

Habitations végétales : ça tient le bambou ?

Elève de l'ENS Paris-Saclay, Louis Collin, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

Les récentes marches pour le climat, aussi bien en France qu'à l'international, rappellent l'importance croissante qu'attachent les citoyens au développement durable. Cette démarche de prise en compte du coût environnemental prend de l'ampleur et pousse les industriels de tous secteurs à rechercher et à privilégier des solutions moins polluantes pour satisfaire les critères d'exigences de leurs clients.

Au sein de la filière du génie civil français, plusieurs solutions sont proposées à différentes échelles, que ce soit du recyclage des éléments de construction après leur démolition à une réflexion sur l'obtention d'un confort thermique favorisé par le choix des matériaux. Ce dernier prenait en effet majoritairement en compte dans les décennies passées les caractéristiques mécaniques et fonctionnelles des matériaux, sans veiller au potentiel coût environnemental de leur production. Une certaine prise de conscience de ce problème a permis de mettre en place de nouveaux thèmes de recherche, notamment sur les matériaux verts performants. Une idée récurrente, pouvant paraître radicale, serait de privilégier le bambou, parfois appelé « acier vert », pour remplacer les structures en acier ou en béton dans certains cas.

Ce matériau, déjà utilisé depuis les années 1800 en Asie dans des constructions temporaires ou définitives, présente des caractéristiques mécaniques très intéressantes, couplées avec une facilité et une rapidité de culture notamment dans les pays européens. Ainsi, est-il envisageable de voir fleurir des « habitations végétales » en bambou répondant aux normes européennes aussi bien en tenue mécanique qu'en terme de confort, ou bien est-ce une utopie trop coûteuse pour pouvoir voir le jour ?



Figure 1: *Phyllostachys viridiglaucescens* au Conservatoire botanique national de Brest, source [1]

Cette ressource a pour but de répondre à ces différents points en se fondant exclusivement sur des publications scientifiques de plusieurs disciplines, répertoriées dans la bibliographie.

1 – Le bambou, une plante verte

Ce qui distingue le bambou des autres matériaux de construction est son caractère vivant. Afin d'aborder au mieux ses caractéristiques mécaniques, il faut avant toute chose comprendre sa structure botanique, ses conditions de croissance et les étapes de sa transformation pour parvenir à des tiges exploitables en génie civil.

1.1 - Approche botanique

Le bambou est une plante à tige parfaitement cylindrique et lisse de la famille des *Poaceae*¹. Il en existe plus de 1 000 espèces appartenant à environ 80 genres. Le bambou n'est donc pas considéré comme un arbre, malgré des espèces dont la taille peut dépasser une quarantaine de mètres. Deux de ses caractéristiques botaniques sont particulièrement intéressantes pour son utilisation comme bois de construction.

Tout d'abord, sa tige formée d'un chaume (ou canne) est dite ligneuse. Les cellules la constituant fabriquent des lignines² en importante quantité. La présence de fibres cellulosiques, extrêmement serrées notamment sur la couche externe du chaume, offre également une grande souplesse. La tige du bambou est creuse entre deux diaphragmes, ce qui donne au bois une grande légèreté. Elle contient un exsudat³ riche en silice, déjà utilisé en médecine pour aider à la guérison de fractures.

La figure 2 permet de mettre en évidence les discontinuités géométriques au sein de la tige de bambou (régions nodales ou creuses) mais aussi la variation de la composition biologique de la tige en fonction de l'épaisseur et de la couche. Leurs influences sur les caractéristiques mécaniques seront détaillées au paragraphe 2.

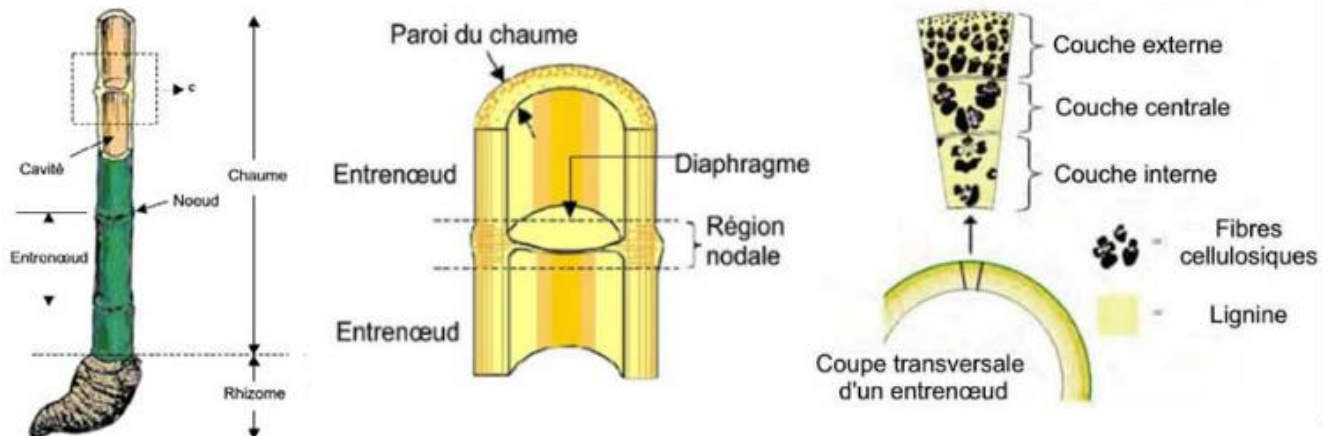


Figure 2 : Structure d'une canne de bambou, source [2]

1.2 - Croissance et culture

Le bambou est réputé pour sa croissance rapide, avec une taille finale pouvant atteindre plus d'une quarantaine de mètres dans certaines régions. Cette plante, extrêmement résistante, est insensible à de fortes variations de température. Elle n'a pas besoin d'un apport d'engrais, ni de

¹ Les *Poaceae*, anciennement famille des graminées, sont une importante famille de plantes monocotylédones regroupant plus de 12 000 espèces

² Macromolécules organiques conférant à la plante sa rigidité, son imperméabilité, et lui permettant de résister à la décomposition quand la plante est coupée

³ Un exsudat est un épanchement de liquide de nature séreuse

produits phytosanitaires pour grandir convenablement. C'est donc une potentielle solution économique et écologique future en devenant, par son utilisation comme bois de construction, une alternative à la déforestation.

