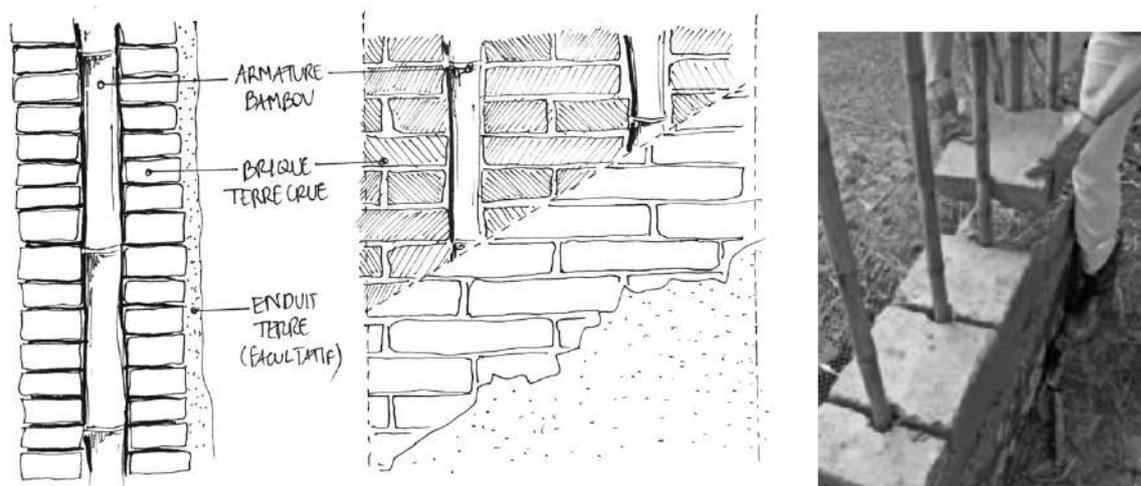


Figure 61 : Paroi en briques de terre crue sur trame en bambou, coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de mise en oeuvre (Building with Bamboo, Gernot Minke)

⁶⁴ La baugé est une technique de construction en terre crue, qui consiste à monter des murs massifs sans coffrage, par l'empilement de mottes composées d'un mélange plastique de terre et de fibres végétales.

Paroi textile :

Les structures légères en bambou sont couramment associées à des toitures ou des parois textiles, constituées de toiles de différentes factures. La fixation de la toile à l'ossature se fait avec des cordes en fibres végétales ou des câbles métalliques pour mettre en tension la paroi.

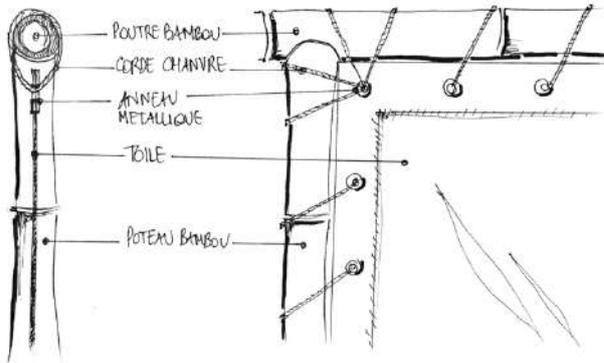
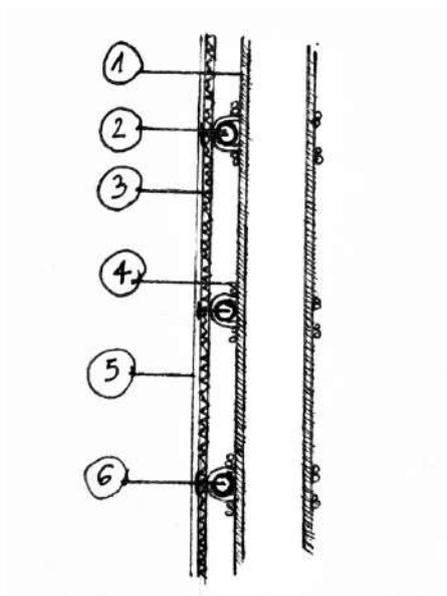


Figure 62 : Paroi textile, coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de paroi en toile tendue (Building with Bamboo, Gernot Minke)

Paroi polycarbonate :



- 1 : ossature porteuse bambou
- 2 : canne bambou de petit diamètre
- 3 : polycarbonate
- 4 : ligature corde de chanvre
- 5 : couvre joint
- 6 : vis de fixation du polycarbonate dans les cannes horizontales

Les panneaux de polycarbonate peuvent être posés au nu intérieur ou extérieur de la structure. Les positionnements à l'intérieur pourraient être une solution de protection des bambous de structure dans le cas où une hygrométrie élevée est voulue à l'intérieure de la serre.

Toiture

- Ombrière :

Les deux principales techniques d'ombrière sont le tressage de lattes et la pose de cannes de petit diamètre sur l'ossature porteuse. Dans les deux cas, le pourcentage d'ombrage peut être géré par l'espacement soit des lattes soit des petites cannes.

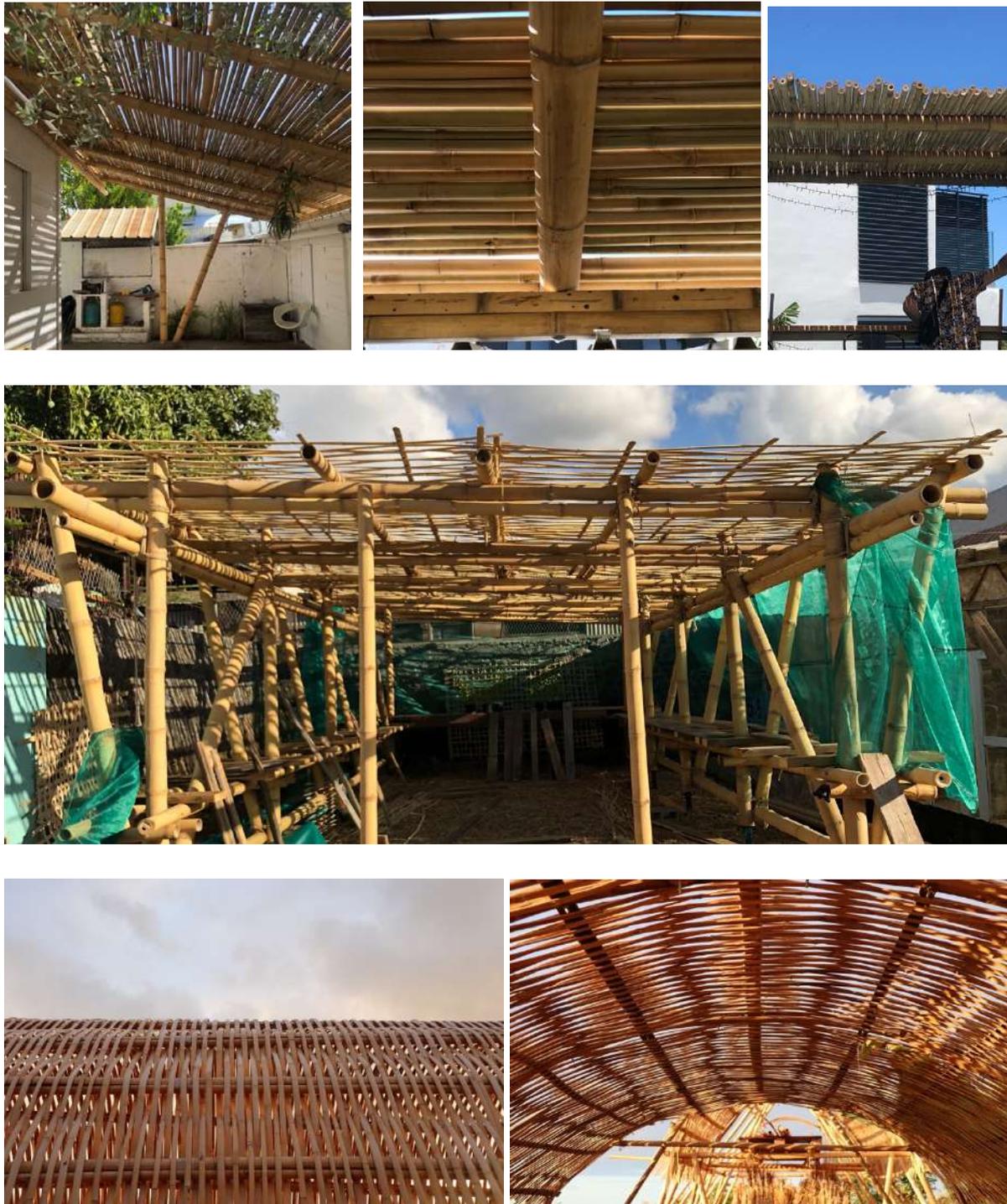


Figure 63 : Exemples de toitures en ombrière, juxtaposition de cannes de petit diamètre (en haut), tressage de lattes de bambou (en bas), (crédit personnel)

- Toiture translucide en polycarbonate ou tôle onduline transparente :



Figure 64 : Exemple de toiture translucide, pergola Confucius, Piton Saint-Leu (crédit personnel)

- Toiture opaque en tôle isolée avec des panneaux ravenal ou mats :



Figure 65 : Exemple de toiture étanchée, faux plafond isolant en panneaux de ravenala (à droite), en mats (à gauche), Hôtel Dina Morgabine, Saint Gilles les Bains (crédit personnel)

Insertion de système solaire photovoltaïque en toiture

Il est intéressant de réfléchir au potentiel d'insertion d'un dispositif de panneaux solaires photovoltaïques sur les structures des serres qui proposent une surface de toiture généreuse et dont la pente est propice à l'installation d'une ferme solaire.

