

# **Etude, réalisation et analyse de poutres lamellé-collé en bambou**

Ing. B. HARGOT  
Ir A. MAHY  
ECAM – Bruxelles

*Le défi mondial de ces prochaines années se trouve dans la capacité de nos générations à considérablement modifier leur impact sur l'environnement sans entraver la croissance économique. Le secteur de la construction, le plus grand consommateur énergétique se doit de trouver des alternatives écologiques et évoluer dans cette vision. C'est dans cette perspective que s'inscrit ce travail afin d'étudier la possibilité d'exploiter le bambou comme élément structurel. L'étude nous a montré l'énorme potentiel que présente ce matériau tant du point de vue écologique qu'au point de vue des performances mécaniques.*

*Mots-clefs : poutre, lamellé-collé, bois, bambou, moulé, pressé, plancher, construction, fibre, lamelle, particule, colle, composite, structure.*

*The global challenge of the coming years will be to find ways to significantly change our environmental impact without hampering economic growth. The construction market, the largest energy consumer needs to find ecological alternatives and evolve in this vision. This work has studying the capacity of exploiting bamboo as structural element. The study has demonstrated the huge potential both in terms of environmental and mechanical performances which bamboo can offer.*

*Keywords: beam, glulam, wood, bamboo, moulded, pressed, flooring, construction, fiber, strip, particle, glue, composite, structure.*

## 1. Introduction

A travers une expérience de 8 mois en Asie dans le cadre d'un projet humanitaire, Benoît Hargot eut l'occasion de découvrir le bambou sous différents aspects : plantes, cuisines, mobiliers, maison traditionnelle, etc. Cependant, aucune exploitation industrielle ne lui semblait tirer profit de cette ressource dans la construction moderne.

En tant qu'étudiant ingénieur, interpellé par le cours « Matériaux bois » de ir A. Mahy, il s'est interrogé sur la façon dont les procédés et techniques couramment appliqués au bois pourraient s'adapter au bambou. Avec l'intuition que ce noble matériau pourrait offrir des perspectives économiques, mécaniques, et écologiques très intéressantes.

L'idée lui vint de réaliser une poutre en bambou suivant la technique du lamellé-collé et d'en faire l'étude. Par cette application bien précise, il cherchait à savoir si le bambou serait aussi performant, voire davantage, que son cousin le bois. Deux paramètres d'étude ont été retenus : le module d'élasticité en « image » des E.L.S.<sup>1</sup> et la contrainte de rupture en flexion en « image » des E.L.U.<sup>2</sup>.

Dans un premier temps, il nous partagera quelques informations trouvées dans la littérature spécialisée sur le bambou (point 2.). Nous entrerons ensuite dans son étude proprement dite : la réalisation et l'analyse de poutres lamellé-collé en bambou (point 3.).

## 2. Etude bibliographique

### 2.1 Généralité

Le bambou appartient à la famille des graminées à savoir des *Poacées* (tels le blé, le riz, le maïs), sous-famille des *Bambusoidées*. Cette sous-famille regroupe entre 1100 et 1500 espèces réparties entre 60 et 90 genres de bambous différents.

---

<sup>1</sup> Etats Limites de Services

<sup>2</sup> Etats Limite Ultimes

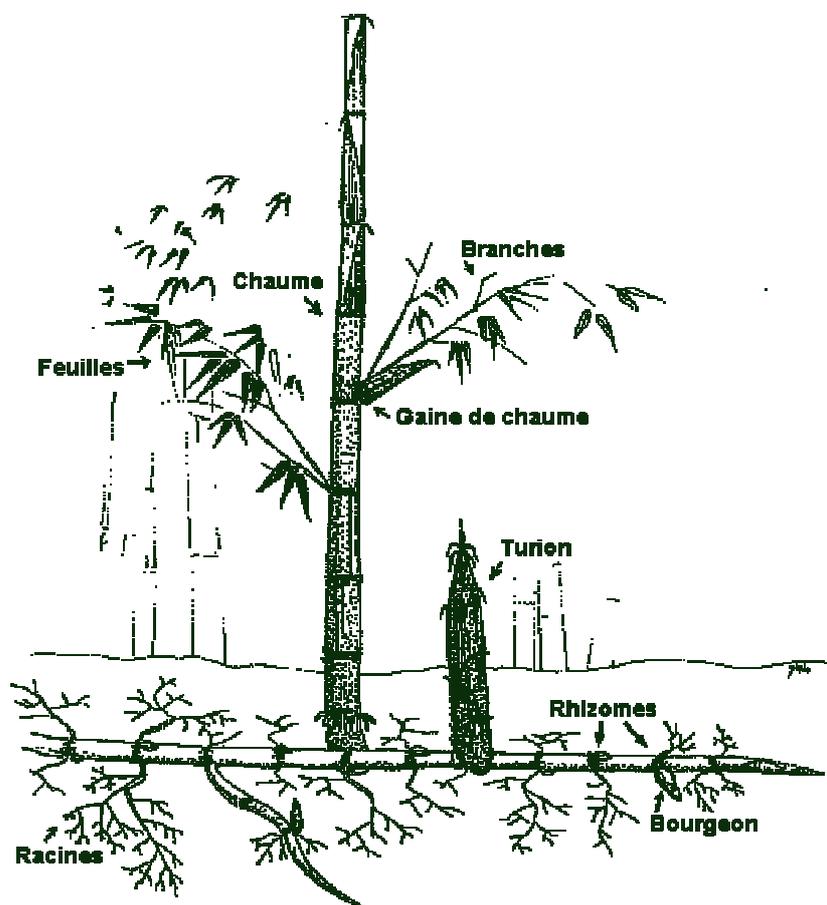


Figure 1 : Les différentes parties du bambou

Le *rhizome* est le système racinaire qui détient les réserves nécessaires à la croissance de la plante. On distingue deux sortes de propagation : la *sympodial* et la *monopodial*. La première forme une touffe plus ou moins dense de rhizomes courts et épais. La deuxième, dite traçante, génère des rhizomes longs et minces.

Autour des nœuds du rhizome se développent les racines et bourgeons. Certains bourgeons vont se développer et sortir de terre sous forme de *turions* enveloppés par une gaine protectrice. En se développant, ils forment des chaumes (cannes), généralement creux et constitués de nœuds et d'entrenœuds. Cette alternance constitue différents caissons au moyen de diaphragmes (fig. 3).

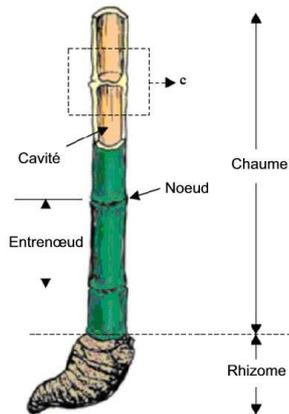


Figure 2 :  
Chaume et Rhizome

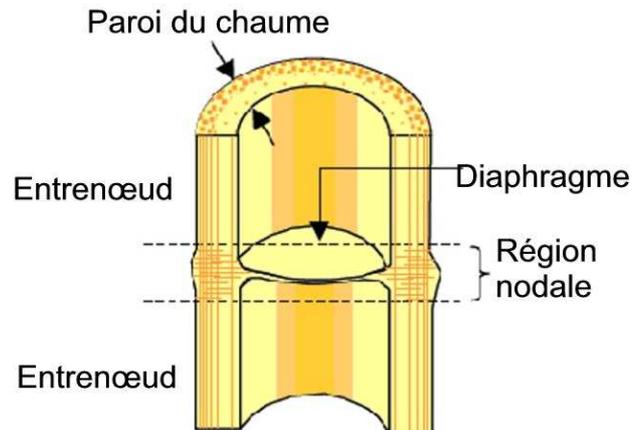


Figure 3 : Coupe longitudinale d'un chaume

Observons les lignes verticales dans la paroi qui représentent les fibres (fig. 3). Elles sont déterminantes au niveau des propriétés mécaniques du bambou.

Certaines espèces ont un chaume pouvant atteindre 35 m de haut et un diamètre de 25 à 35 cm. D'autres ne dépassent pas le mètre (en hauteur) et le centimètre (en diamètre). Contrairement aux troncs d'arbres se développant sur leur diamètre, le chaume se déplie comme une canne télescopique, à un rythme qui varie selon les espèces et conditions de croissance (jusqu'à un mètre par jour). Il atteint ainsi ses dimensions définitives en une saison.

La floraison reste le phénomène le plus mystérieux des bambous. Elle se produit à des intervalles de temps très longs et irréguliers, souvent de manière synchronique dans le monde entier pour une espèce bien définie, et cela, indépendamment de l'âge de la plante. Après avoir fleuri, les chaumes se dessèchent et meurent.

Le bambou se développe spontanément en Afrique, en Océanie, davantage encore en Asie et en Amérique. Il s'est adapté à de nombreux climats et températures (jusqu'à  $-20^{\circ}$ ). On le retrouve dans des écosystèmes très divers, également à des altitudes extrêmes (jusqu'à 3000 m dans l'Himalaya).

Ces qualités écologiques sont un formidable atout pour répondre aux actuels défis environnementaux : croissance rapide, rendement à l'hectare de plus du double de ceux connus pour le bois (jusqu'à 20-30 [T/(ha.an)]), alternative aux bois exotiques (déforestation), grande résistance à la sécheresse et à la pollution, assainissement des sols et épuration des eaux usées, un système racinaire à rhizomes empêchant l'érosion des sols, haut rendement photosynthétique, assimilation des carbonnes et production d'oxygène, formation de bosquets et de reboisements attirant diverses espèces d'oiseaux et d'animaux, source alimentaire (pousses souvent comestibles), etc.

