

LE BAMBOU FORGÉ, ÉVOLUTION OU RÉVOLUTION?

par Frédéric Leroy

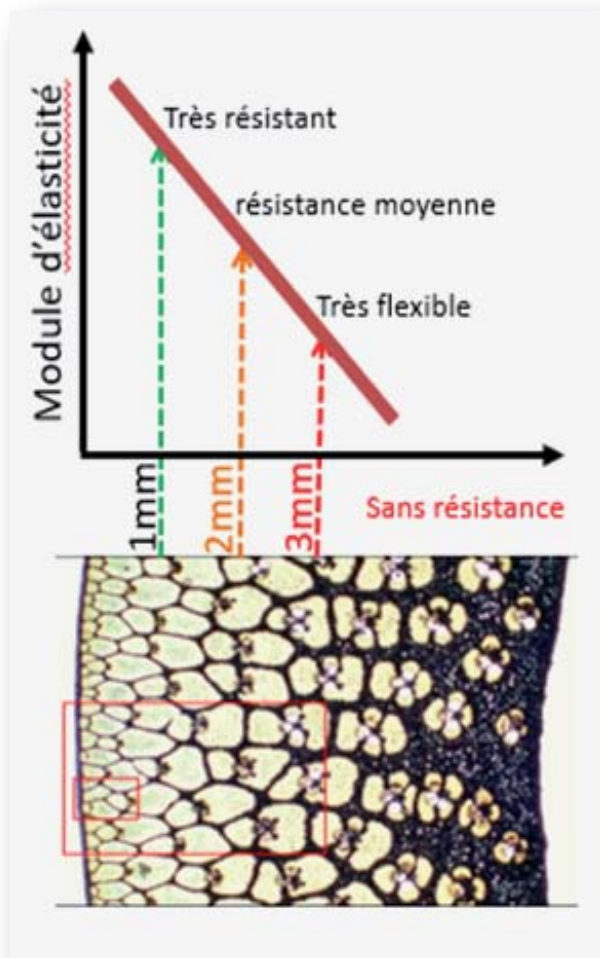
Voilà maintenant quelques années que je construis des cannes après avoir croisé le chemin d'un grand constructeur, Bernard Rigal, qui m'a donné ce virus beaucoup plus agréable que ceux que nous croisons actuellement. Bernard et moi avons passé de nombreuses heures à cons-truire, mais aussi à échanger ensemble sur les techniques et les façons d'améliorer en permanence la technique du bambou refendu. Les échanges avec la communauté des grands constructeurs européens, à l'occasion des rencontres m'ont aussi beaucoup appris et j'en ressors toujours plein d'idées et de projets. Enfin, avec Bernard et Jean-Louis, nous avons pu recréer l'an dernier, l'association française « les amis du bambou refendu » que j'ai l'honneur de présider et nous avons pu organiser de nouveau des rencontres françaises. Cette année, faute de congrès ou nous aurions pu de nouveau partager de belles réalisations, j'ai décidé de mettre ce temps à profit pour rassembler dans cet article les travaux que je mène, depuis 2 ans, sur la technique du bambou forgé. En voici quelques aspects.

Le traitement thermique du bambou a fait l'objet de nombreuses études pour mesurer son effet réel sur les propriétés mécaniques de nos chères cannes en bambou refendu. Les études de Wolfram SCHOTT (Bamboo under the microscope , Bamboo in the laboratory) et de Robert Eaton MILWARD (BAMBOO, Fact,Fiction and Flyrods) font référence dans ce domaine. Elles mettent en évidence, entre autres

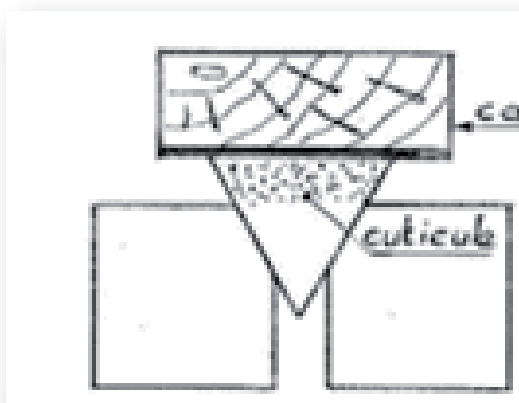
- L'influence des paramètres de traitement thermique (température/temps de traitement) sur les caractéristiques mécanique et son efficacité dans le temps.
- La structure interne du bambou et ses caractéristiques mécaniques en fonction de la densité et de la qualité des fibres, très différente entre la peau et le cœur.