Pour évaluer le potentiel de production électrique, on se base sur un panneau de la marque *longi*⁶⁵, qui est un des leaders du marché photovoltaïque actuel.

On prend comme hypothèse des panneaux de 2278 x 1134 mm, qui ont donc une surface de 2,58 m² pour une puissance maximale de crête⁶⁶ de 560 W.

L'implantation de 12 panneaux de ce type correspond à 30,96 m² soit 47% de la surface de toiture d'une serre de 50 m². Cette surface de panneaux permet d'atteindre 13,44 kW de puissance crête. En répartissant les panneaux sur la toiture, cette couverture partielle peut participer à créer un l'ombrage nécessaire aux culture sous-jacentes.

Les panneaux sont fixés sur des rails, qui pourront être eux-mêmes ancrés directement dans les pannes en bambou.

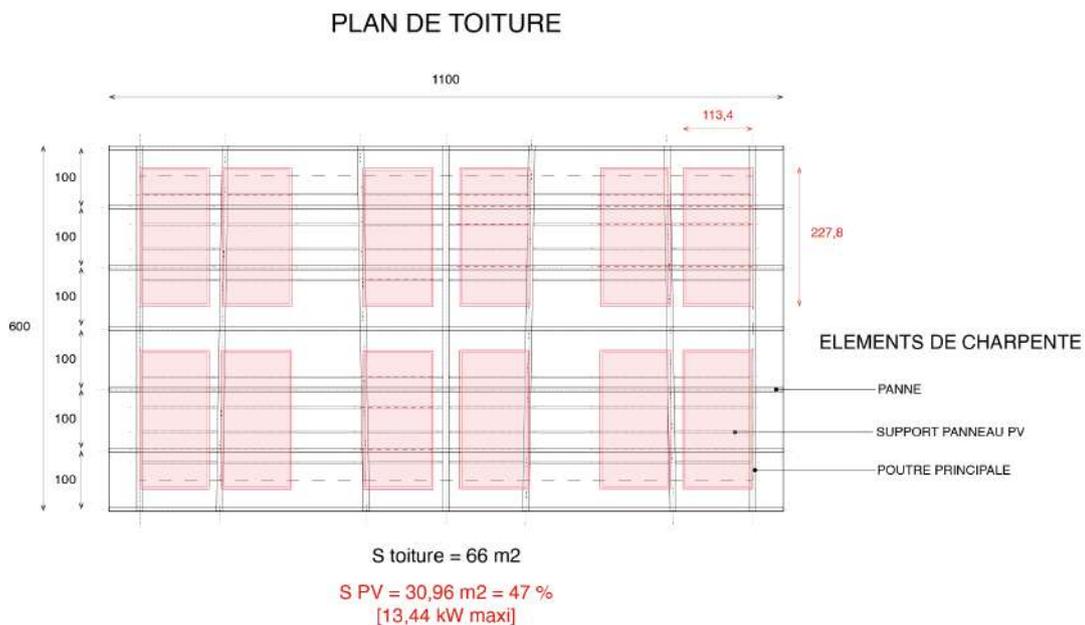


Figure 66 : plan d'étude d'implantation de panneaux photovoltaïque en toiture (crédit personnel)

Ce catalogue de solutions techniques montre ainsi l'adaptabilité du système constructif, dont la mise en œuvre pourra être adaptée à différents sites, terrains et configurations d'exploitation. C'est pourquoi l'intention initiale de réaliser un unique prototype test s'est élargie à un chapelet de plusieurs petits prototypes pilotes disséminés sur le territoire afin de tester plusieurs combinaisons s'adaptant à différents contextes de l'île.

⁶⁵ Références du panneau envisagé : Longi LR5-72HTH 560 - 585 M, fiche technique disponible à l'adresse suivante :

https://static.longi.com/Hi_MO_6_Explorer_LR_5_72_HTH_560_585_M_V03_UT_b3ca936148.pdf

⁶⁶ Puissance maximale qu'un panneau solaire est capable de fournir dans les conditions idéales

IV.3. Étude des sites d'implantation des prototypes

La confrontation du prototype expérimental à plusieurs sites, pour différents usages et activités, à des altitudes et conditions climatiques variées, conduit à différents choix constructifs en ce qui concerne l'enveloppe. L'intérêt de cette étude comparative réside dans l'observation de l'évolution de ces structures dans différents contextes. Comment vont-elles réagir ? vont-elles se déformer de manière identique ? vont-elles vieillir à la même vitesse ? Quels paramètres devront être adaptés pour quels types de terrains ?

Une partie de mon travail a donc été d'identifier différents sites représentatifs de la diversité climatique de l'île, puis de trouver des parcelles et des exploitants agricoles ou collectivités publiques volontaires pour participer à ce processus d'expérimentation. Des échanges avec les exploitants et une étude de l'exploitation ont conduit à la définition de l'implantation et des caractéristiques du prototype qu'ils hébergeront, puis d'une budgétisation et d'une planification de chantier en fonction des contraintes de site.

Ce chapitre présente les principaux sites d'accueil des prototypes, décrivant respectivement leur localisation, altitude, type de culture, typologie de terrain, surface de serre envisagée, objectif programmatique, implantation et choix constructifs. Ce rapport se concentre sur les sites d'étude localisés sur l'île. Mais suite au lancement de l'appel à projet, des demandes nous sont parvenues des îles voisines des Mascareignes, notamment de Mayotte et de l'île Maurice. Cet intérêt est prometteur et fait apparaître un potentiel de développement du modèle dans les îles de l'océan Indien.

IV.3.1. Les bas de l'Ouest : Pépinière à Piton Saint Leu

Client : Carol Develter, pépiniériste, EARL Jasmin Mangua

Localisation : Piton Saint-Leu, La Réunion

Altitude : + 50 m

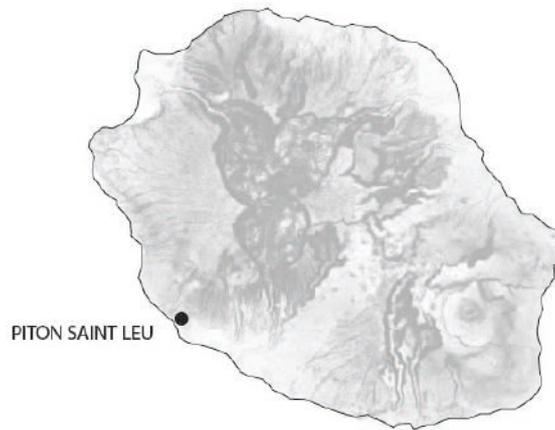


Figure 67 : Plan de situation, pépinière à Piton Saint Leu (crédit personnel)

Type de culture : pépinière plantes endémiques, plants en pots

Typologie de terrain : terrain de 500 m² relativement plat dans son ensemble, en pente sur ses bordures et abords, présence de palmiers plantés en rangs espacés d'environ 4m (possibilité de les déplacer en fonction de l'implantation de la serre)

Surface de serre : 100 m², constructible en deux phases (50 m²+ 50 m²)

Objectif programmatique : Constituer une zone d'ombre pour l'aménagement de la pépinière. Accueillir les plants en pots, abriter les plantes d'ombre en relation avec des espaces de pépinière extérieur pour les plantes de soleil et les plantes de zone humide, éventuel accueil du public avec un espace de vente.

Implantation :

L'ouvrage d'ombrière est implanté en limite de parcelle, participant par ses façades à la délimitation du terrain dédié à la pépinière. Cette implantation permet de conserver la plupart des palmiers plantés sur le terrain.

L'ombrière de 100 m² est constituée de deux modules de 50 m² indépendants qui pourront être construits en deux phases successives. Ces deux modules pourront être reliés par un système de lattage constituant une ombrière légère.