La consommation énergétique nécessaire à la production rapportée à l'unité de résistance du matériau nous montre encore un avantage écologique loin d'être négligeable en faveur de l'utilisation du bambou (tab.1).

Matériau	Energie de production par kilo [MJ/kg]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Energie de production par m <sup>3</sup> [MJ/m <sup>3</sup> ]	Résistance utile [N/mm <sup>2</sup> ]	Rapport énergie par unité de résistance.
Acier	30	7800	234000	160	1500
Béton	0,8	2400	1920	8	240
Bois	1	600	600	7,5	80
Bambou	0,5	600	300	10	30
	(1)	(2)	(1) x (2) =(3)	(4)	(3) / (4)

Tableau 1: Comparaison des consommations énergétiques de production entres différents matériaux

Il faut néanmoins rester prudent avec les valeurs avancées. Il est évident que l'énergie de production du bambou est de loin inférieure à celle de l'acier voire du béton. Cependant, le facteur *confinement* est déterminant. En effet, ce tableau se base sur l'utilisation de cannes de bambou. Or, c'est la fabrication de panneaux et planchers qui représente en volume la plus importante exploitation du bambou. Et l'énergie nécessaire à leur fabrication est naturellement bien plus importante que pour la production d'une simple canne.

## 2.2 Propriétés mécaniques

Le bambou, au même titre que le bois, est composé de *cellulose*, *lignine* et *hémicellulose*. Les *celluloses* sont la principale source de propriétés mécaniques du bambou et du bois. Sa structure moléculaire est définie par

trois plans perpendiculaires. Le premier est constitué de nombreuses et fortes liaisons hydrogènes, le second par de plus faibles forces « Van der Waals » et le troisième par des liens covalents. L'observation de cette structure explique l'anisotropie du comportement de ce matériau. La résistance à la traction de la cellulose est évaluée à  $8000 \text{ N/mm}^2$ .

Le chaume est constitué de 55% de cellules de stockage, de 35% de fibres pour la résistance, de 10% de tissus conducteurs d'eau et de sucre. Le pourcentage de fibres est plus élevé dans les parties extérieures et inférieures du chaume. En voici une coupe transversale (fig. 4).

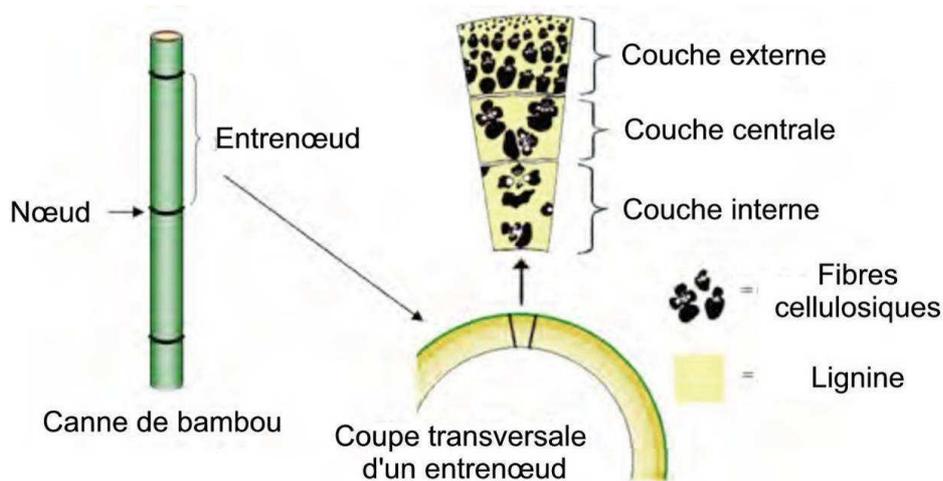


Figure 4 : Coupe transversale d'un entrenœud

Dans la couche externe du chaume, les vaisseaux sont plus petits et plus denses. Vers l'intérieur, ils sont plus gros et moins nombreux. Les tissus et les cellules vasculaires sont concentrés à l'intérieur tandis qu'à l'extérieur les fibres assurent la résistance. Ces dernières représentent 60 à 70% du poids des tissus.

Dans les entrenœuds, les faisceaux vasculaires sont axiaux, verticaux et parallèles entre eux. La plupart des faisceaux traverse directement les nœuds pour rejoindre les entrenœuds suivants. L'étude microscopique des nœuds révèle un caractère anatomiquement différent. En effet, certains paquets de vasculaires dévient de leur trajectoire à hauteur du nœud. Les uns dans la zone extérieure, se rassemblent et se lient à ceux de la branche. Les autres, dans la zone intérieure, se lient à ceux du diaphragme (fig. 5).

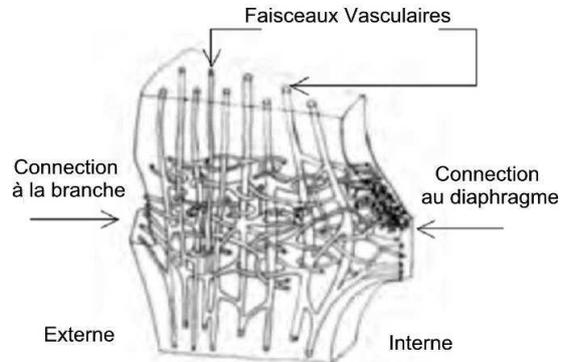


Figure 5 : Plan de détail d'un nœud

Le nœud est le paramètre qui influe le plus sur les propriétés physiques et mécaniques du chaume. Des études sur les nœuds du bambou ont montré que bien qu'ayant une densité plus élevée que celle des entrenœuds, ils sont nettement moins performants au point de vue de leurs propriétés mécaniques. Cette contre performance serait causée par la présence de fibres plus courtes et de faisceaux vasculaires tordus.

Comme pour le bois, les propriétés physiques et mécaniques du bambou changent considérablement entre les différentes espèces mais aussi entre différents chaumes d'une même espèce.

Vu la grande variabilité du comportement mécanique, les caractéristiques sont classées sous forme d'extremum et de moyenne (tab. 2) du bambou en

Mat.		D	C // [N/mm <sup>2</sup> ]	T // [N/mm <sup>2</sup> ]	Flexion statique			Cis. // [N/mm <sup>2</sup> ]
					E [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{rupt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Lim. él. [N/mm <sup>2</sup> ]	
<b>Bambou</b>	Min.	0,6	45,6	129,9	10,761	71,0	51,6	19,8
	Max.	1	85,4	289,8	20,063	159,2	106,6	22,8
	Moy.	0,7	63,7	193,8	14,117	116,9	78,9	20,8
<b>Bois</b>	Min.	0,4	29,3	73,1	8,100	29,3	-	2,9
	Max.	0,5	49,9	107,6	13,400	70,0	-	8,4
	Moy.	0,4	37,8	95,0	10,071	42,3	-	7,3

Avec D = densité ; C // = Compression parallèle aux fibres ; T // = Traction parallèle aux fibres ; E = Module d'élasticité ;  $\sigma_{rupt}$  = Contrainte de rupture ; Lim. él. = Limite élastique ; Cis. // = Cisaillement parallèle aux fibres.

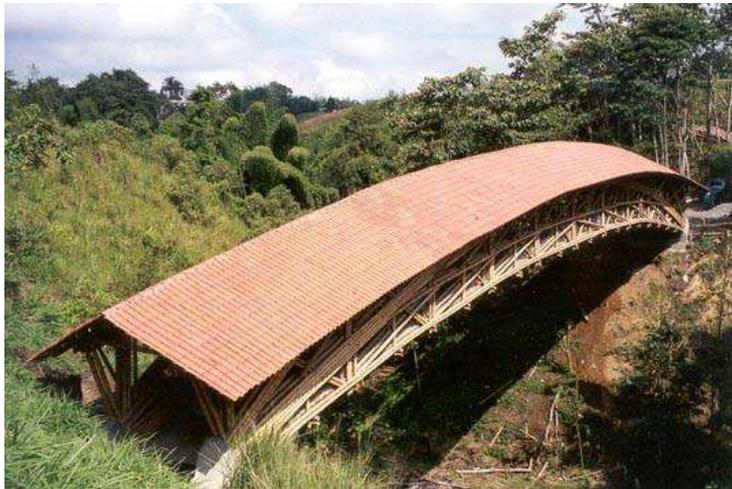
Tableau 2 : Comparaison des propriétés mécaniques entre les espèces de bambou et de bois

comparaison avec le bois. Ces valeurs ne prennent pas en considération le bambou vert, fraîchement coupé.

On retiendra que les performances mécaniques du bambou sont en général largement supérieures à celles du bois. Ceci confirme l'intérêt de ce matériau dans ce projet.

La densité du bambou explique aussi la dureté et durabilité particulièrement intéressante qui permet d'envisager des applications extérieures, pour palier les divers problèmes d'entretien connus pour le bois indigène.

Grâce aux nombreux avantages du bambou, mécaniques et autres, on compte en milliers les applications qui lui sont réservées. Son utilisation dans la construction permet des réalisations telles que maisons, supports de coffrage, couvertures de toiture, échafaudages, ponts, charpentes, armatures de béton, planchers et panneaux reconstitués, ...



*Figure 6 : Pont en canne de bambou*

### **2.3 Fabrication de planchers et panneaux**

L'idée de cette étude provient de la constatation qu'il n'existe que peu d'activités industrielles exploitant ce matériau. C'est loin d'être le cas pour la fabrication des planchers et panneaux en bambou qui connaissent actuellement un essor extraordinaire. C'est à partir de ce genre d'éléments que l'étude a été réalisée.