Les espèces de bambou intéressantes pour les filières du Génie Civil atteignent leur maturité après quatre ou cinq années de pousse. Après la première coupe, les suivantes peuvent s'enchaîner tous les deux ans, voire même plus régulièrement pour certaines espèces. Il est ainsi estimé qu'un bambou peut produire jusqu'à 15 km de perche utilisable en 35 ans.

Cependant, la culture de bambou ne respecte pas toujours les codes d'une culture durable. Premier exemple, il est courant de privilégier l'extraction des fibres dans les bambous jeunes, car la difficulté d'extraction augmente avec l'âge. De surcroît, ces cultures peuvent devenir invasives et menacer directement la biodiversité du territoire concerné. Il est donc nécessaire de réglementer la culture de bambou pour éviter une colonisation des écosystèmes, comme cela a pu être le cas dans certains pays du Sud de l'Asie.

1.3 - Implantation géographique

Les premières pousses de bambou sont apparues il y a 200 millions d'années, et ont survécu aux événements biologiques, notamment dans les pays d'Asie centrale et du Sud. Des études sur le terrain ont ainsi montré la présence de plusieurs de ces espèces il y a 3 millions d'années, qui n'auraient pas survécu à la dernière période glaciaire.

Au cours des derniers siècles, la présence de bambou a été particulièrement influencée par sa culture et son acclimatation. Un exemple historique est l'utilisation du bambou par les colons portugais dans leur colonie comme le Brésil... L'auteur français E. Verdier-Latour, dans son livre paru en 1853, insiste également sur la présence majoritaire de bambou dans les pays d'Asie Centrale (Chine...) ou d'Asie du Sud (Iles Philippines...)

La question sous-jacente porte donc sur les conditions géographiques favorables à la culture de bambou, et par conséquent : serait-il possible de cultiver aujourd'hui du bambou en France ?

Pour croître dans de bonnes conditions, le bambou tolère une grande variété de sols (des sols pauvres en matière organique jusqu'aux sols riches en minéraux), ce qui explique leur présence étendue dans le monde. De plus, plusieurs espèces sont particulièrement résistantes aux grandes variations de température. Ainsi, en Chine, des plantations survivent à des hivers rudes à -24°C associés à des températures estivales dépassant les 30°C. Cette grande adaptabilité vis-à-vis des conditions climatiques est un atout majeur pour l'introduction et la culture du bambou.

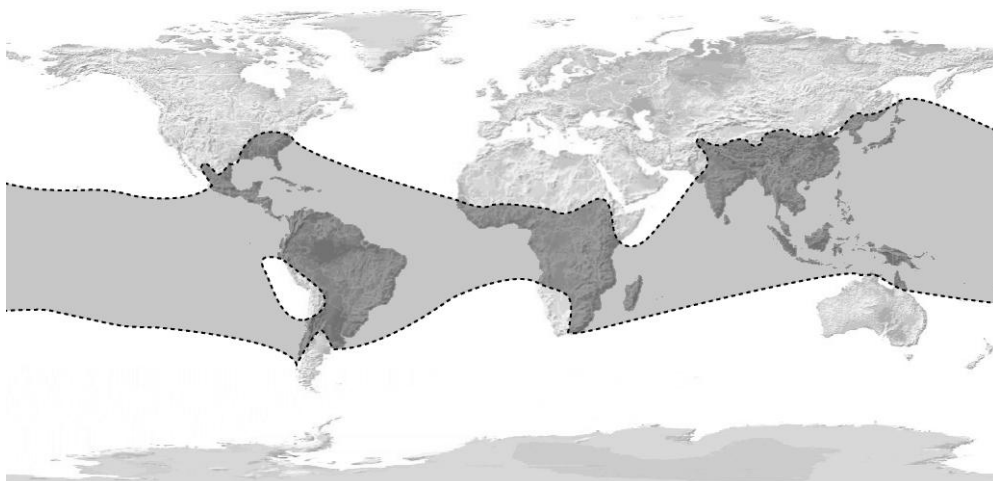


Figure 3 : Aire naturelle des répartitions des bambous, source [3]

Concernant notre étude de cas sur l'implantation du bambou en France, cet avantage est déterminant. D'autant qu'il est facile de faire des liens entre le climat observé dans les régions chinoises, notamment dans la région du Midi. Des bambouseraies existent déjà en France, par exemple la bambouseraie d'Anduze dans les Cévennes, qui date du XIX^e siècle et est classée monument historique.

Enfin, il est à noter que selon les localisations, le bambou présente des performances mécaniques variables. Des températures plus faibles semblent privilégier les espèces de bambou plus petites et plus résistantes. De même, les bambous présents sur les îles Philippines ont la particularité d'avoir des nœuds plus resserrés, favorisant une plus grande résistance à l'effort.

1.4 - Exploitation économique

Le bambou est coupé à l'âge de cinq ans dans la saison estivale, de mai à septembre [4]. C'est à ce moment que le taux d'eau et d'amidon est le plus faible dans la plante, ce qui assure une résistance plus grande contre les insectes et les champignons. La coupe est réalisée de préférence au niveau d'un nœud, pour assurer l'étanchéité dans les tubes.

Une fois les tiges coupées, elles sont séchées pour assurer une certaine longévité :

- séchage à l'air pendant 6 à 12 semaines ;
- séchage au four pendant 1 à 2 semaines.

La teneur en eau plus élevée dans le bambou nécessite un temps de séchage conventionnel plus long que celui pour un bois classique de construction. Elle provoque également un phénomène de contraction dans la direction radiale lors de cette phase, pouvant amener à une fissuration de la tige. La durabilité du bois une fois coupé est variable en fonction des traitements réalisés et de l'utilisation. Les principaux facteurs de dégradation sont les insectes, les champignons, l'humidité... Pour les combattre, des solutions comme la circulation d'air, le drainage, l'isolation du sol et le colmatage des extrémités des chaumes sont à privilégier. La durée de vie estimée est alors de 25 ans.

Utilisation actuelle du bambou

Le bambou présente des applications multiples, de la création de papier à l'application pharmaceutique en passant par l'utilisation des tiges dans les filières de génie civil. Son introduction et sa facilité de croissance sont des éléments attractifs pour de nombreuses industries qui cherchent à l'exploiter. Une étude en 2009 soulignait que les pays asiatiques étaient les principaux exportateurs de bambou, aux alentours de 83%, tandis que les pays de l'Europe et de l'Amérique du Nord importaient massivement, jusqu'à 71% des importations mondiales [5].