Figure 68 : Plan d'implantation, pépinière à Piton Saint Leu (crédit personnel, fond google earth)



Figure 69 : Terrain et abords, pépinière à Piton Saint Leu (crédit personnel)

Choix constructifs :

Toiture : ombrière (cannes de petit diamètre ou lattage) + couverture en tôle transparente ou polycarbonate pour protection de la structure
 débords de toiture d'au moins 50 cm pour créer une zone d'ombre dans la pépinière maximale et protéger la structure du soleil

Façades : façades ouvertes, bardage en lattes pour les côtés en bord de parcelle (pas besoin d'étanchéité latérale à l'air ou à l'eau pour les plants en pépinière)

Fondations : galets de site (gros blocs de basalte disponibles sur place issus de l'épierreage des terrains exploités)

IV.3.2. Les mi-pentes de l'Est : Serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne

Client : Isabelle et Alain Payet, maraîchers en agroécologie

Localisation : Cambourg, Saint-Anne, La Réunion

Altitude : + 200 m

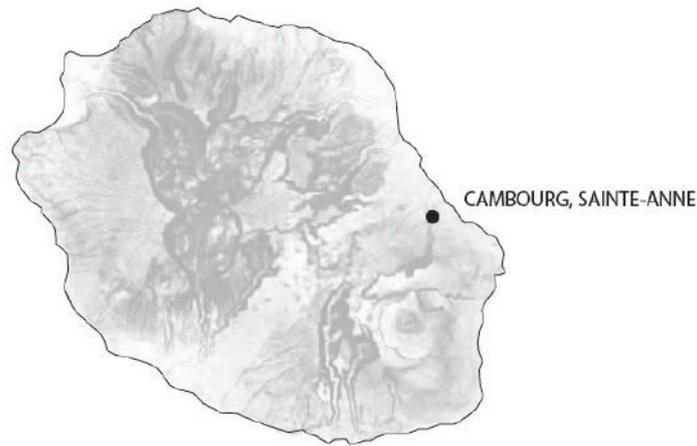


Figure 70 : Plan de situation, serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne (crédit personnel)

Type de culture : maraîchage certifié en agriculture biologique,

Typologie de terrain : exploitation de 5000 m², dont une série de bandes en terrasses de 5 m de large mises en culture dans la pente

Surface de serre : 50 m²

Objectif programmatique : Protection des cultures fragiles les plus vulnérables aux attaques d'insectes (notamment la mouche des fruits) et aux fortes intempéries : tomates et cucurbitacés
Régulation partielle de la température dans la serre + protection face aux fortes pluies pour limiter les grandes variations d'humidité qui engendrent le développement de champignons ou de maladies

Implantation :

L'ouvrage s'implante sur une des bandes de 5m de largeur, déjà terrassée. Le terrain d'implantation est relativement plat, limitant les travaux de terrassement. Situé proche de l'accès le plus direct à la parcelle, la serre pourra être facilement accessible.

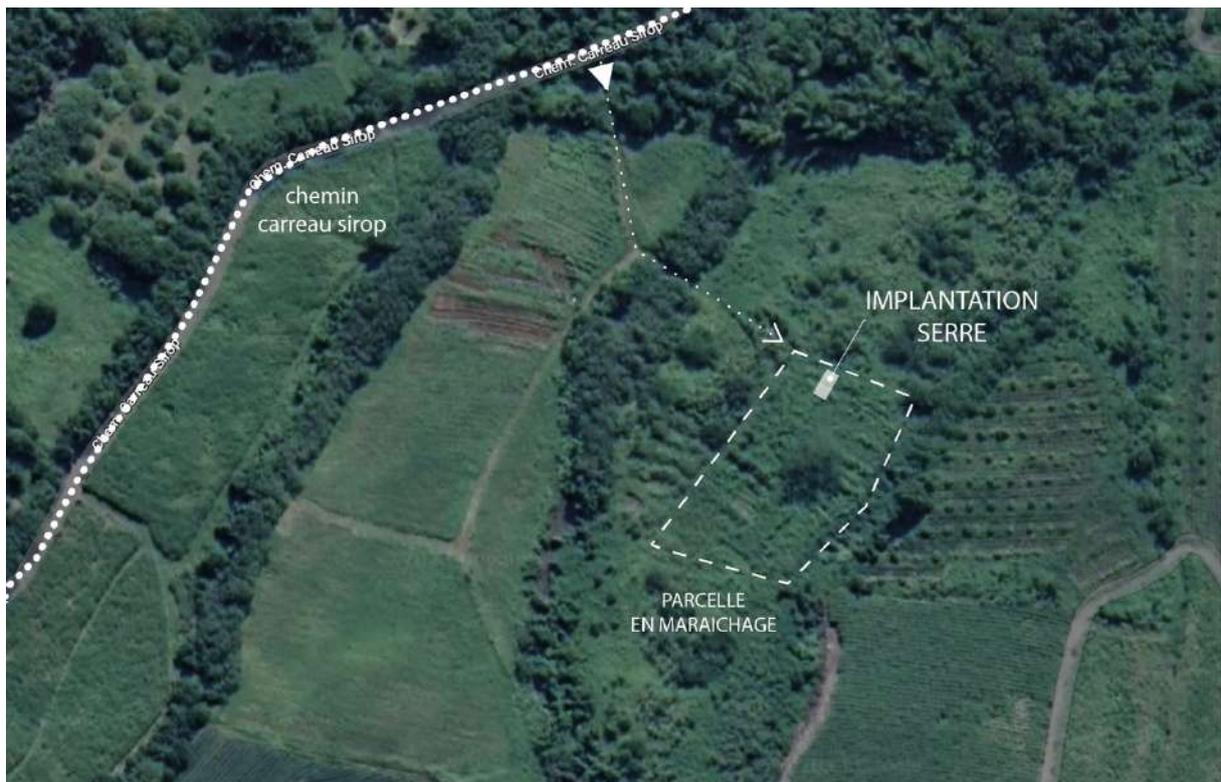


Figure 71 : Plan d'implantation, serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne (crédit personnel.)



Figure 72 : Terrain et abords, serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne (crédit personnel)

Choix constructifs :

Toiture : couverture translucide (tôle transparente ou polycarbonate)

Façades : 1 m de retombée en polycarbonate translucide sur les façades en partie haute + filets insectproof pour assurer protection aux insectes et ventilation en partie basse

Fondations : galets de site ou plots béton à définir

IV.3.3. Les hauts du Sud : Serre mixte à la Plaine des Makes

Client : Ecovillage, La Forêt des Makes

Localisation : Plaine des Makes, Saint Louis, La Réunion

Altitude : + 1200 m

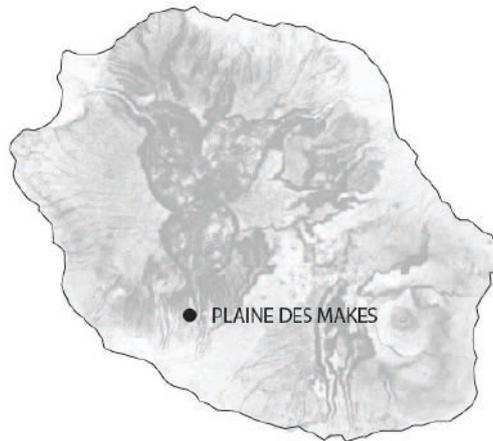


Figure 73 : Plan de situation, serre mixte à la plaine des Makes (crédit personnel)

Type de culture : maraîchage en agriculture biologique

Typologie de terrain : terrain plat en promontoire sur la plaine des Makes, actuellement cultivés en butes

Surface de serre : 500 m² (pourront être construites en plusieurs phases, à commencer par un prototype de 50 m²)

Objectif programmatique : Protection des intempéries et régulation hygrothermique pour maraîchage en plein champ, culture hors sol et bacs d'aquaponie.

Implantation :

Les serres seront implantées sur le terrain plat déjà terrassé. Les structures abritant des cultures sous serre (en plein champ, hors-sol et aquaponie) pourront être espacées, générant des espaces de culture en plein air protégés des vents dominants du nord-ouest. Des treilles ou structures accueillant un système de suspension pourront être ajoutées entre les serres pour structurer les zones de culture extérieures.