La fabrication des planchers et panneaux de bambou fait appel à un processus bien particulier. Contrairement au bois, les dimensions des lamelles ne dépassent pas 20-25 mm de large, 10 mm d'épaisseur et environ 2,5 m de long. Aussi, fut-il nécessaire d'adapter la technique à ces nouvelles données.

La première étape consiste à récolter la matière première. Les plantes forment d'innombrables « forêts de bambou ». Après 3 à 5 ans, les cannes arrivent à maturité et leur diamètre, longueur et épaisseur permettent de réaliser les lamelles souhaitées. Ensuite, les plants sont simplement coupés à leur base et élagués.



*Figure 7 : Cannes de bambou*

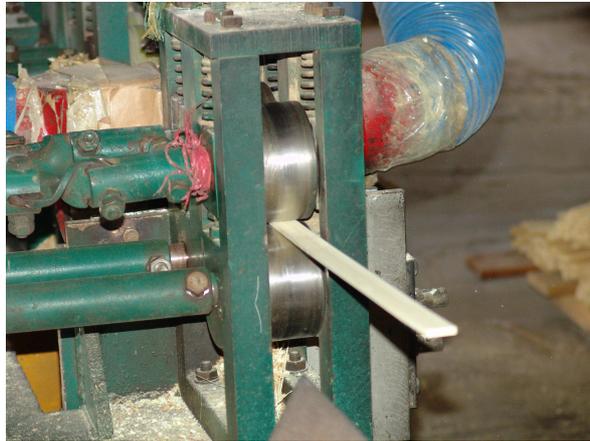


*Figure 8 : Coupe des cannes à l'étoile*

Une fois arrivées à la manufacture, les cannes sont coupées à longueur voulue et fendues, puis lamellées à l'aide d'un outil appelé *étoile*.

Les lamelles sont ensuite assemblées en fagots et stockées à l'abri de l'humidité afin de sécher endéans les trois jours après la coupe.

Chaque lamelle subit un calibrage quatre faces. La peau extérieure de la lamelle est alors retranchée ainsi que la matière peu fibreuse du côté intérieur de l'autre face. Ensuite, ce sont les côtés qui sont rabotés pour laisser apparaître une section finale rectangulaire. Ce calibrage permet de standardiser les dimensions des lamelles et faciliter la suite des opérations.



*Figure 9 : Rectification des lamelles*

Le bambou est riche en amidon et sucre dont les insectes comme les mites sont friands. Une légère humidité fournirait un milieu propice pour la propagation de champignons.

Le traitement chimique emploie les préservatifs hydrosolubles tels que la formaline 0.5%, le sulfate de cuivre de Phénol+ 1 (1 de gamma : 2), chlorophénate 0.5% de penta de sodium et borax 1.5%. Les produits chimiques sont dissous dans l'eau. Les lamelles sont plongées dans ces solutions pendant 10 minutes.



*Figure 10 : Traitement chimique des lamelles*

Un dernier traitement, accessoirement additionné au précédent est surtout utilisé pour la fabrication de planchers et panneaux. Il consiste à faire subir aux lattes un traitement thermique de vapeur d'eau à haute pression en autoclave. Aucun insecte ne résiste à ce traitement. Ce procédé permet aussi d'homogénéiser la couleur des lamelles.

Les lamelles sont ensuite séchées dans des fours à 70-80 °C pour être amenées à un taux d'humidité de 5 à 9 %, puis stockées dans des pièces tempérées. Ces étapes sont importantes pour garantir une bonne stabilité dimensionnelle.

La colle utilisée est l'urée formaldéhyde. La toxicité de ces colles est due aux émissions toxiques de formaldéhyde et de phényle, pouvant affecter le système nerveux. La norme européenne E1 limite les émissions à 3,5 mg/m<sup>3</sup>h. C'est de l'Aérolite UP4116, une poudre de résine à dissoudre dans l'eau, qui est utilisée pour les planchers. Le test selon EN 717-2 donne un résultat de 0,04 mg/m<sup>3</sup>h qui est largement inférieur à E1 et résiste aux tests mécaniques de haute adhérence de la norme américaine ANSI-3.



*Figure 11 : Pressage des lamelles*

Avant d'être pressées, les lamelles sont collées et agencées de manière à former entre elles le matériau voulu. Le tout est alors mis sous presse automatique à une pression verticale de 10 kg/cm<sup>2</sup> et 2,5 en pression latérale ou l'inverse en fonction du type d'élément. Le temps de serrage est compris entre 5 et 10 heures (fig. 11). Une fois les lamelles collées et pressées, elles sont poncées afin d'arriver aux tolérances dimensionnelles.

Dans le cas éventuel de la fabrication de poutres lamellé-collé, certaines étapes sont cependant facultatives.

Quatre types de produits lamellé-collé différents ont été utilisés au cours de l'étude. Les trois premiers se différencient par l'agencement des lamelles. Le quatrième met en jeu un procédé de fabrication quelque peu différent de celui exposé précédemment.

### Le type Horizontal



Figure 12 : Horizontal Caramel

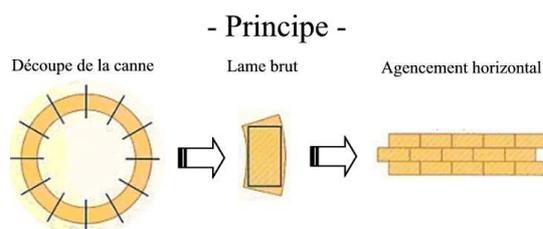


Figure 13 : Principe de l'Horizontal

### Le type Vertical



Figure 14 : Vertical Caramel

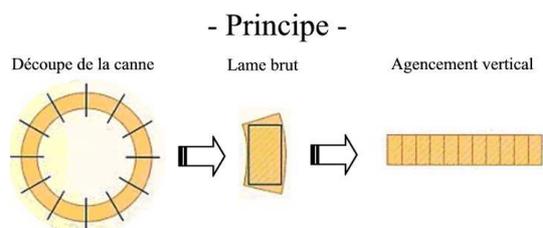


Figure 15 : Principe du Vertical

Le type Croisé, surtout utilisé lors de la fabrication de panneau afin de garantir la stabilité dimensionnelle dans les deux directions.



Figure 16 : Vertical Caramel

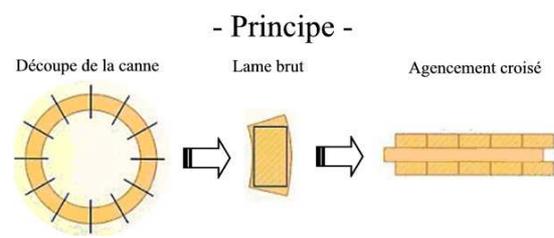


Figure 17 : Principe du Croisé

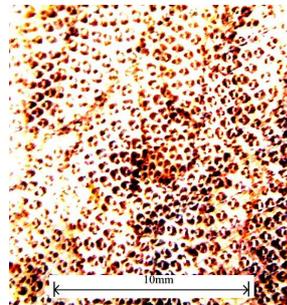
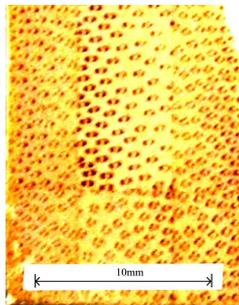
Enfin, le type BamWood est sans doute le matériau le plus intéressant et prometteur pour les applications envisagées par cette étude. Il se différencie principalement des autres par la manière même dont il est fabriqué. Les lamelles utilisées sont plus « brutes » et permettent de mieux valoriser la matière. Elles ne nécessitent pas de calibrage ni même l'arrangement

contraignant des autres types. Elles sont empilées plus ou moins aléatoirement dans un moule en étant préalablement enduites de colle puis pressées sous très haute pression. Après la prise de la colle, l'ensemble peut être démoulé et se présente alors sous forme de gros blocs. Les blocs sont ensuite coupés en planches (fig. 18).



*Figure 18 : Découpe en planches*

Mettons en évidence l'importance de la densité de fibres des lamelles. En effet, les fibres garantissent la reprise des contraintes appliquées sur le matériau. Dans ce projet de réalisation de poutres lamellé-collé, il est primordial d'accorder une attention particulière à ce paramètre. De lui dépendent les performances des poutres.



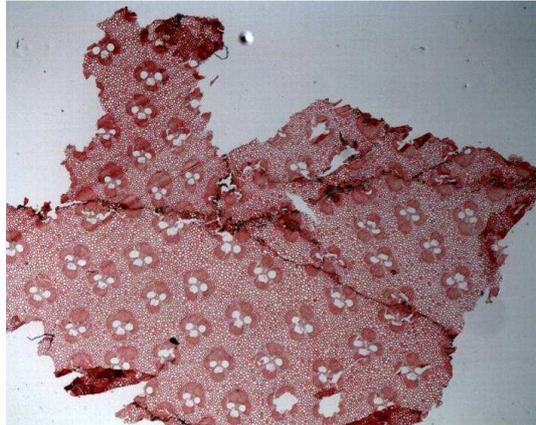
*Figure 19 : Type Horizontal - Fibre    Figure 20 : Type BamWood - Fibre*

La dispersion des fibres au sein de la section du type Horizontal se voit de façon plus marquée que dans le type BamWood qui d'une part a plus d'homogénéité et d'autre part a une densité sensiblement plus importante.

Nous avons des coupes histologiques (fig. 21) effectuées par le CRNFB<sup>3</sup> dans une planche de type BamWood. On y voit clairement les différents

<sup>3</sup> CRNFB : Centre de Recherche Forêt Nature et Bois à Gembloux

jointes entre les lamelles de section variable. On peut observer aussi l'homogénéité de la dispersion des faisceaux vasculaires.