En ce qui concerne l'influence du traitement thermique, les conclusions de ces études montrent que l'amélioration des caractéristiques méca-niques est liée en majeure partie à l'évacuation de l'humidité résiduelle du bambou durant le traitement et à des transformations chimiques qui interviennent aux températures les plus élevées (entre 180 et 200°C). Au-delà de ces températures, des dégradations conduisent à une chute des caractéristiques mécaniques. Le module d'élasticité, qui représente la caractéristique intrinsèque du matériau, est amélioré de l'ordre de 8 à 10% durant un traitement réalisé entre 180 et 200°C, mais après quelques semaines/mois, la réabsorption de l'humidité par le bambou, quel que soit le traitement de protection apporté (vernis, imprégnation,...), réduit cet effet à une amélioration finale de l'ordre de 2 à 3% ...

En ce qui concerne la structure interne du bambou, la qualité des fibres en surface est bien meilleure qu'au cœur, et des essais réalisés sur des éprouvettes prélevées à différentes profondeurs ont permis de le démontrer.



Le module d'élasticité, qui traduit la résistance à la flexion du matériau, est lié à la nature et la densité des fibres. Il est plus élevé en surface (juste sous l'émail), puis diminue drastiquement pour n'être plus égal qu'à 50% de sa valeur à 2,5mm de la surface. Au-delà de 4mm la résistance devient quasiment nulle.



Par ailleurs, les fibres externes étant les plus sollicitées, lors de la flexion de la canne, elles doivent être absolument préservées lors de la fabrication. Il est difficile de le faire en utilisant la technique classique du rabotage sur gabarit qui nécessite un surfaçage final coté émail.

Il est plus facile de conserver la courbure extérieure lorsque l'on utilise le fameux Morgan Hand Mill, en utilisant un guide support arrondi au diamètre du bambou.

Les facteurs de cannes mettent souvent en œuvre de bonnes pratiques permettant de prendre en compte ces éléments, parmi lesquelles on peut citer :

- L'amélioration de la qualité du traitement thermique, des fours et des paramètres de température et de temps.
- Le soin apporté pour enlever le moins possible de fibres denses situées en peau, durant les phases de rabotage.

Je me suis moi-même interrogé sur la meilleure façon d'améliorer l'un et l'autre, en essayant de tirer profit de mon expérience professionnelle dans le domaine de la forge. Dans ce métier, les matériaux métalliques sont déformés à chaud et font l'objet de traitements thermiques pour en améliorer les caractéristiques mécaniques. La notion de fibrage est importante. En effet, sous l'effet des déformations successives, la structure du matériau faite de grains métalliques s'aligne, ce qui porte le nom de fibrage.



Les caractéristiques mécaniques des matériaux ainsi déformés sont meilleures dans le sens des fibres ainsi constituées. Cela fait que les pièces forgées sont plus résistantes que les pièces moulées. Lors des opérations de finition, tel que l'usinage par exemple, il est important de ne pas couper les fibres afin que la résistance mécanique reste maximum vis à vis des efforts.

Pourquoi ne pas appliquer ces principes au traitement du bambou ?

C'est ce qui est fait pour déformer les nœuds du bambou afin de les aplanir. Les nœuds sont chauffés puis redressés pour aligner les fibres dans le prolongement de la baguette. Mais les techniques sont souvent rudimentaires et la encore, les conditions thermiques et mécaniques sont approximatives, ainsi que les résultats...





Je me suis donc lancé dans un essai de forgeage du bambou avec pour objectif de :

- 1 - maîtriser les conditions de chauffage
- 2 - maîtriser les efforts et la déformation du bambou
- 3 - mesurer les effets de la compression à chaud sur les caractéristiques mécaniques du bambou

Afin de conduire des essais, j'ai décidé d'utiliser une presse à vis équipée d'outillages chauffants, comme cela se fait dans le travail des métaux avec des moyens bien plus puissants.

Les outillages inférieurs et supérieurs sont chauffés par des résistances électriques branchées sur un régulateur. Des thermocouples introduits dans chaque outillage permettent de réguler la température avec une précision de l'ordre de 2 degrés. Différents essais ont permis de mettre au point les bonnes conditions thermiques.

Eprouvette 0 : avant compression (nœud apparent).

Eprouvettes 1 à 4 : après compression, avec des paramètres différents de température et de pression.

Les valeurs indiquées sont les épaisseurs mesurées aux deux extrémités.