Pays	Volume de bambou [1000 ha]
Inde	11,361
Brésil	9,300
Chine	5,444
Indonésie	2,081
Laos	1,612
Nigéria	1,590
Chili	900
Myanmar	859

Figure 4 : Les ressources de bambou dans le monde

2 – Le bambou : un « acier vert » ?

Nous allons comparer les différentes propriétés mécaniques du bambou par rapport à celles de différents bois usuels [6]. Les résultats présentés proviennent de différents types d'essais (traction, compression et flexion) permettant de caractériser la solidité et la rigidité d'une espèce de bambou cultivée en France, le *Viridi glaucesens*. L'objectif est de voir si cette essence pourrait être utilisée comme matériau de construction et de vérifier si elle pourrait devenir le nouvel « acier vert ».

2.1 - Propriétés mécaniques du matériau

Essai de traction

Au cours d'un essai de traction, le bois de bambou est sollicité par un effort dont la direction est parallèle aux fibres. Deux grandeurs sont mesurées en particulier : le MOR_T (contrainte ultime en traction axiale) et le MOE_T (module d'Young axial). La rupture observée est systématiquement de type fragile, la plage plastique étant réduite.

Les premières expériences permettent de mettre en évidence plusieurs causes de variabilité des propriétés mécaniques au sein d'un matériau :

- la présence de points de faiblesse facilite une rupture locale bien avant la rupture finale ;
- l'épaisseur du bois influe également sur les propriétés mécaniques.

Position de l'éprouvette dans l'épaisseur de la paroi	MOR_T [MPa] moyenne et coefficient de variation	MOE_T [MPa] moyenne et coefficient de variation
Intérieur	79 - 0,25	5311 - 0,15
Milieu	140 - 0,12	7660 - 0,16
Extérieur	213 - 0,09	13460 - 0,05

Figure 5 : Variabilité des propriétés mécaniques en fonction de l'épaisseur de la paroi (22 éprouvettes), source [6]

À titre de comparaison, le bambou a un comportement en traction semblable à un bois dense de droit fil en termes de MOE_T . Il est cependant largement plus performant que les autres bois utilisés dans la construction, si l'on prend en compte le MOR_T .

Essai de compression

Lorsqu'il est comprimé en grandes déformations, le bambou présente un important palier plastique, à la manière des autres bois de construction. Le MOR_C (contrainte ultime en compression axiale) est nettement moins important, ce qui est lié à un phénomène de flambement et donc de décohésion des fibres au niveau du plan de cisaillement.

Les éprouvettes de bambou choisies sont prises avec des diamètres différents, avec la contrainte cependant d'être une portion de la tige entre deux nœuds afin de ne pas prendre en compte la discontinuité dans les fibres. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Diamètre des tiges [mm]	MOR_C [MPa]	Coefficient de variation
40	80	Non évalué
60	50	Non évalué

Figure 6 : Variabilité des propriétés mécaniques en fonction du diamètre des tiges, source [6]

Essai de flexion

Les essais réalisés sont des essais de flexion 3 points. Les expérimentations révèlent aussi la forte influence du diamètre des tiges sur le comportement en flexion des tiges de bambou.

Diamètre des tiges [mm]	MOR_F [MPa]	MOE_F [MPa]
40	100	13500
60	50	6500

Figure 7 : Variabilité des propriétés mécaniques en fonction du diamètre des tiges, source [6]

Une autre cause de variabilité, d'après les expériences menées, viendrait de la hauteur de l'échantillon dans le pied de bambou. Ainsi, plus l'échantillon est pris haut, plus le module élastique MOE_F augmente. On peut donc « sélectionner » les propriétés mécaniques du matériau en fonction de l'utilisation désirée.

Performances mécaniques comparées

Caractéristiques	Bambou	Chêne	Pin	Béton
Masse volumique [kg.m^{-3}]	580-700	700	530	2400
Contrainte ultime en traction axiale [MPa]	240	90	100	2
Contrainte ultime en compression axiale [MPa]	80	58	50	25
Module de Young en flexion [MPa]	14000	13000	12000	24000
Energie de production [MJ.m^{-3}]	30	80	80	240
Coefficient de Fail Safe ⁴	50	20	20	10

Figure 8 : Comparaison des performances mécaniques du bambou avec d'autres matériaux de construction, source [6]

La comparaison ci-dessus montre les nombreuses performances mécaniques du bambou face à des chargements en traction - compression - flexion, et ce, avec une masse volumique relativement faible. Deux facteurs sont également à prendre en compte : une faible énergie de production alliée à une grande capacité à supporter des accidents extérieurs de type séisme. Cependant, seules les performances à court terme des produits sont globalement connues. Les performances à long terme, comme la prise en compte du fluage, sont à considérer dans le cadre d'habitats appelés à tenir plusieurs dizaines d'années.

2.1 - Applications mécaniques - Renforcer avec du bambou

Parois structurelles

Au vu des performances mécaniques citées précédemment, de nombreuses entreprises ont engagé des phases de recherche pour développer des arrangements structurels essentiellement en bambou. L'essai proposé ici est un test de panneaux de bambou, en comparaison avec des murs habituellement construits en France. Il a été réalisé à Bordeaux, au FCBA, laboratoire spécialisé dans les structures en bois, afin de vérifier la conformité vis-à-vis des Eurocodes. La construction proposée par l'entreprise « Bambou Habitat » est similaire de celles utilisées avec des aciers : on retrouve notamment les différents systèmes de contreventement (figure 9). L'intérêt de cette expérience est de venir vérifier la capacité du bambou à reprendre des efforts latéraux. Les perches utilisées sont soumises dans ce cas à des efforts de traction ou de compression.