*Figure 21 : Coupe transversale dans le type BamWood*

### **3. Etude pratique**

Pour réaliser un dimensionnement suivant les EUROCODES, on cherche à définir les Etats Limites Ultimes (ELU) : critère de résistance, et les Etats Limites de Services (ELS) : critère d'utilisation des éléments qui constituent la structure.

On remarque en général que c'est ce dernier critère qui est dimensionnant pour des poutres de grande portée. A titre d'exemple, dès que le rapport de la portée sur la hauteur de poutre en bois est supérieur à 18, ce sont les ELS qui sont pratiquement toujours dimensionnants.

Inutile donc de préciser que le critère des ELS est le plus contraignant dès que l'on parle de dimensionnement de poutres lamellé-collé qui doivent leur réputation à leur faculté de franchir des portées considérables.

Il est intéressant de se pencher un instant sur les différents facteurs qui se cachent derrière ce critère. A travers les ELS, on veut limiter la flèche. Or, la flèche est directement proportionnelle à la charge et inversement proportionnelle au module d'élasticité et à l'inertie.

La charge est une donnée indépendante à l'élément hormis l'influence du poids propre.

- Le poids propre peut être diminué soit, en jouant sur la forme de la section de l'élément de manière à supprimer la matière qui ne reprend pratiquement aucun effort, soit en jouant sur le matériau.
- L'inertie étant purement dépendante de la géométrie, c'est le choix de la forme de la section qui permettra de l'augmenter en privilégiant la hauteur évoluant au cube plutôt que la base tout en veillant à éviter les risques d'instabilité au déversement.
- Le module d'élasticité est quant à lui directement fonction du choix du matériau.

D'autres techniques comme la réalisation d'une contre-flèche permettent aussi de répondre plus facilement aux ELS.

Dans le cadre de l'étude de poutres lamellé-collé en bambou, nous étudions un nouveau matériau qui a son propre comportement aux états limites. Nous limitons cette analyse au niveau des ELU à la recherche de la contrainte de rupture et des ELS à la recherche du module d'élasticité pour un élément à une dimension prépondérante soumis à la flexion pure.

### 3.1 Principe de calcul

L'analyse des poutres se fait à partir d'un essai 4 points afin d'établir un moment fléchissant constant et d'annuler l'effort tranchant dans la partie de la poutre se situant entre les deux points de chargement. La déformation dans cette zone dépend ainsi strictement du couple constant. Grâce à ce système, les résultats ne sont nullement influencés par le tassement du bambou aux appuis et au droit du chargement.

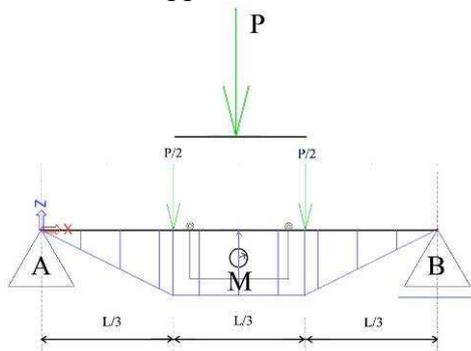


Figure 22 : Principe des essais

$$\sigma_{rupt} = \frac{P_{rupt} L}{BH^2}$$

et

$$E = \frac{PL \frac{L^2}{3}}{4BH^3 f_y}$$

avec :

- $\sigma_{rupt}$  : la contrainte maximale de rupture en flexion
- $E$  : le module d'élasticité de l'élément mis en flexion
- $P_{rupt}$  : la charge de rupture = charge appliquée par la presse + le poids propre de la poutre de répartition
- $L$  : la distance  $\overline{AB}$  soit la portée totale entre appuis
- $B$  : la base de l'élément
- $H$  : la hauteur de l'élément
- $P$  : la charge de chargement relative à la valeur de  $f_y$
- $f_y$  : la flèche relative à  $P$  lue sur le comparateur situé entre les deux points de chargement afin d'éviter l'influence des déformations aux appuis et points de chargement.

### 3.2 Réalisation et analyse

Trois différentes poutres ont pu être réalisées. Les deux premières poutres ont une longueur de 1,80 m. Elles ont été réalisées au CRNFB à partir de planches de type « Horizontal » pour l'une et de type « BamWood » pour l'autre.



Figure 23 : Poutre type Horizontal



Figure 24 : Poutre type BamWood

La troisième, de sept mètres de long a été réalisée au sein de ECOLAM, une société industrielle de poutres lamellé-collé en bois. Cette poutre a du malheureusement être fabriquée à partir de panneaux de type « Croisés ».



*Figure 25 : Poutre type Croisé*

***ECOLAM : poutre de 7 mètres en panneaux croisés***

Lors de l'étude, nous avons réalisé plusieurs essais préliminaires afin de nous conforter sur les hautes performances du bambou et sur son intérêt pour ce genre d'application. Nous avons décidé de réaliser une poutre lamellé-collé de dimension comparable à ce qui existe actuellement dans l'industrie du bois, en utilisant le même procédé de fabrication. Il serait ainsi possible d'étudier cette technique appliquée au bambou.

La bonne réalisation des aboutages est l'une des étapes fondamentales du processus de fabrication de poutre lamellé-collé en bois. C'est grâce à cette technique que nous ne sommes plus limités à la longueur de la planche pour obtenir la portée voulue.

Il est opportun d'avoir une résistance de l'aboutage similaire à celles des lamelles.



*Figure 26 : Aboutage de deux planches et patins*

Nous avons procédé à différents tests sur la qualité de l'aboutage des lamelles en panneau Croisé. La presse d'essai est réglée afin d'avoir 90 cm

de portée entre appuis soit un entraxe de 30 cm entre chacun des quatre points.

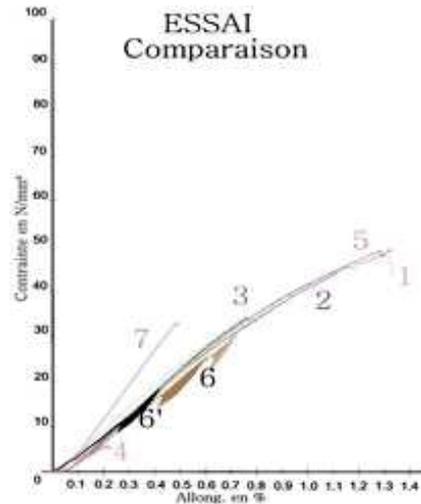


Figure 27 : Récapitulatif des essais d'aboutage

Les contraintes de rupture obtenues pour le type Croisé sont bien inférieures aux 100 N/mm<sup>2</sup> d'un type « Horizontal » obtenus lors d'essais préliminaires. Si l'on considère le pourcentage de la section des fibres dans le sens de la portée (+/- 53%), nous retrouvons un résultat comparable à ceux trouvés précédemment. Ce qui revient à dire que les fibres transversales à la portée ne reprennent aucun effort.

Les résultats chutent encore davantage quand les échantillons présentent un aboutage. Le troisième essai ne nous permet pas de conclure sur la résistance de l'aboutage. En effet, la rupture n'est pas directement apparue dans l'aboutage. Ce sont plutôt les lamelles transversales qui ont cédé à la traction perpendiculaire aux fibres. A priori, l'aboutage serait quand même plus résistant que cette sollicitation.

A cause de ces éléments croisés, nous n'avons pas l'occasion d'évaluer objectivement la technique de l'aboutage. Les ruptures parasites dans les fibres transversales nous cachent la vraie rupture qui nous aurait intéressés.

Voici la démonstration incontestable montrant l'intérêt d'avoir les fibres dans le sens de la portée. Le type « Croisé » perd environ 50 % de contrainte de rupture par rapport à un élément type « Horizontal ».

Nous avons utilisé la colle Purbond® HB110 utilisée par ECOLAM avec comme caractéristiques un temps ouvert d'une heure, un temps de pressage minimum de trois heures, un encollage minimal de 200 g/m<sup>2</sup>, une pression d'assemblage entre 0,6 et 0,8 N/mm<sup>2</sup>.

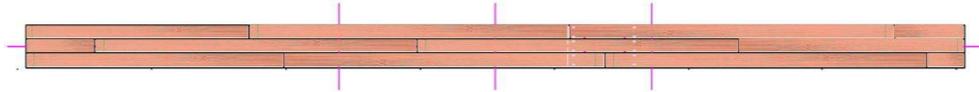


Figure 28 : Position des aboutages

Sur la figure (fig. 28), est indiquée la position des aboutages comme nous les retrouvons réellement sur la poutre. Les traits d'axes représentent le tiers, le centre et les deux tiers de la portée, les deux extrêmes étant les points de chargement.

La presse de l'ECAM, comme celle d'ECOLAM est à avance contrôlée.

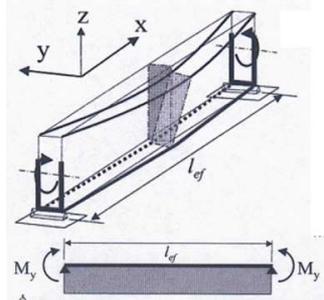


Figure 29 : Déversement



Figure 30 : Anti-déversement

Cette poutre est fortement élancée avec une base quatre fois plus petite que la hauteur, sur une portée de 7 m. Il est donc prudent de vérifier la poutre au déversement. Cet effet d'instabilité du second ordre est illustré par la figure 29.