Figure 74 : Plan d'implantation, serre mixte à la plaine des Makes (crédit personnel, fond google earth)



Figure 75 : Terrain et abords (crédit personnel)

Choix constructifs :

Toiture : couverture translucide (tôle transparente ou polycarbonate)

Façades : façades rigides en polycarbonate fixées sur l'ossature

Fondations : plots bétons

IV.3.4. Les mi-hauts du Sud : Serre agricole expérimentale pour l'Armefflor à Saint Pierre

Client : Armefflor (association constituant un institut technique agricole pluridisciplinaire conduisant des travaux d'expérimentation et accompagnant la modernisation et la création de filières diversifiées de production végétales)

Localisation : Bassin Martin, Saint Pierre, La Réunion

Altitude : + 400 m



Figure 76 : Plan de situation, serre agricole expérimentale à Saint Pierre (crédit personnel)

Type de culture : maraîchage expérimental, vergers arbres fruitiers, horticulture, pépinière espèces endémiques

Typologie de terrain : 6,5 hectares, 6000 m² de serres expérimentales

Surface de serre : 100 m² de serre expérimentale

Objectif programmatique :

Serre expérimentale : mesure des conditions agronomiques générées dans la serre, étude du potentiel d'extension de ce système constructif à des grosses exploitations sur de grandes surfaces

Implantation :

Sur une des zones les plus exposées au vent du site pour permettre de tester la résistance mécanique de la structure dans les conditions les plus défavorables.



Figure 77 : Terrain d'expérimentation agricole (source : site de l'Armefflor à gauche, crédit personnel à droite)

Choix constructifs :

Toiture : bâche ou filet insectproof / Façades : bâche ou filet insectproof / Fondations : plots de fondation en béton

IV.4. Bilan et poursuite des études

Les cahiers des charges étant maintenant établis avec les différents partenaires, la construction de ces différents prototypes devrait voir le jour dans les mois à venir. Au fur et à mesure de ces chantiers test, le processus de fabrication et de mise en œuvre pourra évoluer vers plus d'efficacité et d'efficacités.

L'objectif est d'étudier ensuite ces structures pendant les années à venir pour prendre la mesure de leur robustesse et de leur durabilité.

Le travail en partenariat avec l'ESIROI permet de projeter plusieurs études :

- la modélisation complète du modèle de l'ouvrage agricole proposé, qui associé aux résultats de caractérisation des bambous mis en œuvre (qui est en cours), permettra de procéder à une optimisation du dimensionnement par le calcul
- la mesure des déformations des prototypes sous essai de chargement non destructif, puis comparaison au modèle numérique établi. Ceci pourra éventuellement permettre de continuer l'optimisation de la structure
- analyse de cycle de vie complète, pour quantifier plus précisément le gain environnemental des serres en bambou par rapport aux serres conventionnelles
- essais en soufflerie sur les maquettes à échelle réduite pour modélisation du comportement aérodynamique

Un véritable enjeu pour aller plus avant est maintenant d'avancer sur la caractérisation officielle du matériau (selon les normes en vigueur) pour le faire accepter par les bureaux de contrôle, les assureurs et les maîtrises d'ouvrage publiques. La caractérisation de la diversité du matériau bambou dans son ensemble et la différenciation des essences issues de gisements singuliers est un des enjeux du développement de la filière. C'est pourquoi *Bambooneem* finance régulièrement sur ses fonds propres des séries d'essais de caractérisation des bambous mis en œuvre. Dans le cadre de ce projet, ce sont des échantillons de bambou *Dendrocalamus asper* qui ont été préparés et transmis à l'ESIROI (École Supérieure d'Ingénierie Réunion et Océan Indien) pour effectuer les essais nécessaires à sa caractérisation mécanique. Le résultat des essais de compression, traction axiale, flexion et cisaillement permettra de caractériser précisément le bambou utilisé pour le prototype. Ceci leur permettra de réaliser une étude structurelle, d'établir un modèle numérique de calcul et un suivi de l'évolution du prototype, après soumission à des contraintes de vent fortes.

A plus long terme, la mise en relation et comparaison des quatre prototypes pourra permettre d'analyser l'insertion de ce système constructif dans les différents microclimats de l'île. L'étude de leur vieillissement pourra se baser sur les critères suivants :

- observations visuelles : apparition de fissure et localisation au sein de la structure, coloration grise, attaque par des insectes
- mesure des déformations progressives de la structure
- essai de charge non destructif chaque année et comparaison des résultats

D'un point de vue agronomique, des capteurs de température, d'hygrométrie et de luminosité seront placés dans les différents prototypes pour observer et analyser les conditions agronomiques au sein de ces ouvrages à fonction agricole.

D'un point de vue du développement de la filière, ce projet est un projet pilote qui permet de rassembler des acteurs autour du sujet de la ressource constructive de demain sur l'île. La construction d'un ouvrage pour le département sera un véritable levier de diffusion du modèle dans le monde agricole, puisque c'est cette collectivité qui instruit les dossiers de financements publics agricoles. Leur appui sera donc un vrai levier de diffusion de ce système constructif. Une fois que les prototypes auront prouvé leur efficacité, la duplication de ces structures sur d'autres exploitations agricoles pourra générer la demande nécessaire à la création des premières unités de traitement locales pour propulser la filière vers une chaîne de transformation complète.

CONCLUSIONS

Finalement, ce projet est à la fois une expérimentation constructive pour l'entreprise lui permettant d'ouvrir son activité sur un nouveau domaine d'activité, un nouveau modèle pour les agriculteurs mêlant production et construction, un projet pilote rassemblant les acteurs et éveillant l'intérêt du matériau pour le développement de la filière.

Le bambou se révèle être une plante d'intérêt majeur pour le territoire. Sa morphologie et la pluralité de ses utilisations pour structurer les sols, stocker du CO₂, se nourrir et construire invitent à imaginer une véritable économie durable autour de ce matériau aux multiples potentiels. Pour la construction, les savoir-faire artisanaux doivent aller à la rencontre des réglementations actuelles pour donner sa place à ce matériau durable dans la culture constructive locale.

Les contraintes cycloniques sont une adjonction de phénomènes climatiques extraordinaires, dont la puissance et la fréquence sont imprévisibles et aléatoires. Les Réunionnais ont coutume de dire « il y a cyclone et il y a Cyclone ! ». Ces tempêtes tropicales restent des catastrophes naturelles, dont l'extrême violence détruit parfois des réalisations pourtant dimensionnées pour résister à des vents forts et qui ont résisté aux cyclones précédents. Ainsi, le terme « anticyclonique » n'est absolument pas normé, il renvoie seulement à une conception dont la géométrie est prévue pour limiter la prise au vent, les phénomènes d'accélération des masses d'air, les risques d'arrachement, l'exposition de la structure aux pluies torrentielles... Il est donc indispensable de comprendre les phénomènes cycloniques pour y apporter une réponse cohérente. Mais il reste intéressant de savoir que les serres agricoles conventionnelles en acier, qualifiées d'« anticycloniques », ne sont aujourd'hui couvertes par aucun assureur sur le territoire de la Réunion, ce qui montre la complexité et l'imprévisibilité de ces phénomènes.

Enfin, les infrastructures agricoles de serres présentent une grande technicité, en particulier sur cette île aux climats très variés en fonction des expositions et des altitudes. Dans la recherche d'une autoproduction alimentaire sur le territoire, les ouvrages agricoles sont les garants d'une production vivrière stable et pérenne. Les serres représentant d'importantes surfaces bâties, il semble prioritaire de s'intéresser à trouver une solution durable pour la construction de ces lieux de productions vitaux pour l'île et ses habitants.

La durée de ce stage de quatre mois a été trop courte pour aller jusqu'au bout du processus de prototypage dans ce temps imparti. L'établissement d'un cahier des charges basé sur un état des lieux, la définition de l'implantation, la préparation et l'organisation du processus de construction du modèle ont préparé le terrain pour la construction de ces prototypes de serre, qui seront réalisés dans les mois à venir. Si je n'ai pas eu la chance de réaliser un prototype dans son intégralité, une multitude d'expériences de chantier m'ont permis de me familiariser avec le matériau et d'expérimenter différents types d'assemblages et de techniques constructives.

Ce projet de fin d'étude m'a fait découvrir un nouveau visage de la construction en étudiant le développement d'une filière autour d'un matériau biosourcé de sa production à sa mise en œuvre. Ce stage m'a mené à la rencontre d'une grande diversité d'acteurs qui m'ont permis de découvrir un territoire, d'en décrypter les problématiques et les enjeux pour y esquisser un mode de construire plus résilient pour l'île. De cette expérience très riche, j'aimerais finir par souligner quelques points qui ont particulièrement fait évoluer ma perception du monde constructif et ont ouvert des angles de réflexion.

La pluridisciplinarité : l'importance de croiser les approches et de rassembler les acteurs

Travailler sur un projet de recherche et développement dans une petite entreprise a été une expérience riche dans la polyvalence de la mission. En effet le développement d'un projet demande bien plus qu'une simple étude technique. Pour ce type de projet d'expérimentation constructive, il s'agit de trouver des moyens de financement, d'identifier des sites pour accueillir le projet, de sélectionner des clients potentiels, d'évaluer la viabilité économique du modèle sur le long terme, de communiquer sur le développement du projet, tout en menant les études de conception et de réalisation.