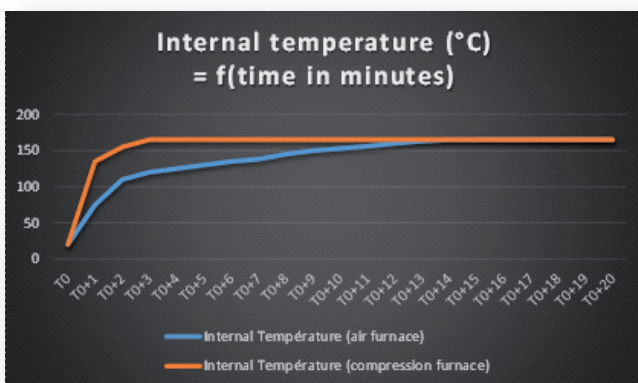


En introduisant un thermocouple à l'intérieur du bambou, on peut comparer la vitesse de montée en température de l'intérieur de la baguette de bambou, dans deux configurations : le four classique et le four presse. La courbe suivante montre clairement que la température de la baguette monte beaucoup plus vite avec le four presse.

Sur cette courbe, on voit que le cœur de la baguette (3mm* 5,5mm) a atteint la température de consigne (ici 160°C) après seulement 3 minutes alors que dans le cas d'un four classique, c'est seulement après 13 minutes que cette température est atteinte !

La littérature recommande généralement un chauffage de l'ordre de 15 mn à la température de consigne avec un four classique.

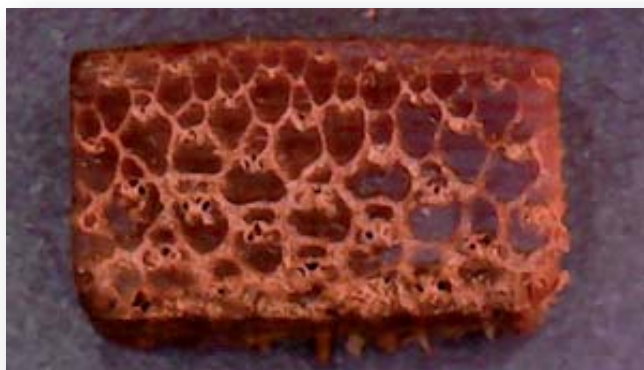
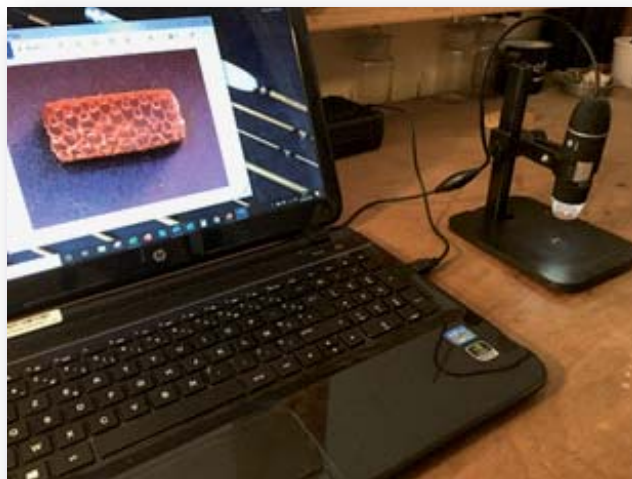
A la suite de ce constat, j'ai réalisé l'ensemble des essais de forgeage avec un temps de chauffage de 3 minutes.



Il est impressionnant de constater durant ces 3 minutes de chauffage (avant compression) que l'humidité du bambou sort comme la vapeur d'une bouilloire, quand on prépare une infusion. Cela se produit dès la première minute quand on accoste les outillages, et montre bien la vitesse de montée en température du cœur du bambou.



Après avoir comprimé à chaud plusieurs baguettes, je souhaitais connaître l'effet du forgeage sur les caractéristiques mécaniques du bambou. Je supposais que les fibres comprimées à chaud allaient donc être plus denses et mieux orientées, comme dans le cas du forgeage du métal et qu'il en résulterait une meilleure tenue mécanique. Dans un premier temps, je me suis équipé d'un petit microscope à connecter sur l'ordinateur afin d'observer de plus près la structure du bambou avant et après compression. Je souhaitais vérifier que la densité des fibres avait bien augmenté et l'absence de défauts de décohésion, comme on peut aussi le constater dans les matériaux métalliques lors de déformations maîtrisées.