Il faut ajuster le paramètre  $l_{ef}$  pour trouver l'entre distance nécessaire entre deux appuis latéraux, afin d'écarter tout risque de déversement. Cette distance doit être de trois mètres maximum. Nous avons donc installé des appuis latéraux intermédiaires pour éviter ce risque avec un système de glissière en bois à ancrer au sol (fig. 30).

Nous avons commencé par appliquer un premier chargement progressif pour déterminer le module d'élasticité.

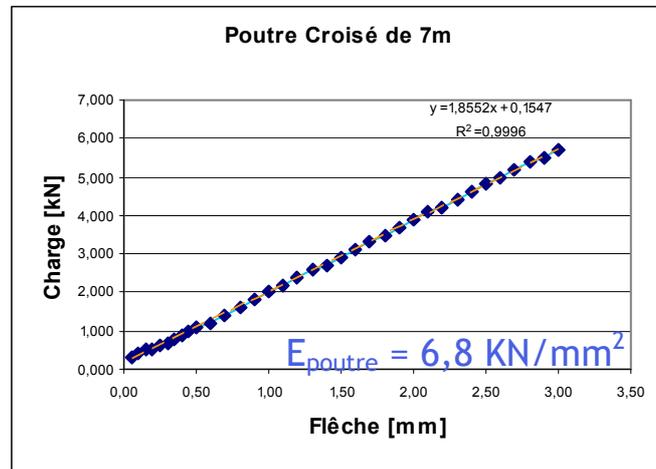


Figure 31 : Module d'élasticité poutre type Croisé

Nous trouvons un module d'élasticité de  $6,8 \text{ kN/mm}^2$ . Ce résultat n'est pas enthousiasmant. Nous sommes loin des  $14 \text{ kN/mm}^2$  trouvés lors d'essais préliminaires sur des éléments de type Horizontal.

Nous aurions pu déjà le voir à travers la figure 27. En observant les courbes des différents essais, l'une d'elles s'en démarque. En effet, pour le septième essai sur épicéa, nous avons une pente plus raide que pour les autres essais. Or, la pente est le reflet du module d'élasticité. Etant plus faible pour les échantillons de type Croisé, nous devons nous attendre à trouver un module d'élasticité plus faible que pour ce bois. Ce qui est bien le cas. Il n'y a pas lieu d'approfondir davantage l'étude sur cet essai.

Grâce à un appareil de mesure appelé *démec*<sup>4</sup>, nous avons pu mesurer les allongements jusqu'au micron qui se développent sous l'effet de contrainte conformément à la loi de Hooke. A défaut d'avoir un module d'élasticité intéressant, nous avons pris ces mesures pour étudier la répartition des contraintes dans la section et surtout pour repérer d'éventuels glissements au niveau des joints de colle entre les lamelles et observer le comportement d'un aboutage.

<sup>4</sup> Démec : Appareil de mesure d'allongement ( $\mu\text{m}$ ) entre deux points.

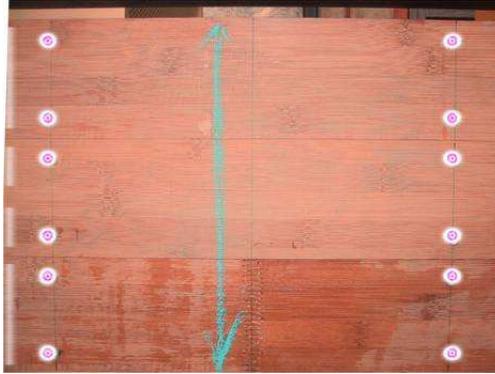


Figure 32 : Position des dèmescs

Les mesures ont été prises dans le tiers central. Suivant la résistance des matériaux, nous avons un moment constant dans toute cette zone. Nous avons positionné les pastilles de références de manière à pouvoir aussi observer le comportement d'un aboutage fort sollicité où risque de se produire la rupture.

Au cours de l'essai, nous avons pris, pour chacune des six zones, différentes valeurs de longueur entre les deux pastilles pour différents états de contrainte. Nous avons ensuite calculé les allongements relatifs  $\varepsilon$  et comme nous savons que  $\sigma = \varepsilon E$  avec  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  et en utilisant le module d'élasticité moyen  $E$  trouvé précédemment pour la poutre, nous avons calculé les différentes valeurs de contrainte pour chaque état.

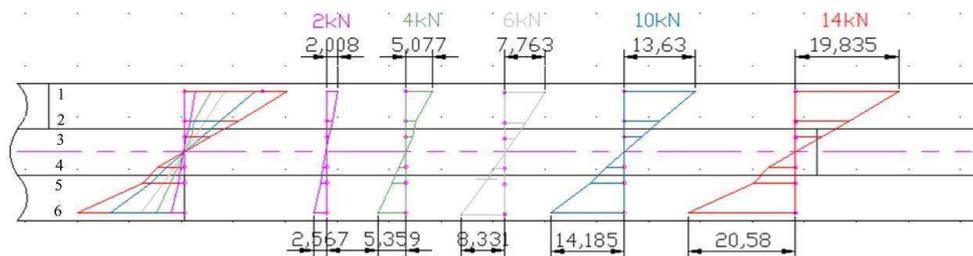


Figure 33 : Diagramme de l'évolution des contraintes [N/mm<sup>2</sup>] dans la section de la poutre Croisé

La figure 33 est très parlante. Au fur et à mesure que la contrainte augmente, la linéarité se perd dans la jonction entre la lamelle centrale et inférieure. Rappelons que dans la dernière lamelle se trouve un aboutage.

Sous l'état de contrainte qui correspond à un chargement de 14 kN, si au lieu d'avoir relié la contrainte des positions 4 et 5, nous prolongons le segment  $\overline{56}$  sur toute la section de la lamelle inférieure et de même pour le segment  $\overline{34}$ , nous aurions pu plus distinctement observer la discontinuité entre les deux segments.

Cette variation de contrainte nous montre l'existence d'un relâchement de la contrainte dans les fibres supérieures de la dernière lamelle et l'apparition croissante de cisaillement dans le joint entre les deux lamelles.

Nous remarquons aussi que les valeurs maximales diffèrent. Le cas le plus marquant est à nouveau l'état de contrainte le plus élevé. On trouve en compression 19,8 N/mm<sup>2</sup> et en traction 20,6 N/mm<sup>2</sup>, soit une différence approximative de 0,8 N/mm<sup>2</sup>.

On peut soupçonner une faiblesse au niveau de l'aboutage dans les fibres supérieures de cette lamelle. Cela expliquerait le fait que la continuité de la transmission de l'effort dans cette zone soit perturbée. La contrainte devrait alors se redistribuer :

- d'une part, dans les fibres inférieures de la dernière lamelle ce qui expliquerait la différence des 0,8 N/mm<sup>2</sup>,
- et d'autre part dans les fibres inférieures de la lamelle voisine. Cela pourrait expliquer l'apparition de cisaillement entre les deux lamelles avec une valeur de contrainte plus élevée au niveau de la fibre inférieure de la lamelle centrale par rapport à la fibre supérieure de la lamelle inférieure.

Nous avons appliqué un chargement de 14 kN ; nous voyons déjà très clairement apparaître des effets non désirés dans la section. Si le phénomène se confirme, nous pouvons être assurés que c'est à cet endroit précis que la rupture se produira.

Après avoir vérifié que tous les essais ont été effectués correctement et que les mesures donnent des résultats cohérents, nous avons procédé à l'essai irréversible et destructif de la poutre afin d'apprécier la contrainte maximale que cette poutre aboutée pourrait reprendre.

Nous avons pris 6 mm/min de vitesse de mise en charge.

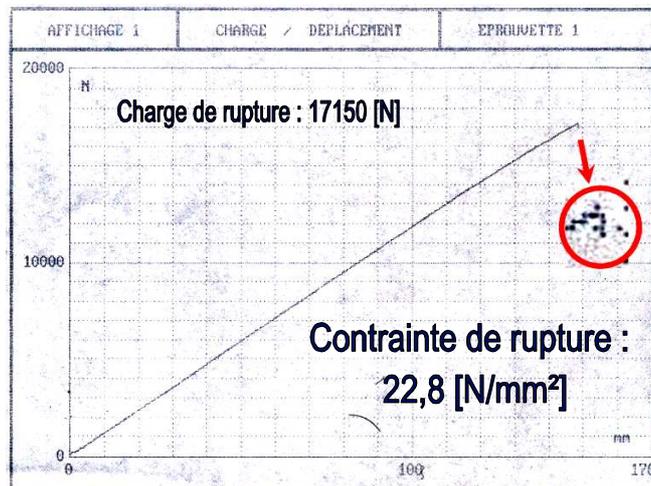


Figure 34 : Contrainte de rupture de la poutre type Croisé

La rupture est survenue à un moment totalement inattendu. Nous avions prévu une charge de rupture de 26kN après environ une heure et elle n'a que très légèrement dépassé les 17 kN après seulement 25 minutes.