⁴ Exprime la capacité à supporter des contraintes accidentelles extérieures très forte : limite élastique/contrainte

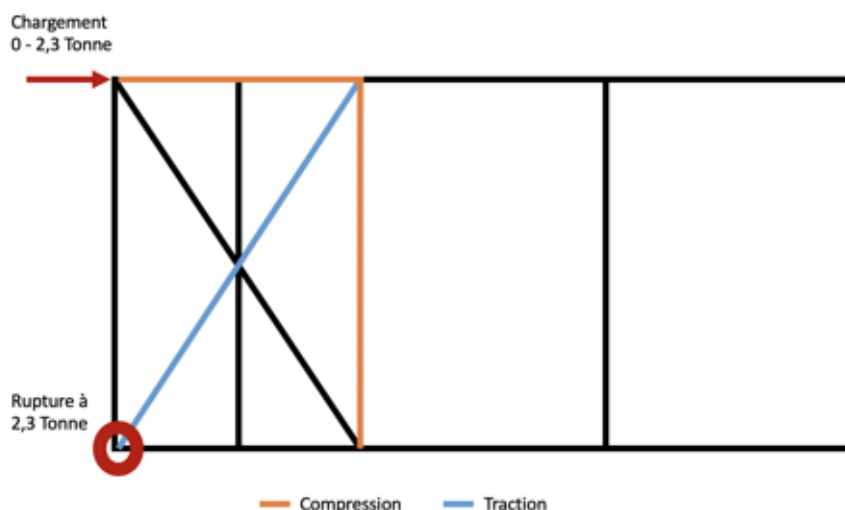


Figure 9 : Schéma de l'expérience menée (vidéo de l'expérience source [7])

La rupture visible intervient au point de traction entouré sur la figure 9, malgré un MOR_c inférieur à un MOR_t . Le chargement atteint est de 2,3 tonnes, soit supérieur au chargement atteint pour des murs en bois conventionnels (entre 1,5 et 1,8 T). Cela peut s'expliquer notamment par le MOR_c du bambou très supérieur au MOR_c d'autres matériaux comme le chêne ou le béton.

Le bambou peut également être utilisé comme renfort au sein de structures mixtes [8]. C'est le cas dans de nombreux habitats traditionnels où le bambou est découpé en bandes puis tressé afin de créer un maillage recouvert par la suite, des deux côtés, par un mélange de terre et de fibre.

Construction anti-sismique

Le premier test « grandeur nature » pour des habitations en bambou s'est produit en avril 1991 quand un séisme de magnitude 7,5 a secoué le Costa Rica [9]. Une vingtaine de maisons situées à l'épicentre du séisme ont résisté, sans traces visibles de fissure, tandis que les habitats en béton s'étaient effondrés. La légèreté du bambou est son principal atout puisque la force subie est multiple de la masse. Des membres de l'université de Kassel (Building Research Laboratory FEB) ont développé un système d'arches antisismiques [10]. La structure de test a été construite avec des briques en forme de U, reposant sur une arche construite avec trois couches de bambou fendu. Pour conserver la forme de l'arc après déformation, les trois sections sont entourées d'un fil d'acier tous les 50 cm. La voûte est reliée au sol par des tiges d'acier et une membrane en polyester induite de PVC assure l'étanchéité ainsi que la stabilité en cas de séisme.

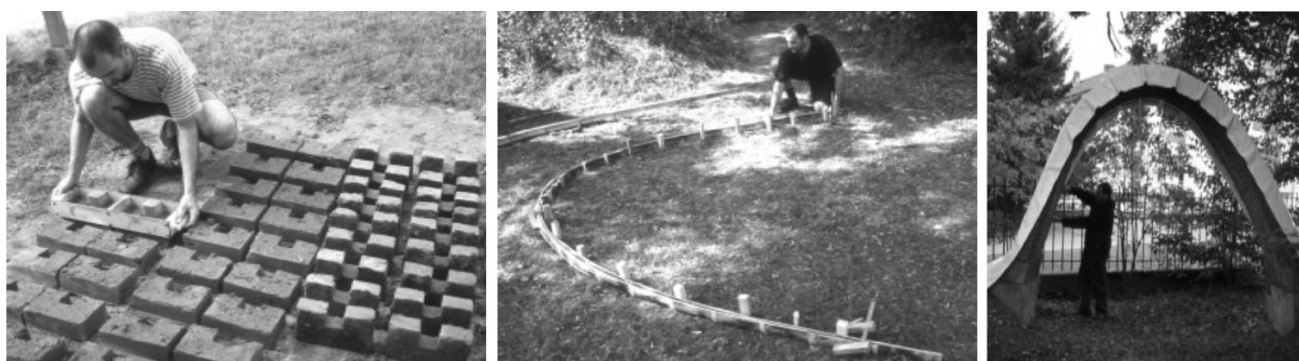


Figure 10 : Réalisation de l'arche parasismique, source [10]

Béton armé

Depuis plusieurs années, plusieurs organismes réfléchissent à la possibilité de remplacer les barres d'acier par des tiges de bambou pour créer un "béton armé vert". Plusieurs problématiques sont au cœur de ces travaux [11].

Deux difficultés majeures sont observées (figure 11) :

- le bambou est un matériau hygroscopique. Au moment de la coulée du béton dans le coffrage, le bambou a tendance à se gonfler, puis diminue de volume lorsque l'eau s'en est allée. Cependant, le béton a eu le temps de durcir et on observe alors une désolidarisation avec les tiges de bambou ;
- l'adhérence moyenne bambou-béton est relativement faible. Elle est estimée entre 0,25 et 0,5 MPa. Avec des traitements préalables (séchage prolongé, sablage des tiges, pose d'une couche de bitume) et un choix judicieux des chaumes avec un nombre important de nœuds permet d'atteindre une adhérence de 2,04 MPa.

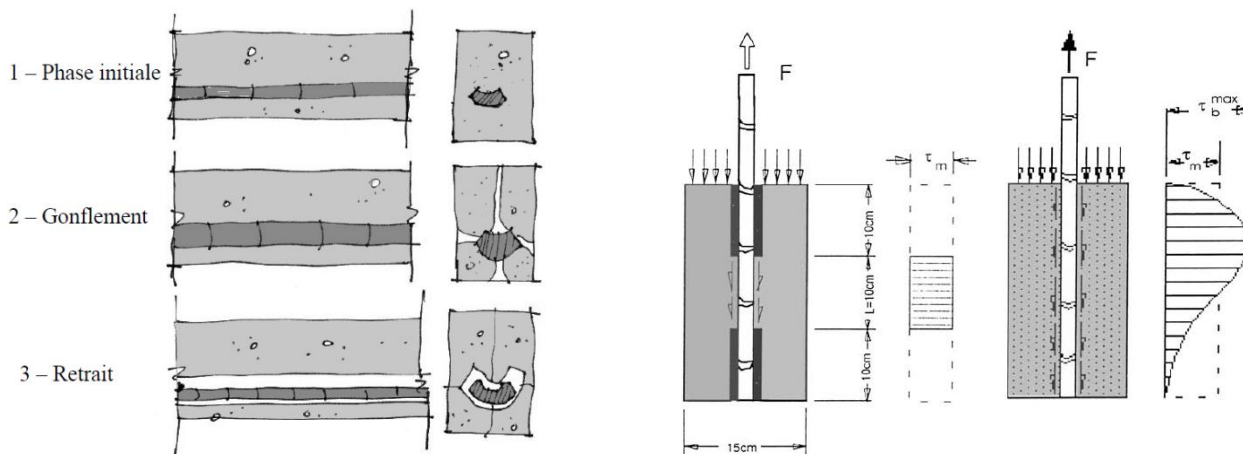


Figure 11 : Phénomène d'instabilité dimensionnelle - Test d'adhérence bambou béton, sources [11] et [12]