Ce projet m'a ainsi amenée à échanger avec énormément d'interlocuteurs différents : la région Réunion, le département 974, des mairies, des agriculteurs, des associations de constructeurs, des agriculteurs, des maitres d'œuvre, des architectes, des artisans, des bureaux de contrôle, des laboratoires d'essai, des étudiants et chercheurs de l'université, des fournisseurs, des permaculteurs, des entreprises d'insertion... Cela m'a fait prendre conscience de la diversité des acteurs impliqués dans le développement d'une filière. Rassembler ces acteurs qui font face, chacun, à des enjeux et intérêts différents, demande de bien comprendre les interrelations qui les lient, mais aussi d'adapter son discours et ses outils de communication à chacun d'entre eux.

J'ai également pu me rendre compte que la mise en commun des savoirs et savoirs faire transversaux à différents domaines d'activités voisins permet d'enrichir les réflexions, d'accélérer les phases de recherche, de mettre en commun des moyens d'action et de stimuler l'intérêt général autour d'un sujet.

La multiplicité des approches se décline également à l'échelle de l'individu et de l'entreprise. J'ai pu apprécier la richesse et l'expertise générée par une structure qui conçoit et réalise ses ouvrages. La pratique constructive de terrain et les phases d'étude de conception se nourrissent réciproquement, pour enrichir le savoir-faire de l'entreprise et ainsi que ses projets. Plus largement, j'ai eu la chance d'être intégrée complètement à l'activité de l'entreprise, ce qui m'a permis de découvrir le fonctionnement interne d'une entreprise, de comprendre les questions pragmatiques sous-jacentes aux choix stratégiques adoptés. Le coût, la rentabilité d'une opération, la gestion interne des ressources humaines et matérielles, l'éthique de projet, l'engagement écologique, l'investissement dans la recherche sont des critères qui orientent les choix quotidiens d'une entreprise.

Penser la filière : unir le constructif à l'agricole

Le développement de la filière bambou, un matériau biosourcé au cycle de croissance rapide, met en exergue la proximité entre les domaines agricole et constructif. Lorsque l'on résonne à l'échelle de la filière, le projet de construction est aussi projet agricole de sylviculture. La

quantité de matière première produite définit la capacité de construction avec le matériau qui en est issu. La géométrie des ouvrages se base sur des tailles de cannes impliquant l'utilisation de certaines essences spécifiques. La localisation des zones de plantation sur le territoire répartit la ressource sur l'île pour minimiser ensuite l'énergie dépensée dans le transport. L'équilibre de la production et de la demande garantit et sécurise des emplois locaux sur la chaîne de transformation de la matière au matériau de construction.

C'est en ce sens que je trouve que mon PFE est finalement allé au-delà du domaine du Génie Civil, en me confrontant directement au monde agricole, à sa technicité et à ses enjeux. Penser une production de matière constructive au service d'une production nourricière. Penser l'interaction des cultures de matière et des cultures vivrières sur des terrains contraints par leur topographie mouvementée et leur climat sévère. Penser l'influence du système constructif sur la manière de cultiver la matière. C'est toutes ces questions qui s'ouvrent en juxtaposant ces deux domaines d'activité. C'est la manière d'y répondre qui définira l'équilibre et la résilience de la filière sur le long terme.

Le temps : de l'urgence climatique au temps du projet

« Ce rôle premier du temps, les amoureux du marché veulent le nier. Dans toute l'histoire, les économies nationales furent d'abord protégées par des barrières douanières. Tel était le rôle d'un protectionnisme dit « éducatif ». On ne les laissa affronter la concurrence qu'une fois adultes. C'est-à-dire fortifiées. Ce répit est aujourd'hui interdit. La mondialisation qui annule l'espace veut aussi tuer le temps. Peut-être que le renchérissement du prix de l'énergie, en redonnant un vrai coût aux transports, redonnera de la réalité à l'espace et ressuscitera le temps. » Eric Orsena⁶⁷

Ce stage pluridisciplinaire, m'a fait prendre conscience des échelles de temps liées au développement d'un projet. Dans un contexte d'urgence climatique, qui voit l'état de la planète se dégrader de jour en jour, le temps est précieux. On voudrait que les choses se mettent en place immédiatement pour enrayer les réactions en chaînes de dégradation de notre environnement de vie. Or, lorsqu'on se confronte au contexte du monde de la construction, aux constructeurs, aux organismes de normalisation, aux institutions publiques, on s'aperçoit que l'appréciation du temps est très subjective. Les uns ont besoin de plusieurs mois pour organiser un rendez-vous pour esquisser les prémises d'un projet qu'ils qualifient pourtant « d'intéressant et prometteur ». Les autres voudront que la graine de bambou que l'on plante aujourd'hui leur fournisse un matériau de construction robuste en quelques mois seulement. Et entre ces extrêmes, il faut composer avec les intérêts des uns et des autres pour tenter de faire grandir une filière durable qui pourra demain rendre l'île moins dépendante à l'importation. Le temps est donc précieux mais il est indispensable de laisser à chaque acteur de la filière le temps de se positionner, de se définir de nouveaux objectifs et de s'adapter à un environnement en transition.

Il faut du temps à une plante pour d'une graine devenir une matière mature pour construire. De même, il faut du temps à une idée pour émerger, murir, se diffuser puis infuser dans la conscience des acteurs qui ont le pouvoir de la mettre en œuvre.

⁶⁷ *Voyage aux pays du coton, Petit précis de mondialisation, édition Fayard*

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages

CAUE 31, Chambre d'agriculture Haute Garonne, *L'insertion des bâtiments agricoles dans le paysage - Guide méthodologique*, [non daté]

Chambre des Métiers de la Réunion, *Le guide de construction en région cyclonique (clos et couvert)*, [non daté]

DUNKELBERG, Klaus, *Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben*, IL 31, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, 2000

ETAVE, Corinne, *Etude typologique des conditions d'adaptation au climat des constructions à l'île de la Réunion (immeubles collectifs, bâtiments administratifs et scolaires)*, 1983

MINKE, Gernot, *Building with Bamboo*, Birkhauser, Basel, 2012

POTHIN, Jean (Ingénieur SOCOTEC, Vice président de COBATY Réunion), *Cyclones ... Environnement - Constructions - Désordres - Remèdes*, 1990

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social affairs, ST/SOA/113 : *The use of bamboo and reeds in building construction*, New York, 1972

VAN DER LUGT, Pablo, *Booming bamboo: the (re)discovery of a sustainable material with endless possibilities*, Naarden, Materia, 2017

VAN VEGESACK, Alexander, VELEZ, Simon, «Grow your own house», Vitra Design Museum, 2000

Articles, rapports, études et normes

Biorev'Tropic, Nomadéis, *Diagnostic des ressources mobilisables, Matériaux locaux pour le bâti tropical à la Réunion*, 2018, disponible à l'adresse : <https://www.nomadeis.com/dl/2018/04/Rapport-final-VF.pdf>

CIRBAT, FCBA, *Essais mécaniques du Cryptomeria*, 2013

DIXON, P.G. et al., *Comparison of the Structure and Flexural Properties of Moso, Guadua and Tre Gai Bamboo*, *Construction and Building Materials* 90 (August 2015): 11-17 © 2015 Elsevier Ltd

FRIZON, Felipe, ROSSETO, Diego Rizzotto, OSTAPIV, Fabiano, *Study of the Aerodynamic and Structural Behavior of an Arched Bamboo Greenhouse*, *MIX Sustentável*, v. 8, n. 3, p. 35- 46, mai 2022, Disponible à l'adresse : <http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>

FUNG, Thibaut, RAT, Christophe, *Schéma directeur de filière BAMBOU : Ile de La Réunion 2020-2030*, disponible à l'adresse : <https://bambooneem.re/fr/plan-de-filiere-bambou-2020-2030-ile-de-la-reunion/>

GIRAUD, Edmond, HASNENE, Aliasgar, DE SIGOYER, Chrystol, Détermination des caractéristiques mécaniques du bambou Moso, ESIROI, Université de la Réunion, 2022

GHAVAMI, K., Propriedades dos Bambus e suas aplicações nas obras de Engenharia, Arquitetura e Desenho Industrial, Artigos Compilados do Autor, CTC/ PUC-RIO, 1995

HUGODOT, Philippe, DUBOIS, Pierre, *Rapport de l'inspection générale de l'environnement*, « Cyclone Dina à la Réunion les 22 et 23 janvier 2002 : caractérisation, conséquences et retour d'expérience », Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 29 janvier 2003, disponible à l'adresse suivante : <https://www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2022/01/cyclone-dina-2002.pdf>