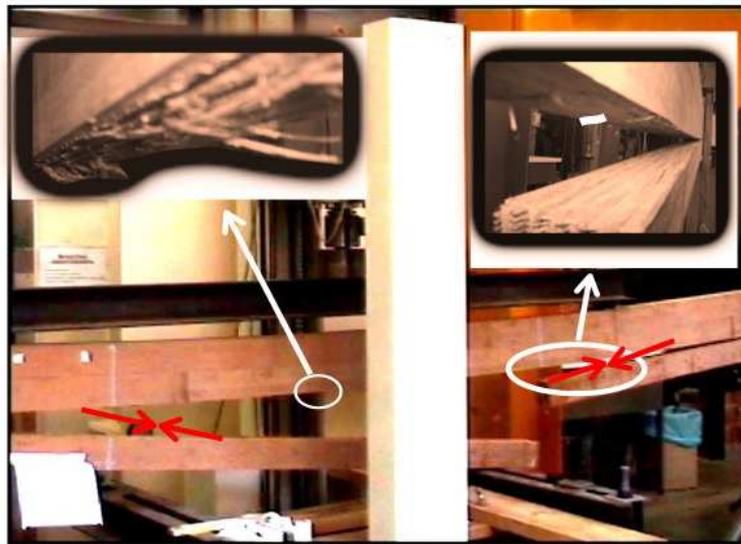
En analysant la figure 34, rien ne laissait présager l'arrivée de la rupture. Dans les essais précédents, la droite finissait toujours par s'incurver en passant par un point d'inflexion annonçant que nous quittions le domaine élastique du matériau. Ici, le segment est d'une linéarité incontestable et s'interrompt d'une manière brutale.

Grâce aux quatre séquences filmées et enregistrées, nous pouvons facilement rendre compte du scénario. Notre intuition s'était confirmée : le maillon faible de la poutre était bien l'aboutage, et plus particulièrement celui qui avait été précédemment étudié lors des mesures au *démec*.

L'analyse de ces mesures au niveau de la discontinuité de la répartition des contraintes trouve ici sa confirmation : la rupture en cisaillement s'était bel et bien effectuée dans le joint entre la lamelle centrale et inférieure et simultanément dans l'aboutage.

La différence entre une contrainte de traction de plus en plus grande au-dessus du joint de colle et une faible contrainte de traction en-dessous est devenue telle que les fibres aux alentours du joint se sont rompues. Il existerait donc une faiblesse dans l'aboutage.

Les fibres, qui sont stoppées par cette perturbation, seraient donc obligées de transférer l'effort par cisaillement, de proche en proche, de manière à éviter l'obstacle. Pendant que certaines fibres se déchargent progressivement, d'autres en dehors de cette zone faible se voient au contraire surchargées. Elles doivent prendre en relais la contrainte de leurs voisines jusqu'au moment où elles cèdent.

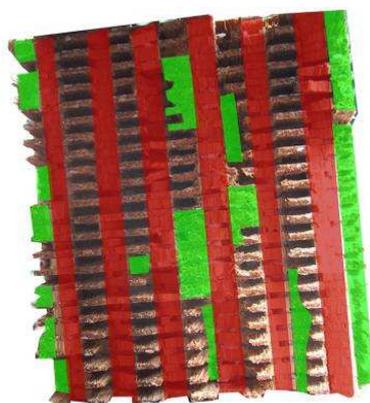


*Figure 35 : Cisaillement dans la poutre Croisé*

En regardant de plus près les surfaces cisillées mises en évidence sur la figure 35, nous pouvons remarquer que la rupture a bien eu lieu dans le bambou et non dans la colle. Les flèches indiquent l'orientation des fibres après rupture. On distingue un changement d'orientation entre le côté droit et gauche de l'aboutage.

Grâce à l'observation de l'orientation des fibres à la rupture, la preuve est donnée que la traction était plus importante dans les fibres inférieures de la lamelle centrale que dans les fibres supérieures de la lamelle inférieure. Si c'était l'inverse, l'orientation serait également inversée.

Pour l'étude de la rupture dans l'aboutage dans la figure 36, nous avons mis en évidence les parties de la section du bambou où s'est produite la rupture : en « clair », les lamelles dans le sens de la longueur et en « foncé » celles qui sont verticales.



*Figure 36 : Rupture de l'aboutage*

Il apparaît que l'ensemble des lamelles verticales de la section (fig. 36) se sont rompues dans le matériau. Elles étaient soumises à traction perpendiculaire aux fibres, ce qui est loin d'être idéal pour ce genre de matériau. En outre, la zone de collage des deux éléments est plus résistante.

Ce n'est pas aussi évident pour les zones « claires » dont la surface est plus petite que les zones « foncées ». Davantage encore, c'est le pourcentage de la section des lamelles longitudinales ayant participé à la reprise de la contrainte sur leur section totale qui est décevant. Ce n'est pratiquement que 2/7 de la section qui est « utile » dans la reprise des contraintes.

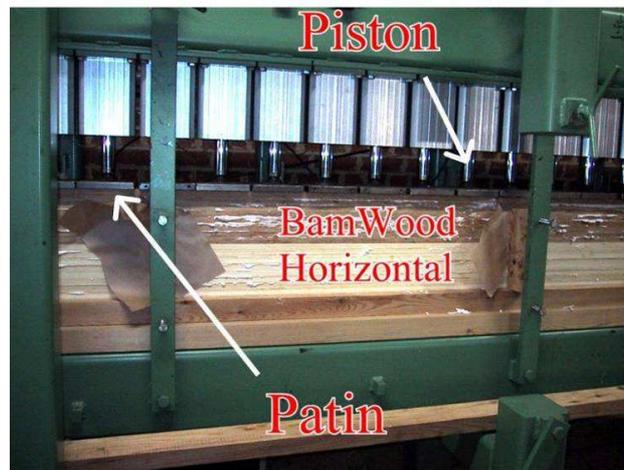
Le collage des lamelles entre-elles dans le plan de cisaillement semblait à plusieurs endroits insuffisant.

Nous sommes cependant loin d'un optimum d'exploitation. Nous devons nous incliner devant les performances médiocres de cette poutre.

#### ***CRNFB : Poutres de 1.8 m***

Cette étude complémentaire allait nous donner l'occasion de comparer, dans des conditions semblables, les types « Horizontal » et « BamWood » de section pleinement utile.

Lors de la fabrication et l'encollage des lamelles, nous avons constaté que la colle faisait prise plus rapidement que le temps indiqué sur la fiche technique à cause de l'humidité et la chaleur ambiante de la pièce. Il en découle un moins bon collage pour la poutre de type Horizontal.



*Figure 37 : Pressage des poutres Horizontal et BamWood*

En pesant les deux poutres, nous avons calculé leur masse volumique : poutre Horizontal = 9,4kg soit une masse volumique de  $706 \text{ kg/m}^3$  ; poutre BamWood = 14,5 kg soit une masse volumique de  $1088 \text{ kg/m}^3$ .

La masse volumique étant fonction de la densité en fibres des éléments, nous pouvions imaginer que le type BamWood contient environ 30% de fibres en plus que le type Horizontal.

Dans la figure 38, nous pouvons voir le principe de l'essai qui nous a permis d'étudier le module d'élasticité.



*Figure 38 : Principe d'essai pour l'étude du module d'élasticité*

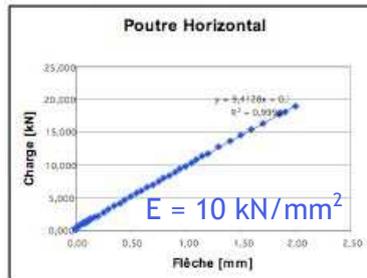


Figure 39 : Module d'élasticité de la poutre type Horizontal

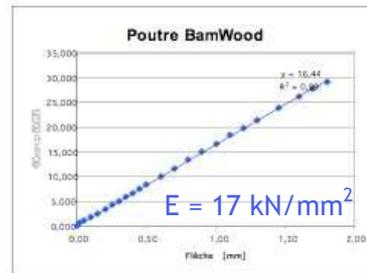


Figure 40 : Module d'élasticité de la poutre type BamWood

Pour l'un et l'autre, type Horizontal et type BamWood, les résultats sont inférieurs aux valeurs obtenues lors d'essais préliminaires établis sur des planches seules. Elles passent respectivement de 13,41 à 10,27 et de 22,77 à 17,26 kN/mm<sup>2</sup>.

La poutre de type Horizontal confirme qu'elle n'a pas un comportement élastique sensiblement différent du bois, voir inférieur. Par contre, le type BamWood présente un meilleur comportement élastique.

Dans les deux cas, cependant, la zone élastique est bien plus grande que celle du bois. Les contraintes de rupture du bambou, nettement supérieures au bois classique, expliquent sa capacité à se plier et obtenir une flèche remarquable sans se rompre.

Nous avons étudié de plus près l'évolution des contraintes sur la hauteur de la poutre en collant huit pastilles sur les deux poutres. Grâce au *démec* nous avons pu mesurer quatre niveaux d'allongement répartis symétriquement sur la section (fig. 41).



Figure 41 : Position des pastilles démecs

Lors de l'essai, différentes valeurs de longueur ont été prises entre les deux pastilles pour chacune des quatre zones à différents paliers de charges. Nous avons ensuite calculé les allongements relatifs  $\varepsilon$ . Etant donné que  $\sigma = \varepsilon E$  avec  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  et en utilisant le module d'élasticité moyen  $E_{\text{moyen}}$  trouvé précédemment pour la poutre, nous avons calculé les différentes valeurs de contraintes pour chaque état et ensuite représenté sous forme de diagramme les différents allongements  $\Delta L$  qui ne sont pas autres que l'image de l'évolution des contraintes dans la section.