Construction d'une poutre en béton armée [11]

Les tiges de bambou sont coupées en lanières, puis sont crantées pour augmenter le phénomène d'adhérence. Elles sont ensuite sablées et enduites de bitume afin d'étanchéifier.

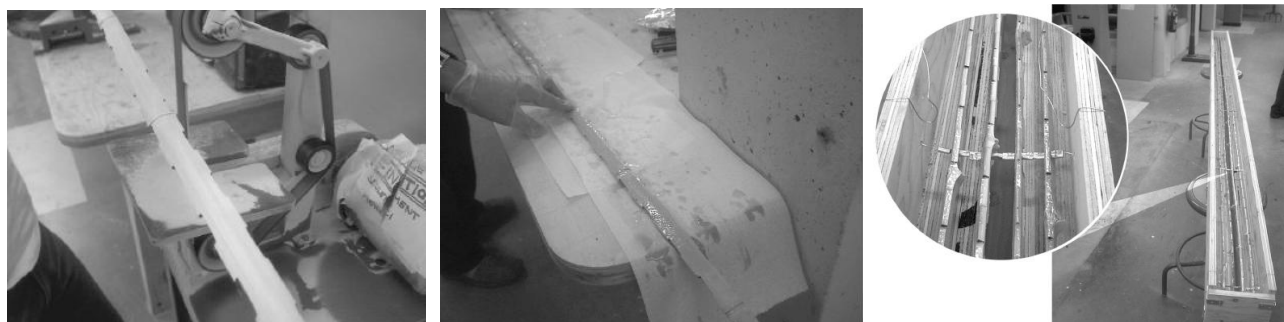


Figure 12 : Tiges crantées - pose d'enduit - réalisation du coffrage, source [11]

Construction d'un plancher en béton armé [12]

À la Pontifical Catholic University de Rio de Janeiro, David Guzman et Khosrow Ghavami ont mis en place un plancher innovant en bambou et en béton [12]. Les tiges de bambou sont préalablement coupées en deux, les zones de nœuds étant conservées, puis recouvertes d'une solution bitumeuse et sablée pour une meilleure adhérence avec le béton. Le bambou est placé dans les zones de tension, le béton dans les zones de compression.

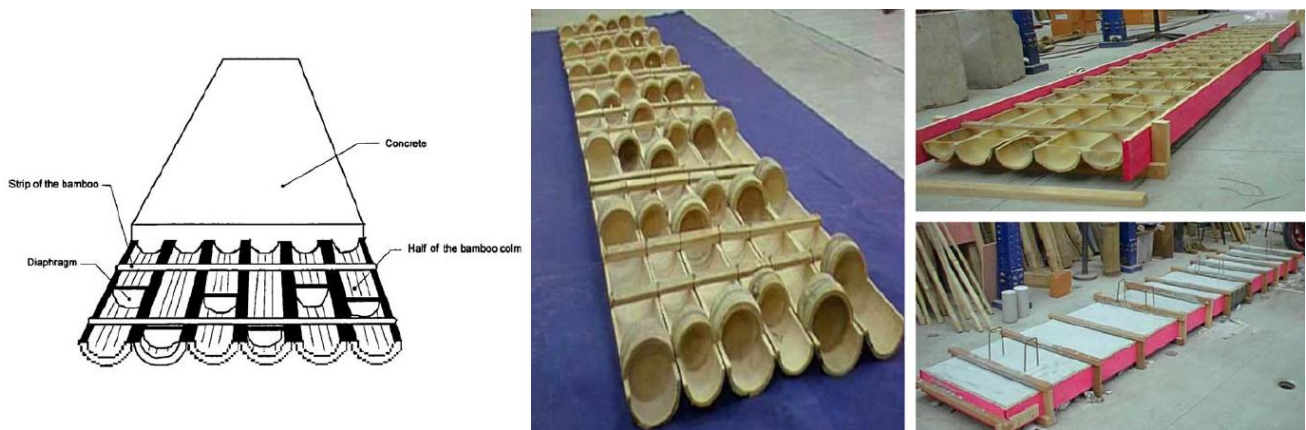


Figure 13 : Schéma et réalisation du coffrage, source [12]

Après plusieurs expériences, il apparaît aussi que la résistance dans les nœuds des tiges augmente si le diaphragme du bambou est conservé.

Ces applications montrent donc qu'il est possible de mettre à profit les caractéristiques mécaniques du bambou dans des applications diverses, sous réserve d'un traitement spécifique.

3 – Comment utiliser le bambou ?

L'utilisation du bois de bambou est relevée dès les années 1800, notamment en Asie, dans de nombreux domaines de construction, que ce soit de la grosse menuiserie, à l'utilisation pour des retenues d'eau ou pour des cordages. De nos jours, l'utilisation de ce bois pour nos habitats est-elle envisageable et répond-elle aux différents critères de confort et de sécurité fixés par la norme ?

3.1 - Le bambou comme bois de construction

Constructions légères et éphémères

En pratique : échafaudages en bambou

Dans la filière de la construction chinoise, il est devenu courant d'avoir recours au bois de bambou pour édifier les échafaudages participant à la construction, y compris pour les immeubles de grande hauteur. Voici des exemples récents de tour élevées en utilisant exclusivement des échafaudages en bambou :

- International Finance Center (416 m) à Hong Kong, 2003 (figure 14) ;
- Central Plaza (374 m) à Hong Kong, 1992 ;
- Jin Mao Tower (421 m) à Shanghai, 1999 ;
- Shun Hing Square (384 m) à Shenzhen, 1996 ;
- Citic Plaza (391 m) à Guangzhou, 1996.