HUY, Bao, LONG, Trinh Thang, *A manual for bamboo forest biomass and carbon assessment*, INBAR Technical Report, INBAR Technical Report, 2019, disponible à l'adresse : <https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2020/05/1574823296.pdf>

INBAR, Nouvelles du bambou et du rotin, n°4, vol.2, décembre 2021, p.5, https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2021/10/BRU_2-4_FR_Web.pdf

NF EN 1991-1-4 : Eurocode 1 - Action sur les structures

NF EN 1995-1-1 : Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois

NF P06-002, P06-006, AFNOR : NV 65 - Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions

RAMANANANTOANDRO, Tahiana, RABEMANANJARA, Zo Hasina, RANDRIANARIMANANA, Jean-Jacques, POMMIER, Régis, Valorisation de la filière bambou dans les zones orientales de Madagascar : contraintes et opportunités, *Bois et Forêts des tropiques n°316*, 2013

VAN DER LUGT, Pablo, VOGTLANDER, J.G., *The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products, Life-cycle assessment and carbon sequestration*, INBAR Technical Report n°35, 2015, disponible à l'adresse : <https://www.inbar.int/wp-content/uploads/2020/05/1489458449.pdf>

VAN HEURN, Ernst, VAN DER POST, Kees, *Agriculture sous abri : Structure, conditions requises et usage des serres sous différents climats*, Fondation Agromisa, Wageningen, 2004, Disponible à l'adresse : https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/73069/Agriculture_sous_abri.pdf?sequence=1

Mémoires

LEGRAND, Charles, L'architecture hybride et légère en bambou, 2018

FUNG KWOK CHINE, Thibaut, Le Bambou à l'île de la Réunion : entre utopie et réalité

FUNG KWOK CHINE, Thibaut, Expérimentation et prototypage de traitements et d'assemblages structuraux en bambou

PERRET, Rida, Architecture et environnement : le bambou, une réponse traditionnelle aux enjeux contemporains

Webographie

Agriculture du Maghreb, « Les serres en bambou ont la côte », 2016 [en ligne], [consulté le 29 novembre 2022], disponible à l'adresse : <https://www.agri-mag.com/2017/06/28/les-serres-en-bambou/>

Bamboo : 21st century steel, David Trujillo, TEDxCoventryUniversity, [en ligne], 20 février 2016, [Consulté le 3 janvier 2023], Disponible à l'adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=XSuz6ukuz5s>

Bilan GES, ADEME, [en ligne], [consulté le 06 janvier 2023], disponible à l'adresse : https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?batiments.htm

Calculateur d'émissions de gaz à effet de serre de l'aviation, Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires, Ministère de la Transition Energétique, disponible à l'adresse : <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr>

Chambre d'agriculture de La Réunion, [en ligne], [Consulté le 28 février 2023], Disponible à l'adresse: <https://www.reunion.chambagri.fr/>

Fédération Française du Bâtiment, [en ligne], [Consulté le 12 décembre 2022], Disponible à l'adresse: <https://cm-assurance-decennale.fr/hausse-des-prix-des-matériaux-de-construction-2021/>

Moso Bamboo, *Quelle est la quantité de CO2 stockée dans le bambou ?*, [en ligne], [consulté le 23 décembre 2022], Disponible à l'adresse suivante : https://blog.moso-bamboo.com/fr/quelle-est-la-quantite-de-co2-stockee-dans-le-bambou?lang_selected=true&hsLang=fr

Observatoire Energie Réunion, [en ligne], [consulté le 12 février 2022], Disponible à l'adresse suivante : <https://oer.spl-horizonreunion.com/emissions-de-ges/gaz-a-effet-de-serre-la-reunion>

Observatoire des Prix des Marges et Revenus à la Réunion, [en ligne], [Consulté le 12 décembre 2022], <http://www.opmr.re/wp-content/uploads/2018/12/12Pages-PrixMateriaux-17-148-161118-ECR-V1.pdf>

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Croquis de réunion (crédit personnel)	9
Figure 2 : Dendrocalamus Asper, Bambusaie du Guillaume, La Réunion (crédit personnel).....	11
Figure 3 : Illustration présentant les rhizomes des bambous cespiteux (à gauche) et traçants (à droite), (Building with Bamboo, Gernot Minke)	12
Figure 4 : [1] Bambus Borbonicus « Calumet », [2] Dendrocalamus Asper , [3] Dendrocalamus Asper Itam, [4] Dendrocalamus Giganteus, [5] Phyllostachys Pubescens « Moso », [6] Phyllostachys Aurea, [7] pousse de Guadua Angustifolia, [8] Bambusa Vulgaris (credits personnels)	13
Figure 5 : Morphologie du bambou (croquis personnel).....	15
Figure 6 : Cycle de pousse du bambou (croquis personnel).....	16
Figure 7 : Comparaison des énergies de production entre le bambou et d'autres matériaux, (source : Legrand C.).....	18
Figure 8 : une grande diversité de formes constructives issues de la canne de bambou (croquis personnel, inspiré d'un schéma de Booming Bamboo, Pablo VAN DER LUGT)	20
Figure 9 : Cannes entières [1], lattes [2], lattes tressées [3], lamellé collé [4], mats [5], sections transversales [6]	21
Figure 10 : Tableau présentant les caractéristiques géométriques de quelques espèces de bambou (sources multiples, notamment Bambus Bamboo, Klaus DUNKELBERG)	21
Figure 11 : Cycle de transformation du bambou de la matière au matériau de construction (croquis personnel).....	22
Figure 12 : Schéma représentant le rapport entre le niveau de standardisation d'un produit et l'énergie dépensée pour sa production (croquis personnel).....	27
Figure 13 : Frise chronologique du développement schématique de la filière sur court, moyen et long terme (croquis personnel).....	30
Figure 14 : Géométrie d'une canne de bambou du pied à la tête (croquis personnel).....	31
Figure 15 : Définition de l'effilement de la section d'après la norme ISO_19624_2018	31
Figure 16 : Définition de la courbure de la section d'après la norme ISO_19624_2018.....	32
Figure 17 : Graphiques présentant les variations de la taille des sections internodales le long d'une canne et entre différentes espèces (source : K.Ghavami)	33
Figure 18 : Dessin d'une portion d'une section internodale de Dendrocalamus strictus, montrant la concentration des fibres sur la partie externe (source : The use of bamboo and reeds in building construction, United Nations)	33
Figure 19 : Une section naturellement efficace d'un point de vue mécanique (source : Booming Bamboo, Pablo VAN DER LUGT)	34
Figure 20 : Tableau présentant la comparaison du rapport résistance/poids volumique du bambou à d'autres matériaux conventionnels, (source : C. Legrand).....	35
Figure 21 : Résistance à la compression de cannes de guadua angustifolia de 1m, 2m, 3m (source : Building with Bamboo, Gernot Minke).....	36
Figure 22 : Dessins d'assemblages traditionnels (source : Building with Bamboo, Gernot Minke).....	38
Figure 23 : Assemblage en gueule de poisson (croquis et photo, Building with Bamboo, Gernot Minke).....	39
Figure 24 : Assemblages moisés (croquis Bambus Bamboo, photo Bambus Bamboo, photo personnelle)	39
Figure 25 : Assemblage par emboîtement longitudinal (croquis Building with Bamboo, Gernot Minke)	39
Figure 26: Assemblage avec ligature (croquis Bambus Bamboo, Photo Bambus Bamboo, photo personnelle)	40
Figure 27 : Assemblages par connecteurs métalliques (photos Building with Bamboo, Gernot Minke)	40