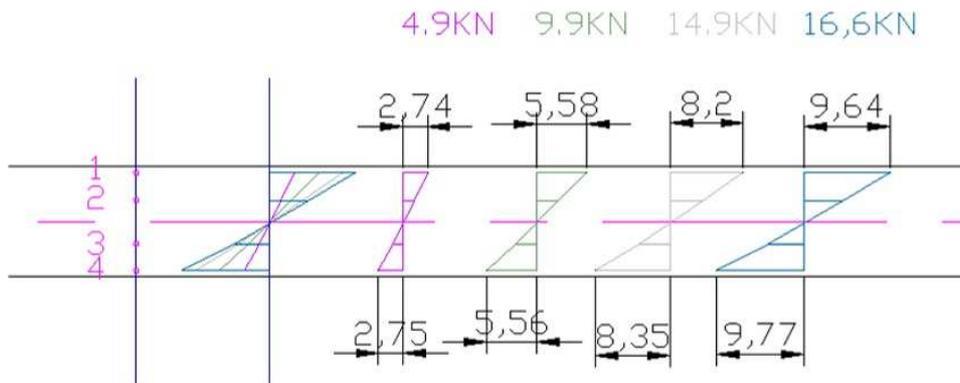


Figure 42 : Diagramme de l'évolution des allongements [ $\times 10^{-1}$  mm] dans la section de l'Horizontal

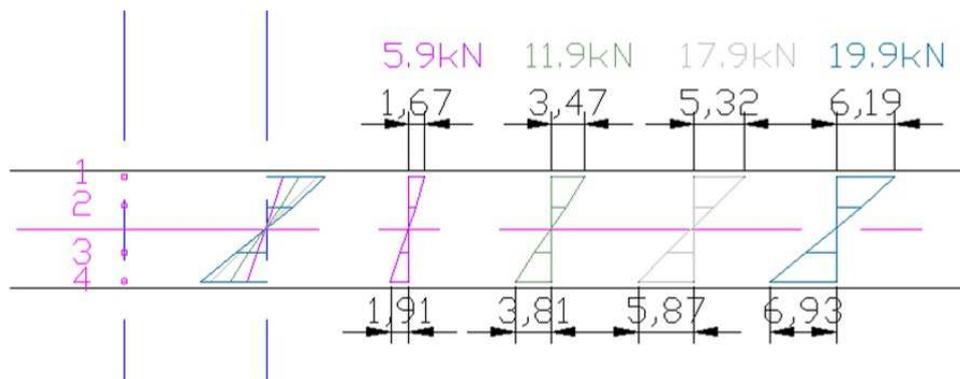


Figure 43 : Diagramme de l'évolution des allongements [ $\times 10^{-1}$  mm] dans la section de BamWood

Cette étude des allongements relatifs réalisée à l'aide du *démec*, a confirmé le caractère élastique et homogène de la poutre conformément à la loi de

Bernoulli-Navier. Malgré les joints de colle entre les planches, celle-ci a bien réagi linéairement aux diverses sollicitations.

Nous avons appliqué une contrainte maximale de  $39,4 \text{ N/mm}^2$  pour le niveau 4 sous une charge de  $19,9 \text{ kN}$ . Cette valeur est bien inférieure aux  $133 \text{ N/mm}^2$  obtenus pour la contrainte de rupture de la poutre. Il aurait été plus intéressant de prendre des valeurs d'allongements pour de plus grandes contraintes au risque même de rompre la poutre. Les contraintes techniques nous en ont empêchés: la presse automatique utilisée n'offre pas la possibilité de marquer un arrêt au cours du chargement. Pour mettre sous charge permanente nous devons interrompre le processus de chargement et attendre qu'il se stabilise. Mais au-dessus d'une certaine charge, la réaction de la poutre sur la presse devenait trop importante et la charge redescendait toujours vers un équilibre entre la résistance de la presse et la réaction de la poutre.

C'est pourquoi les résultats obtenus ne nous donnent qu'un aperçu limité du comportement de la poutre. Avec une contrainte plus élevée, nous aurions sans doute observé des glissements entre les planches.

Les dimensions de la poutre présentent un rapport de  $L/H$  de  $14,75$ . Nous nous trouvons bien dans la situation où les conditions des ELS risquent d'être prédominantes par rapport aux ELU et de présenter un type de rupture dit de flexion à l'inverse d'un type dit de cisaillement.

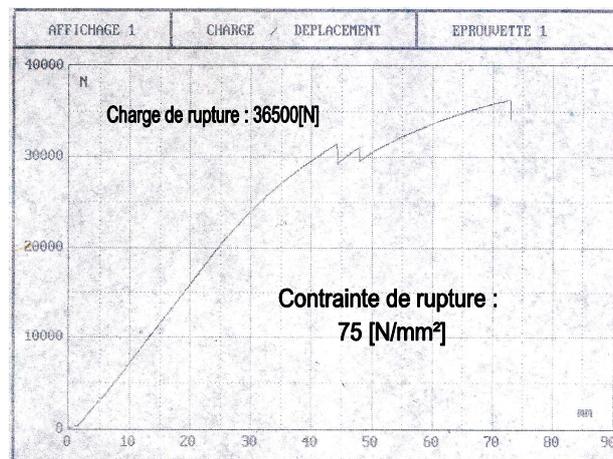


Figure 44 : Contrainte de rupture dans la poutre type Horizontal

Les résultats d'essais préliminaires sur des planches type Horizontal nous ont donné une contrainte de rupture de l'ordre  $100 \text{ N/mm}^2$ . Agencées en poutre, nous obtenons une contrainte de rupture de  $75 \text{ N/mm}^2$ .

Etudions de plus près cette expérience sur base du diagramme (fig. 44) et de la réaction de la poutre sollicitée : la zone élastique reste bien visible et semble s'étendre jusqu'à une charge de 22 kN. A ce niveau apparaît un point d'inflexion. En considérant cette charge, nous estimons la limite élastique à  $45 \text{ N/mm}^2$ .



Figure 45 : Essai de rupture sur la poutre type Horizontal

A la charge de 32 kN, nous avons observé une première rupture dans les lamelles de la planche inférieure. La figure 46 confirme que la rupture ne s'est pas en milieu de portée mais bien dans les nœuds de plus faible résistance, situés dans la zone sollicitée (entre les deux points de chargement).



Figure 46 : Essai de rupture H.1



Figure 47 : Essai de rupture H.2

Une deuxième fois, la charge remonte à proximité de cette même valeur, ce qui provoque la rupture de la totalité de la section de la planche inférieure. Étonnamment, la charge remonte pour une troisième et dernière fois

dépassant même la charge de première et deuxième rupture. Certaines fissures ont eu tendance à s'ouvrir. Puis, c'est un joint de colle entre deux planches (fig. 47) qui a commencé à s'élargir considérablement.

Pour la première fois, nous pouvons nettement observer (fig. 48) une déformation locale au droit de l'application des charges de l'ordre de 2mm. Les traits noirs mettent en évidence le nouveau chemin des fibres qui épousent la déformation sans se rompre.

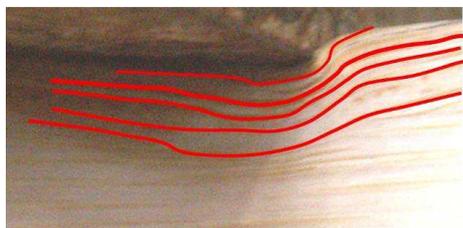


Figure 48 : Essai de rupture H.3



Figure 49 : Essai de rupture H.4

A un plafond de 36,5 kN, c'est la ruine de la poutre provoquée par la rupture du joint de colle (fig. 49).

Après le déchargement, nous avons observé que la moitié d'un joint avait lâché en cisaillement entre deux planches. De plus près, nous pouvons observer que la rupture s'est produite de manière marginale dans le bambou et davantage dans la colle.

La performance de cette poutre a sans nul doute été victime de la mauvaise qualité de la planche (lamelle) inférieure. Cette planche mise hors service, il fut possible de charger beaucoup plus malgré une plus petite section utile. Recalculant la contrainte de rupture - en soustrayant la section de cette dernière planche de la section totale -, nous obtenons une valeur de 97 N/mm<sup>2</sup> ce qui se rapproche nettement des 100 N/mm<sup>2</sup> précédents.

Ceci confirme la thèse d'une planche de plus faible qualité. Nous touchons ici la limite de ce matériau de type Horizontal. En effet, comment pourrions-nous certifier la qualité des planches ? Elles sont déterminantes pour la résistance de la poutre finie. De plus, ce type bien structuré ne permet pas une bonne dispersion des nœuds comme pour le type BamWood qui possède des lamelles de section plus fine. L'emplacement des nœuds, maillons

faibles du bambou, porte donc statistiquement plus de conséquences sur la résistance de la poutre.

Ces limites ne doivent néanmoins pas nous faire oublier que la contrainte de rupture de cet élément reste double ou triple par rapport au bois, ce qui est déjà remarquable en soi et prometteur.

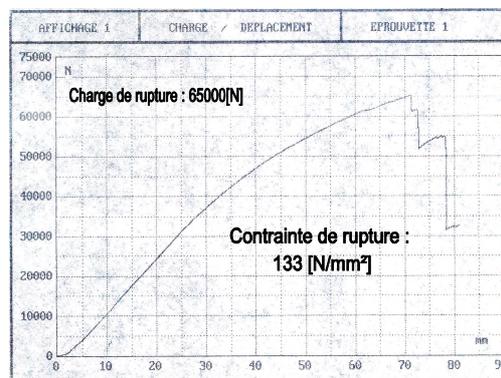


Figure 50 : Contrainte de rupture dans la poutre type BamWood

Les essais préliminaires sur des planches de type BamWood nous ont donné comme contrainte de rupture de 150 N/mm<sup>2</sup>. La poutre type BamWood nous donne une valeur plus faible de 133 N/mm<sup>2</sup>.



Figure 51

Essai de rupture sur la poutre type Horizontal

Le point d'inflexion indicateur de la limite élastique reste autour des 32 kN. Ce qui représente une limite élastique de l'ordre de 66 N/mm<sup>2</sup>. Le problème du type Horizontal fort sensible à la qualité des lamelles est moins

conséquent pour le type BamWood pour les raisons évoquées précédemment. La courbe du graphique (fig. 50) suit son rythme jusqu'à la rupture comme un matériau de section homogène, sans l'apparition de discontinuités.