Figure 14 : International Finance Center, source [13]

Lors de l'élévation des échafaudages, des systèmes de contreventement sont mis en place pour résister aux efforts latéraux du vent pouvant s'avérer violents avec une augmentation de la hauteur. La descente de charge est bien assurée par une succession de tiges qui, mises bout-à-bout, forment une seule et même colonne du sommet de la tour à ses fondations. Cependant, la technique d'assemblage par liens plastiques pose la question de la sécurité de l'ensemble. En France et en Europe, il semble compliqué d'utiliser cette solution au vu des normes de sécurité imposées.



Figure 15 : Construction d'échafaudage en bambou, sources [14] et [15]

En pratique : canalisations et barrages en bambou

Le bambou est utilisé dans les cultures de rizières afin de créer des retenues d'eau provisoires, nécessaires à la bonne culture du riz. Les tiges serrées entre elles forment un barrage quasi-imperméable, et ce de manière très rapide. Ce bois est aussi utilisé dans toute la chaîne d'irrigation (figure 16). Les tiges sont soit utilisées dans la construction de roues à aubes, soit découpées dans le sens de la longueur puis creusées au niveau des nœuds pour créer des conduites d'eau fonctionnelles.



Figure 16 : Système d'irrigation en bambou de Pu Luong, source [16]

Le bambou est donc un bois polyvalent, très pratique pour réaliser des constructions légères et éphémères au vu de sa légèreté et de ses performances mécaniques. Cependant, les assemblages réalisés ne semblent pas correspondre aux normes de sécurité valables en Europe.

Constructions résidentielles

Le bois de bambou est déjà présent en Europe dans des habitations résidentielles. Il prend généralement la forme de planchers, de parquets ou de pare-soleils en façade de bâtiments. C'est donc majoritairement une utilisation esthétique et non comme bois de construction.



Figure 17 : Esthétisme du bambou dans les constructions, façade en bambou à Carré Sénart, source [17]

Vers une utilisation du bambou comme bois de construction ?

En Asie, des habitats utilisent depuis plusieurs décennies le bois comme élément porteur. En Europe, utiliser le bambou comme bois de construction nécessite de respecter des exigences en terme de performances mécaniques vues au paragraphe 2.1, mais aussi en terme de confort thermique, sonore... Il s'avère que ce bois n'est pas un bon isolant thermique. Plusieurs projets déjà réalisés citent l'utilisation de plusieurs isolants permettant de garantir une isolation thermique et phonique :

- béton de chanvre ;
- fibres de bois + enduit à la chaux ;
- boue ;
- plâtre + mortier.

L'impact carbone est un atout pour défendre une utilisation du bambou pour la réalisation d'habitats. Outre la faible consommation d'énergie que nécessite sa pousse, le bambou parvient à fixer presque 30% de dioxyde de carbone de plus que les arbres feuillus utilisés en Europe, comme le chêne par exemple. Cela permet d'intégrer la composante du développement durable au sein de la chaîne de construction. Se pose cependant la question des traitements chimiques nécessaires pour augmenter la durée de vie de la tige.



Figure 18 : Sharma Springs, construction en bambou, Bali, source [18]

Structures exceptionnelles

Des structures de grande dimension ont d'ores et déjà été réalisées entièrement en bambou. Par exemple, des palissades de défense en bambou ont été érigées par le passé en Asie (Chine, Corée,...) [27]. Certains architectes actuels, comme le colombien Simón Vélez, s'essaient eux aussi à des ouvrages audacieux :

- Zeri Pavilion, Exposition universelle d'Hanovre, Allemagne, 2000 (figure 22);
- Pavillon Contemplation, Arles, 2018 (figure 19) ;
- Temple of No Religion, Cartagena, Colombie, 2009 (figure 20) ;
- Pont Jenny Garzón, Bogota, Colombie, 2003 (paragraphe 3.3, figure 23).



Figure 19 : Pavillon Contemplation, Simón Vélez, source [19]

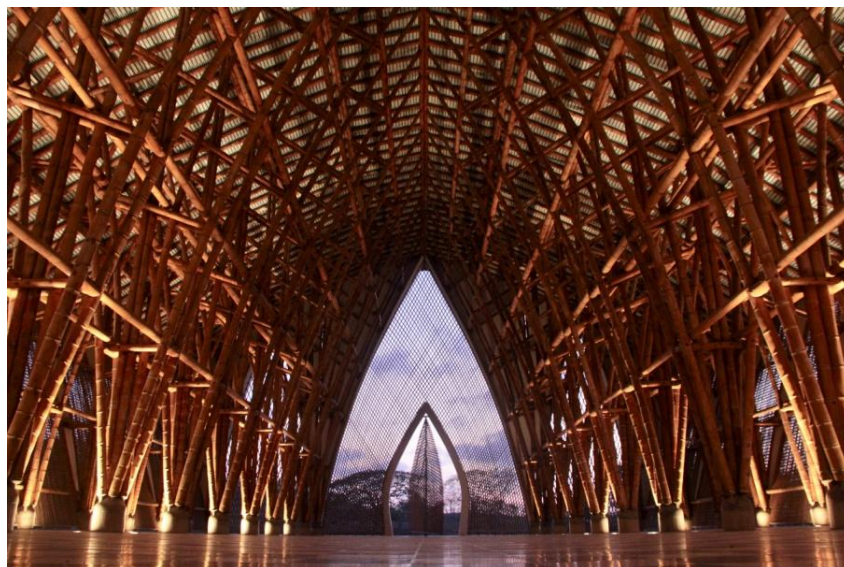


Figure 20 : Temple of No Religion, Simón Vélez, source [20]

Le bois de bambou est d'autant plus intéressant qu'il permet de réaliser ces structures exceptionnelles, et ce de manière provisoire. Ainsi, le pavillon Zeri à l'exposition universelle a pu être démonté. Le temple colombien avait été construit après un violent séisme ayant détruit le précédent. Cette solution, d'abord voulue provisoire, est finalement devenue une structure permanente.

3.2 - Assemblages possibles

Le bambou est un matériel anisotrope [21]. Dans le sens longitudinal, les fibres de cellulose sont fortes et rigides, tandis que la lignine, dans le sens transversal, est fragile. Le bambou est donc renforcé longitudinalement avec une résistance radiale comparativement faible. Plusieurs catégories d'assemblages possibles ont été définies au cours des dernières années pour maximiser l'utilisation du bambou comme bois de construction.