Figure 28 : Photographie aérienne du cyclone Firinga, 1989.....	43
Figure 29 : Zone de convergence, zone de cyclogénèse, (source : Jean Pothin, Cyclones..., p.15).....	45
Figure 30 : Illustration de la cyclogénèse (source : Jean Pothin, Cyclones..., p.20).....	46
Figure 31 : représentation de la vitesse de vent dans les différentes zones de la dépression (source : Jean Pothin, Cyclones...)	47
Figure 32 : Vitesse et pression dynamique de pointe pour chaque catégorie de terrain à la Réunion .	52
Figure 33: pressions dynamiques de pointe, pondérées à l'ELU, pour l'île de la Réunion	52
Figure 34 : culture en plein champ sous serre (à gauche) culture suspendue à droite de l'image et non suspendue à gauche, culture en plein champ en extérieur (au centre), culture hors sol sous serre (à droite) (crédits personnels).....	57
Figure 35 : serres tunnel avec pieds droits, revêtement bâche plastique (à gauche : Agrilogic systemes) et filet insectproof (à droite : exploitation Jean Vidal, Fleurimont, credit personnel)	59
Figure 36 : axonométrie type d'une serre tunnel avec pied droit (Agrilogic systemes)	59
Figure 37 : exploitation Jean Vidal à Fleurimont (à gauche), serre Agrinea (au centre)	60
Figure 38 : Croquis d'une trame structurale de serre agricole anticyclonique (croquis personnel)	60
Figure 39 : serres en bambou, Nigeria (AgriMag).....	61
Figure 40 : facteurs d'émission au m ² des bâtiments en fonction de leur type et de leur activité (source : ADEME)	64
Figure 41 : Cycle d'absorption et d'émission de CO ₂ d'un produit manufacturé en bambou (source : INBAR).....	65
Figure 42 : Emprunte carbone sur l'intégralité du cycle de vie (en kg CO ₂ eq / kg ou /m ³ de matériau) de différents matériaux de construction (source : INBAR)	65
Figure 43 : Graphique présentant la comparaison de l'emprunte carbone de différents matériaux de construction (en kg CO ₂ eq / kg ou /m ³ de matériau) (source : INBAR)	65
Figure 44 : Tableau présentant la comparaison de l'impact carbone d'une structure de serre de 50m ² en acier ou en bambou	66
Figure 45 : Image perspective de présentation de l'étude d'un modèle de serre agricole (croquis personnel).....	71
Figure 46 : Coupes de travail (crédit personnel).....	72
Figure 47 : Maquettes d'étude, échelle 1 :25, construction des fermes à plat sur l'épure (à droite), levage des fermes et ceinturage horizontal (au centre), maquette structure stable (à gauche) (crédits personnel).....	74
Figure 48 : Maquette d'étude échelle 1:1 soumise à un essai de chargement non destructif (à gauche), ouvrage final réalisé (à droite), Nomadic Museum, Mexico City, Mexique, Simon Velez	74
Figure 49 : Chiffrage du prototype final	76
Figure 50 : Photographies de maquettes d'étude des 3 différents modèles (crédit personnel).....	80
Figure 51 : Tableau comparatif des 3 modèles sur des critères de résilience	80
Figure 52 : Étapes de montage de la structure	88
Figure 53 : Axonométrie de la structure du prototype d'étude (crédit personnel).....	89
Figure 54 : Différentes configurations de positionnement des parois (croquis personnel)	98
Figure 55 : Paroi réalisée avec des cannes de petit diamètre, coupe et façade détail (croquis personnel), photographie de mise en œuvre (crédit personnel).....	99
Figure 56 : Paroi réalisée par empilement de cannes entières de gros diamètre, coupe et façade détail (croquis personnel), photographie de mise en œuvre (Building with Bamboo, Gernot Minke).....	100
Figure 57 : Paroi en lattes de bambou, bardage horizontal (crédit personnel), coupe détail bardages horizontal puis vertical (croquis personnels), bardage vertical (Bambus Bamboo, Klaus Dunkelberg)	100
Figure 58 : Paroi en mats, coupe et façade détail (croquis personnel), mats verticaux tressés sur des lattes (Bambus Bamboo, Klaus Dunkelberg), mats horizontaux fixés sur ossature (Kawayan collective)	101

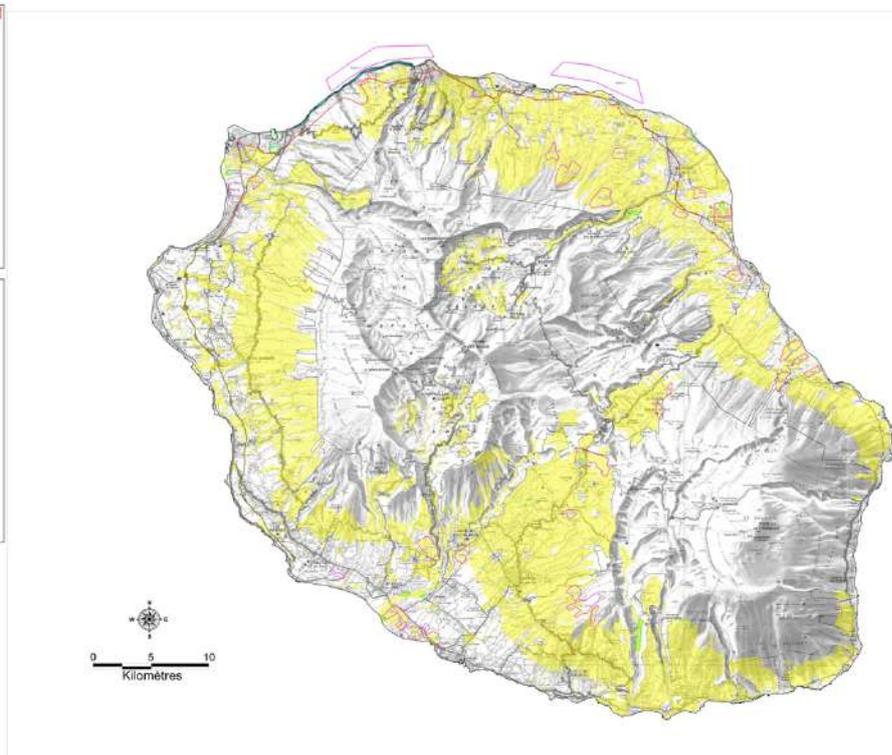
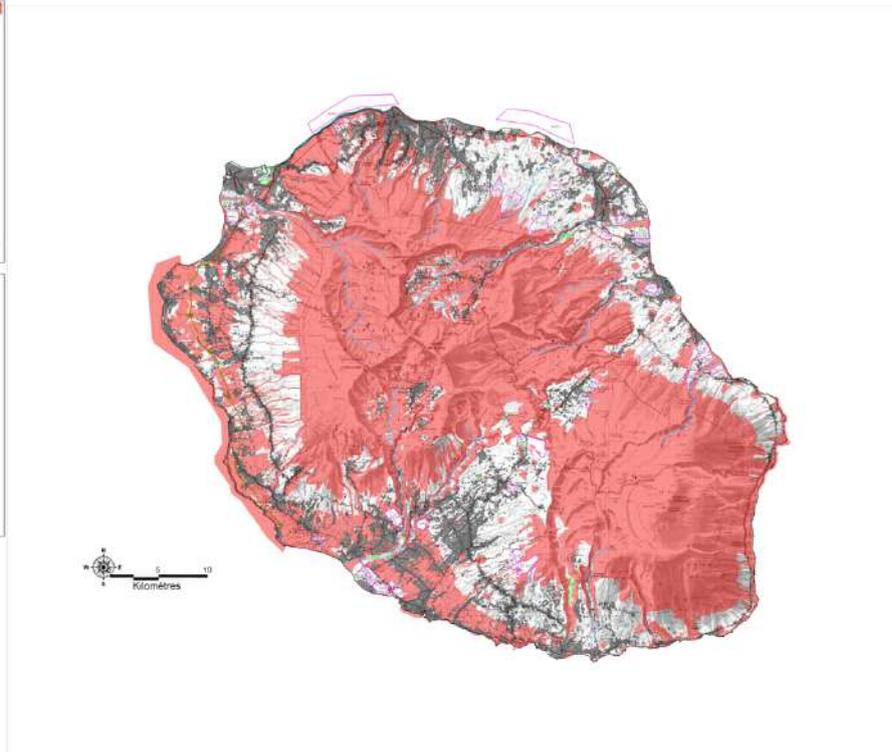
Figure 59 : Paroi « bareque », coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de mise en œuvre de terre crue sur des fragments de mats tressés sur une ossature (Building with Bamboo, Gernot Minke).....	102
Figure 60 : Paroi en bauge armée de bambou, coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de mise en oeuvre (Building with Bamboo, Gernot Minke)	103
Figure 61 : Paroi en briques de terre crue sur trame en bambou, coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de mise en oeuvre (Building with Bamboo, Gernot Minke)	103
Figure 62 : Paroi textile, coupe et façade détail (croquis personnel), exemple de paroi en toile tendue (Building with Bamboo, Gernot Minke)	104
Figure 63 : Exemples de toitures en ombrière, juxtaposition de cannes de petit diamètre (en haut), tressage de lattes de bambou (en bas), (crédit personnel).....	105
Figure 64 : Exemple de toiture translucide, pergola Confucius, Piton Saint-Leu (crédit personnel).....	106
Figure 65 : Exemple de toiture étanchée, faux plafond isolant en panneaux de ravenala (à droite), en mats (à gauche), Hôtel Dina Morgabine, Saint Gilles les Bains (crédit personnel).....	106
Figure 66 : plan d'étude d'implantation de panneaux photovoltaïque en toiture (crédit personnel) ..	107
Figure 67 : Plan de situation, pépinière à Piton Saint Leu (crédit personnel).....	109
Figure 68 : Plan d'implantation, pépinière à Piton Saint Leu (crédit personnel, fond google earth)....	110
Figure 69 : Terrain et abords, pépinière à Piton Saint Leu (crédit personnel)	110
Figure 70 : Plan de situation, serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne (crédit personnel)	111
Figure 71 : Plan d'implantation, serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne (crédit personnel,)....	112
Figure 72 : Terrain et abords, serre de maraichage à Cambourg, Saint Anne (crédit personnel)	112
Figure 73 : Plan de situation, serre mixte à la plaine des Makes (crédit personnel)	113
Figure 74 : Plan d'implantation, serre mixte à la plaine des Makes (crédit personnel, fond google earth)	114
Figure 75 : Terrain et abords (crédit personnel).....	114
Figure 76 : Plan de situation, serre agronomique expérimentale à Saint Pierre (crédit personnel)	115
Figure 77 : Terrain d'expérimentation agricole (source : site de l'Armeflhor à gauche, crédit personnel à droite).....	115

ANNEXES

Annexe 1

Cartes présentant les carrières exploitées et en exploitation à la Réunion, les zones protégées (en rouge) où il est interdit d'exploiter, les zones sensibles (en jaune) où l'exploitation est très restreinte.