Nous avons repéré, lors de la montée en charge dans la planche inférieure, une rupture s'agrandissant dans un des nœuds qui, à terme, finit par céder. Contrairement au type Horizontal, cette rupture était à peine perceptible dans le graphique (fig. 50) vers 62 kN : les sections des lamelles étant moins importantes, elles ont pour conséquence une perte plus négligeable. Le reste de la section peut dès lors assurer facilement la redistribution de la contrainte sans brutalité. Le phénomène va cependant en s'accroissant, jusqu'à une nette rupture à 65kN qui ne sera plus dépassée.



*Figure 52 : Essai de rupture B.1*

Sur la figure 52, nous pouvons observer que la rupture provient non plus d'un cisaillement, mais de la traction dans les fibres qui ont été fragilisées au niveau des nœuds. Hormis les fibres inférieures, le reste de la section semble intact : aucun signe de faiblesse du à la compression dans les fibres supérieures de la poutre qui se manifeste habituellement par un certain flambement des fibres.

Les résultats du type BamWood confirment l'intérêt de ce produit et son application pour le secteur de la construction. Ils sont supérieurs à ceux du type Horizontal et de trois à quatre fois supérieurs à ceux du bois, ce qui reste prometteur pour l'avenir du bambou.

#### **4. Conclusions et perspectives**

L'étude, la réalisation et l'analyse de poutres lamellé-collé en bambou nous ont permis d'évaluer l'opportunité de ce genre de produit pour le secteur de la construction.

Parti d'un support modeste, ce projet s'est révélé plus ambitieux grâce à la collaboration de professionnels divers et l'obtention de fournitures adéquates qui ont enrichi le champ d'investigation.

Les propriétés mécaniques de ce matériau offraient d'emblée d'heureuses perspectives. Les diverses études développées dans ce mémoire ont confirmé le potentiel et l'étendue des applications techniques envisageables.

Les contraintes de temps et de moyens ont limité notre étude à la recherche du module d'élasticité et de la contrainte de rupture sur trois poutres lamellé-collé en flexion. Si les performances de la poutre type Croisé de 7m étaient moins concluantes, celles du type BamWood se sont révélées très prometteuses.

L'échantillon trop réduit ne permet pas des conclusions hâtives et généralisables. D'autres études devraient voir le jour.

Il conviendrait d'étudier l'ensemble des caractéristiques mécaniques du bambou lamellé-collé et principalement la résistance au cisaillement parallèle aux fibres. De quelle nature est la rupture ? Où se produit-elle précisément : dans le joint de colle ou dans le matériau lui-même ? Cette valeur de rupture par cisaillement en complément à la rupture par flexion étudiée dans ce travail, nous donnerait des éléments d'explication sur le mode de rupture potentielle dans le cas d'une poutre sollicitée en flexion.

Il conviendrait également d'étudier l'aboutage et de manière générale l'assemblage longitudinal entre deux lamelles. La faiblesse des éléments aboutés de la poutre type Croisé nous a vite limités. Il serait utile de recommencer des essais d'assemblage sur des lamelles moins épaisses et d'un autre type (ex : Horizontal ou BamWood). Si les résultats demeurent décevants, il faudrait songer à développer une nouvelle technique d'assemblage plus appropriée.

Rappelons ici que parmi la diversité de bambous dans le monde, ayant chacune leur propres comportements mécaniques, notre étude s'est restreinte au *Phyllostachys Pubescens*. Il serait donc intéressant d'étudier d'autres espèces qui pourraient être plus appropriées encore aux perspectives qui nous occupent notamment en termes de module d'élasticité. En effet, celui du *Phyllostachys Pubescens* ne s'écarte pas grandement de celui du bois sauf par la technique type BamWood. D'autres espèces de bambou offrent naturellement un module d'élasticité bien supérieur. C'est souvent le paramètre dimensionnant de ce type de poutres.

Il serait aussi intéressant de se pencher sur le facteur d'échelle que cette étude n'a pu aborder. Ce facteur pourrait peut-être expliquer les différences entre les résultats des planches par rapport à ceux des poutres. En effet, la répartition des contraintes dans une planche n'est pas identique si celle-ci est isolée ou collée à d'autres. Dans le premier cas, elle est soumise à compression et traction, dans le deuxième, les planches inférieures et supérieures de la poutre sont soumises respectivement à traction ou à compression. Ce dernier cas plus défavorable expliquerait les résultats plus faibles. Ceci demanderait donc de nouvelles investigations.

Une étude statistique serait également bienvenue. Elle permettrait de mettre en évidence la dispersion des résultats ainsi que les valeurs moyennes et caractéristiques. Ces données sont indispensables pour le dimensionnement des poutres.

Enfin, nous ne pouvons qu'encourager des recherches pour l'étude du fluage, de la résistance au feu (RF), de différentes géométries de poutres (en « I », à doubles pentes, cintrées, à contre-flèche...), de la durabilité face aux intempéries et dégradations diverses (insectes, champignons,...). Tôt ou tard, ces études devront conduire à l'établissement de normes communes.

Car, nous l'avons découvert tout au long de cette étude, la carrière du bambou s'avère prometteuse, notamment grâce à ses propriétés mécaniques. Il pourrait offrir des solutions innovantes pour bien d'autres applications structurelles, notamment grâce à sa résistance impressionnante à la traction et compression.

Des facteurs économiques entreront bien évidemment en ligne de compte. L'expansion fulgurante des sylvicultures et les qualités écologiques lui présagent un bel avenir.

Ses multiples atouts ouvrent la porte à de nombreuses perspectives pour des secteurs d'activités industriels les plus divers. Il s'avère que les retombées économiques de l'exploitation actuelle du bambou profitent déjà à toutes les classes sociales des pays en voie de développement. Puissent ces études sur le « bois des pauvres » offrir l'occasion à ces pays de connaître un nouvel essor économique.

## **5. Perspectives**

Suite à ce travail de fin d'études, avec le soutien d'InduTec et de l'ECAM, Mr Hargot a fait une demande de subside à l'IRSIB dans le cadre du plan de financement « Spin-off in Brussels ». En attendant, la décision du groupe d'experts, il a travaillé aux pays de Galles sur un chantier maritime de la société Besix International. Le projet accepté, Mr Hargot a démarré en janvier 2008 à Bruxelles la mise au point du prototype et l'étude visant à l'établissement de la société BEBAMBOO spécialisée dans l'ingénierie et la fabrication d'éléments de structure en bambou pour le secteur de la construction. Ce projet s'étale sur deux ans. Le démarrage est prévu pour janvier 2010. Pour plus d'informations, vous pouvez consulter le site : [www.bebamboo.be](http://www.bebamboo.be) . Déjà, nous lui souhaitons un beau succès.

## **6. Remerciements**

L'auteur tient ici à remercier Mrs A. Mahy et M. Gilmard, enseignants à l'ECAM, respectivement promoteur et tuteur du travail de fin d'études ainsi que Mr Van Eeckhout responsable du laboratoire de construction. Enfin, les sociétés ECOLAM sa, Pi-Import sa et le centre de recherche CRNFB pour leur participation active et sans qui cette étude ne serait pas.

## **7. Références bibliographies**

### **7.1 Ouvrages**

- [1] ACRE V., OSCAR A., 1993. *Fundamentals of the Design of Bamboo Structures*. Doctoral Thesis TU Eindhoven.

- [2] BRINK E., RUSH P., 1966. *Bamboo reinforced concrete construction*. California February.
- [3] DE FLANDER K., 2005. *The role of Bamboo in Global Modernity: from Traditional to Innovative Construction Material*. Wageningen University
- [4] GOULET J., BOUTIN J.-P., 2004. *Résistance des matériaux*. Dunod.
- [5] JANSSEN, J.J.A. 1981. *Bamboo in building structures*. PhD Thesis. Eindhoven University of Technology.
- [6] JANSSEN, J.J.A. 1988. *Building with bamboo – A handbook*. I.T. Publications, London.
- [7] JANSSEN, J. J. A. 2000. *Designing and building with Bamboo*. INBAR Technical Report .
- [8] MAHY A. 2003. Cours. *Matériau bois*. 1<sup>ère</sup> licence. ECAM.
- [9] TARMEZE W., 2005. *Numerical analysis of laminated strip lumber (LBSL)*. The University of Birmingham.
- [10] THAMINCHA S., 1996. *Design and Manufacture of Bamboo and Rattan Furniture*. UNIDO
- [11] THU, LAME C., GARNIER D. *Résistance du Bambou*. Revue : Du bambou au zen.
- [12] UNFCMP, 1996. *Tome I. Structure et bois aux états limites*. Eyrolle
- [13] WANG Z., 2003. *Laminated Panel Manufacture of Two Kinds of Bamboo for Architecture Material and Property Comparison*. Wenjing Guo. Inbar.

## 7.2 Associations

- AEB Association Européenne du Bambou, [aebfrance.com](http://aebfrance.com)
- INBAR International Network for Bamboo and Rattan, [inbar.int](http://inbar.int)
- ABS American Bamboo Society, [americanbamboo.org](http://americanbamboo.org)

## 7.3 Sites internet

- [www.bambou-design.com](http://www.bambou-design.com)
- [www.goetgheluck.com](http://www.goetgheluck.com)
- [www.nature.jardin.free.fr](http://www.nature.jardin.free.fr)
- [www.bambooweb.online.fr](http://www.bambooweb.online.fr)
- [www.bamboueraie.com](http://www.bamboueraie.com)