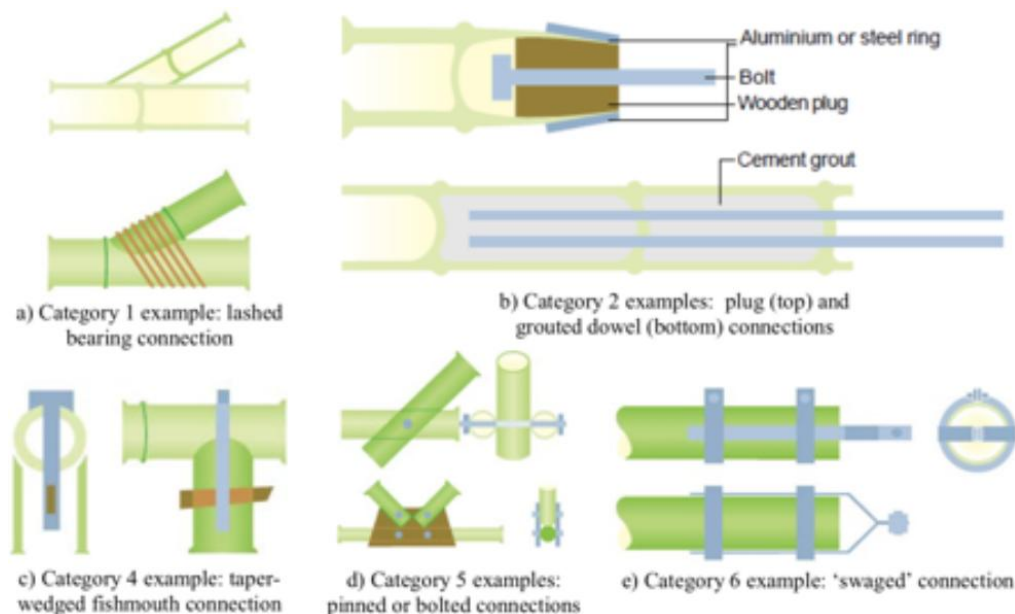


Figure 21 : Assemblages possibles, J. J.-A. Jansen, source [21]

Catégorie 1 : la liaison entre les deux tiges de bambou se fait par contact de toute la section. Dans ce cas, ce sont surtout des sangles qui maintiennent le contact de toute la section transversale de la tige de bambou. Cela permet de reprendre des efforts en compression sous réserve d'utiliser un adhésif pour des raisons de stabilité et de résistance au cisaillement.

Catégorie 2 : la liaison se fait par l'intérieur du chaume parallèlement aux fibres. Le creux du bambou est rempli d'un matériau comme du mortier de ciment (renforcé d'une tige d'acier) ou un morceau de bois. L'extrémité de la tige peut aussi être remplie d'un bouchon conique en bois et entourée d'un anneau conique en acier ou en aluminium. Un boulon en acier fixé au bouchon en bois constitue le troisième élément de serrage et de transmission de l'effort par adhérence.

Catégorie 4 : la liaison se fait par la section du chaume parallèlement aux fibres. Les efforts sont collectés à partir de la section et transférés à une broche en acier ou en bois, placée dans l'axe de la tige et parallèles à l'axe du chaume en bambou. Cette articulation doit cependant être faible en traction dans la direction verticale, en raison du problème de cisaillement.

Catégorie 5 : la liaison se fait par la section du chaume perpendiculairement aux fibres. On retrouve l'utilisation d'épingles en bois ou en bambou et de boulons en acier pour transmettre les efforts. Une nouvelle fonctionnalité est l'utilisation de morceaux plats de contreplaqué ou de plybamboo, collés dans des fentes sciées dans la verge en bambou, et qui conviennent à la préfabrication.

Catégorie 6 : la liaison se fait par l'extérieur du chaume perpendiculairement aux fibres. La méthode traditionnelle avec ce joint consiste à utiliser des sangles, tandis que la méthode moderne consiste à utiliser du fil d'acier ou des pinces. La principale difficulté vient de la méthode à utiliser pour attacher le fil d'acier directement sur le bambou lisse.

Il existe donc de nombreux types d'assemblages permettant de réaliser à la fois des structures provisoires ou durables. Au sein même d'une structure, l'ensemble de ces catégories peuvent être présentes, comme pour le ZERI Pavillon figure 22. Cependant, il manque les méthodes de calcul de dimensionnement, ce qui rend leur utilisation compliquée dans des législations comme les Eurocodes.

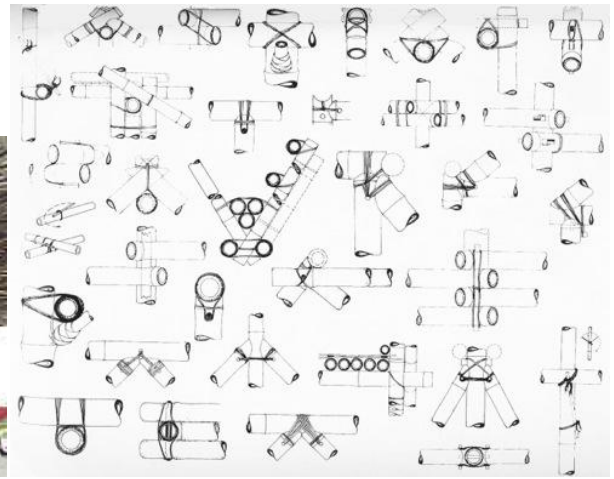


Figure 22 : Zeri pavilion, Simon Vélez, 2000 et assemblages utilisés, sources [22] et [23]

3.3 - Etude du Pont Jenny Garzón, Simon Vélez

Le pont Jenny Garzón est le seul pont piétonnier de Bogota construit à l'aide de tiges de guadua, variété de bambous se développant en Amérique du Sud. Ce matériau a été choisi pour son aspect esthétique, sa résistance proche de l'acier, son caractère écologique et sa résistance à de grandes chaleurs. Cet ouvrage d'art pèse 130 tonnes et mesure 45 mètres de long sur 3 mètres de large. Il est renforcé avec de l'acier et constitue la plus grande structure au monde conçue en guadua [24].