Source : BRGM



Annexe 2

Tableau de synthèse présentant les caractéristiques mécaniques de différentes essences de bambou trouvées dans la littérature. Ce tableau incomplet et non exhaustif est un outil à compléter pour enrichir une connaissance globale sur la diversité de chaque essence spécifique.

CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU BAMBOU												
	Source	ρ masse volumique kg/m ³	σ_d Résistance à la compression parallèle Mpa	σ_z Résistance à la traction parallèle Mpa	σ_b Résistance à la flexion Mpa	σ_{zperp} Résistance à la traction perpendiculaire Mpa	τ_b Résistance au cisaillement Mpa	Ed module d'élasticité (compression) Mpa	Ez module d'élasticité (traction) Mpa	Eb module d'élasticité (flexion) Mpa	module de rupture Mpa	
MATERIAUX CONVENTIONNELS												
		600	40 à 53	8 à 62	14 à 68		1,5 à 3,65	11000				
		7800		360 à 550				210 000				
		2400						25 000				
BAMBOU												
Bambus borbonicus (calumet)	[1]											
Bambusa Vulgaris	[1]		45,5	132,2				7620			114,7	
Bambusa Vulgaris	[3]	700							15900		122,4	
Bambusa Vulgaris	[6]		64,2	240	76,8				11000	14000		
Dendrocalamus Giganteus	[1]		62,7	190,7				14320			190,7	
Dendrocalamus Asper	[5]	744	30,8	103,9	83,2		35,4		21900			
Dendrocalamus Asper	[1]		60,5	212,7				13129			163,8	
Moso	[6]		48,32	149,95	130	1,26	12,1	21330	14052	22200		
Moso	[7]		45 à 65									
Guadua Angustifolia	[1] [4]		27 à 56	121,7 à 206,8				16400	20700	17900		
Guadua Angustifolia	[3]	820							17600		144,8	
Guadua Angustifolia	[7]							17000				
Phyllostachys aurea	[1]											
Phyllostachys bambusoides	[3]			262,9								
Bambusa tuldooides	[5]	712	26,2	85,5	71,6		41,6		22500			
Bambusa stenostachya (tre gai)	[7]											
Bamboo (général)	[3]	648 (de 500 à 790)	52 (de 31,5 à 72,5)						16 000 (de 12500 à 19500)		130 (de 90 à 170)	
Bamboo (général) d=10cm	[2]		63,6 à 86,3	227,7 avec noeud				15900		17000		
Bamboo (général)	[2]		62,1 à 93	148,4 à 384,3	76,3 à 276		19,8		20000			
Produits composite												
Laminated Guadua		715		132	5			19137	17468			
Sources												
[1]	MINKE, Gernot, <i>Building with Bamboo</i> , Birkhauser, Basel, 2012											
[2]	VAN DER LUGT, Pablo, <i>Booming bamboo: the (re)discovery of a sustainable material with endless possibilities</i> , Naarden, Materia, 2017											
[3]	UNITED NATIONS, Department of Economic and Social affairs, ST/SCA/113 : <i>The use of bamboo and reeds in building construction</i> , New York, 1972											
[4]	Etude réalisée dans le cadre de la construction du pavillon Hanovre, University of Valle (Cali), CIBAM (research center for bamboo and vegetable fibres) in Palmira											
[5]	GHAVAMI, K., Propriedades dos Bambus e suas aplicações nas obras de Engenharia, Arquitetura e Desenho Industrial, Artigos Compilados do Autor, CTC/PUC-RIO, 1995											
[6]	GIRAUD, Edmond, HASNENE, Aliasgar, DE SIGOYER, Chrystol, Détermination des caractéristiques mécaniques du bambou Moso, ESIR/OI, Université de la Réunion, 2022											
[7]	DIXON, P.G. et al., <i>Comparison of the Structure and Flexural Properties of Moso, Guadua and Tre Gai Bamboo</i> , Construction and Building Materials 90 (August 2015): 11–17 © 2015 Elsevier Ltd											

Résumé

Ce projet de fin d'étude s'intéresse à la question de la ressource constructive sur l'île de la Réunion. Il s'inscrit dans un contexte de forte dépendance à l'importation pour l'approvisionnement en ressources de ce territoire insulaire. Les matériaux de construction y sont en moyenne 30 à 40% plus cher qu'en métropole. Les agriculteurs, souffrant régulièrement des effets dévastateurs des cyclones, semblent à la recherche d'une solution moins coûteuse et plus durable pour leurs infrastructures, vitales pour espérer l'autosuffisance alimentaire de l'île. Une ressource biosourcée endémique semble pouvoir répondre par ses nombreuses qualités aux problématiques de construction durable qui s'imposent au territoire : le bambou. Dans le but de proposer une réponse aux enjeux territoriaux, écologiques et constructifs qui interrogent aujourd'hui le territoire réunionnais, cette étude vise à mettre en évidence les potentiels de développement de serres agricoles anticycloniques en bambou structurel sur l'île de la Réunion. Le projet vise, d'une part, à proposer une alternative aux hangars agricoles conventionnels en structure acier, via une solution technique *low-tech*, économe en matière et en énergie, dont la simplicité constructive permettra une plus grande accessibilité et une adaptabilité face aux mutations constantes des exploitations pour suivre les évolutions de la demande, du terrain et du changement climatique. D'autre part, il s'insère à plus grande échelle, dans le plan de développement de la filière de construction en bambou. Il vise à démontrer la pertinence de ce matériau à assurer des fonctions structurelles sur des bâtiments techniques aux dimensions conséquentes. Ce serait un levier potentiel pour le développement d'une industrie de production solide pour la filière dans sa globalité, un support sur lequel baser des études futures et une potentielle normalisation.

Ce projet est à la fois une expérimentation constructive pour l'entreprise lui permettant d'ouvrir son champ d'action sur un nouveau domaine d'activité, un nouveau modèle pour les agriculteurs mêlant production et construction, un projet pilote rassemblant les acteurs et éveillant l'intérêt du matériau pour activer le développement de la filière.

Abstract

This report focuses on the issue of the construction resource on the Réunion island. It takes place in a context of strong dependence on imports for the supply of resources of this island territory. Building materials are on average 30 to 40% more expensive than in metropolitan France. Farmers, regularly suffering from the devastating effects of cyclones, seem to be looking for a less expensive and more sustainable solution for their infrastructure, which is vital for the island's food self-sufficiency. An endemic biosourced resource seems to be able to answer by its numerous qualities to the problems of sustainable construction: bamboo. In order to propose an answer to the territorial, ecological and constructive stakes which question today the territory of Reunion Island, this study aims at highlighting the potential of development of anti-cyclonic agricultural greenhouses in structural bamboo on Reunion Island. The project aims, on the one hand, to propose an alternative to conventional agricultural greenhouses in steel structure. Developing a low-tech technical solution, economical in materials and energy, with a constructive simplicity will allow greater accessibility and adaptability to the constant mutations of the farms to follow the evolutions of the demand, of the land and of the climate change. On the other hand, it is part of the development plan of the bamboo construction sector on a larger scale. It aims to demonstrate the relevance of this material to ensure structural functions on technical buildings with consequent dimensions. It would be a potential lever for the development of a solid production industry for the entire sector, a support on which to base future studies and a potential standardization.

This project is at the same time a constructive experimentation for the company allowing it to open its field of action on a new field of activity, a new model for the farmers mixing production and construction, a pilot project gathering the actors and awakening the interest of the material to activate the development of the field.