Figure 23 : Vues du pont, sources [25] et [26]

En tout, ce sont plus de 1 200 tiges de bambous de 9 mètres qui ont été ensuite utilisées pour réaliser la partie supérieure du pont. Or, le pont a une longueur totale de 45 mètres. Il a donc fallu développer des méthodes d'assemblage spécifiques.



Figure 24 : Assemblage de poutres, catégorie 6, source [25]

L'assemblage proposé illustre les joints de la catégorie 6. L'attache des éléments aciers extérieurs sur le bambou lisse est assurée par un système vis écrou. Les bambous sont également remplis de mortier à leur extrémité et reliés entre eux avec des barres de fer.

Une seconde problématique est de pouvoir transmettre les efforts du bambou aux fondations au béton, avec les difficultés évoquées ci-dessus. Pour cela, une solution de catégorie 2 a été utilisée.



Figure 25 : Fondations, catégorie 2, source [25]

Les éléments aciers extérieurs permettent un encastrement de la tige de bambou dans les fondations, et offre une possibilité de démontage si nécessaire. De plus, cela permet de passer outre la difficulté d'adhérence entre le béton du socle et la tige de bambou.



Figure 26 : Vue d'ensemble, source [25]

4 – Conclusion

Le bambou est une plante verte dont les multiples espèces poussent dans de nombreuses régions du monde. Sa grande adaptabilité rendrait sa culture possible en Europe, comme c'est déjà le cas dans certaines bambouseraies. Sa structure biologique est très intéressante, notamment en raison de la répartition des fibres et de la lignine en fonction des couches du chaume. Le professeur Janssen ose la comparaison avec une poutre de béton armé [9] :

« La lignine est le béton : elle tient les fibres de cellulose en place et les empêche de se déformer. La seule lignine, comme le seul ciment, s'effondrerait sous le poids d'un toit. La cellulose joue le rôle des barres en acier de renfort. La cellulose seule, comme des fers à béton seuls, se tordraient. Ensemble, cependant, la cellulose et la lignine sont une expression inégalée de la magie botanique, le tout étant plus grand que la somme de ses parties. »

Cela résume bien les propriétés mécaniques du bambou qui sont très intéressantes, en traction–compression, mais aussi en flexion. Sa légèreté en fait par ailleurs un matériau résistant aux séismes. Cependant, pour réaliser des applications comme l'utilisation dans du béton armé, plusieurs traitements (séchage, sablage, pose d'enduit...) sont nécessaires. En revanche, pour des raisons vibratoire, acoustique et thermique le bambou ne peut constituer à lui seul un élément de plancher ou de voile.

De nos jours, les constructions en bambou sont souvent provisoires, ou réservées à des classes sociales peu aisées. Cependant, des architectes commencent à utiliser ce matériau à grande échelle. Ils développent ainsi les connaissances en termes d'assemblages et permettent de faire avancer la recherche, notamment sur le calcul de structures et le dimensionnement des joints dans la durée.

Alors ça tient, le bambou ? Oui, indéniablement.

Références :

- [a]: S. Fonlupt, Le Bambou dans la construction, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008
- [b]: J. Richard, Assessing the performance of bamboo structural components, University of Pittsburgh, 2013
- [1]: Citron, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27565254>
- [2]: <http://www.voiles-alternatives.com/>
- [3]: FAL, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=129361>
- [4]: J. Richard, Assessing the performance of bamboo structural components, University of Pittsburgh, 2013
- [5]: M. Linders, Le Bambou, l'herbe magique, 2018, <http://www.bambouscience.fr/2011/06/24/caracteristiques-mecaniques-du-bambou/>
- [6]: Bambou Science et Innovation, Caractéristique mécaniques du Bambou, 2018, <http://www.bambouscience.fr/2011/06/24/caracteristiques-mecaniques-du-bambou/>
- [7]: Vidéo de l'essai schématisé figure 9, https://www.youtube.com/watch?v=Opv_mgVCrWw
- [8]: K. Naouri, Treillis de bambou utilisés comme renfort de structures mixtes en béton

- [9]: Association Guadua Bamboo, Les propriétés mécaniques et antisismiques, <http://guaduabamboo.blogspot.com/p/la-dimension-symbolique-du-bambou-une.html>
- [10]: G. Minke, Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth, 2001
- [11]: J. Boucher, Développement d'une poutre de béton armé de bambou préfabriquée pour l'habitat urbain de Hanoi, 2006
- [12]: K. Ghavami, Bamboo as reinforcement in structural concrete elements, Department of Civil Engineering, Pontificia Universidade Catolica, PUC-Rio, 2004
- [13]: Peter Dowley from Dubai, United Arab Emirates – IFC, Hong Kong Island, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32187869>
- [14]: Le bambou, un matériau pas comme les autres, http://mainguyen.nhaan.free.fr/wiki/index.php?view=bambou_4
- [15]: Batirama, <https://www.batirama.com/article/25621-quand-l-echafaudage-biosource-rime-avec-ville-durable.html>
- [16]: <https://voyageginospirli.blogspot.com/2019/03/lirrigation-des-rizieres.html>
- [17]: Végétal[e], <http://vegetal-e.com/fr/fiche/chantier-33/bambou-carre-senart.html>
- [18]: JSBG, La merveilleuse maison en bambou d'Elora Hardy à Bali, 2016, <http://www.jsbg.me/2016/03/30/la-merveilleuse-maison-en-bambou-delora-hardy-a-bali/>
- [19]: France Info, Rencontres de la photographie d'Arles : un temple en bambou pour exposer « la banalité du bien » vue par le moine Matthieu Ricard, 2018 <https://www.francetvinfo.fr/>
- [20]: Namagool7 - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=62535726>
- [21]: J. J.A Janssen, Designing and building with bamboo. Technical report No. 20, Technical University of Eindhoven, 2000
- [22]: Swiss feel pinch at hanover Expo 2000, <https://www.swissinfo.ch/eng/swiss-feel-pinch-at-hanover-expo-2000/1581408>
- [23]: Le bambou, un matériau pas comme les autres, http://mainguyen.nhaan.free.fr/wiki/index.php?view=bambou_3
- [24]: J. Arias, S.Baccifava, M.Bernardi, M.A. Lencina, A. Slingo, Monografía de análisis de autores Simón Vélez , UNR, FCEIA, 2011
- [25]: <https://hiveminer.com/Tags/bambus%2Cjenny>
- [26]: Juancho858 – Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36484876>
- [27]: E. Verdier-Latour, Études sur le bambou, Macao, 1853