Avant compression : La baguette a une largeur de 5,5mm et une épaisseur de de 3 mm. Tout en étant dans la zone de meilleure caractéristique mécanique , on distingue de nombreuses décohésions (canaux)



Après compression : l'épaisseur est réduite à 2,5 mm, et les canaux ont disparus.

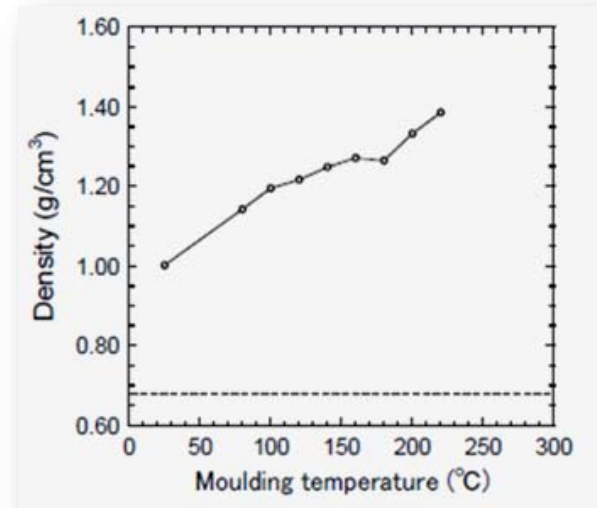
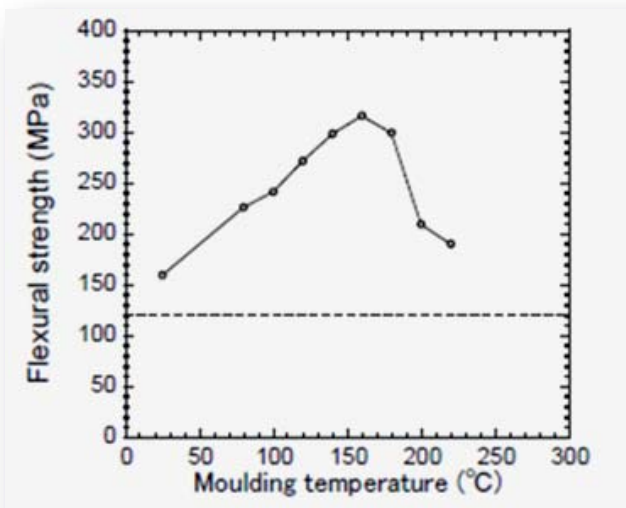
A ce stade , le procédé employé démontre sa capacité à :

- chauffer précisément et rapidement le bambou
- déformer les fibres avec une réduction de l'épaisseur pouvant atteindre 20% en compactant les fibres entre elles , et en refermant les porosités de type « canaux » .

On peut donc espérer une amélioration des conditions mécaniques. Mais de quel ordre ?

En cherchant sur le net, j'ai découvert que la compression du bambou à chaud était mise en pratique pour certaines applications, telles que la fabrication de dalles de plancher. Comme chacun sait, le bambou est de plus en plus utilisé pour de nombreuses applications et en particulier pour réaliser des plaques constituées de plusieurs baguettes collées entre elles. Ces baguettes sont aplanies à chaud sous de puissantes presses, puis collées entre elles.

Il était vraisemblable que des études aient été réalisées sur les caractéristiques mécaniques obtenues par ces procédés. Une étude réalisée à l'Institut des Technologies et Sciences de Tokushima au Japon, par H. Takagi, A. Mizobuchi, K. Kusano & Y. Okitsu est particulièrement intéressante. Cette étude, disponible sur le Net, décrit des essais réalisés par compression à chaud de bambou de la variété Madake, que nous connaissons bien. Les éprouvettes de 200*10mm et d'épaisseur comprise entre 3 et 5 mm sont comprimées à différentes températures (jusque 220°C) et sous une pression de 50MPa (soit 510kg/cm²). Les résultats obtenus montrent une nette amélioration de la limite élastique en flexion (force nécessaire pour commencer déformer de façon permanente l'éprouvette) avec un pic lors d'une compression à 160°C ; la limite élastique atteint alors 2,5 fois celle d'un bambou non comprimé, et la densité augmente d'un facteur 1,25 du fait de la compression, et donc de la densification des fibres du bambou.



Ces valeurs paraissant si importantes, il était nécessaire de se lancer dans des essais afin de mieux les comprendre. J'ai sollicité Peer Doering Arjes pour réaliser des essais mécaniques sur des éprouvettes fabriquées à partir du bambou pseudosasa amabilis et des paramètres plus proches du processus de production que j'ai développé. 3 lots de 7 éprouvettes (dimension L80*15*e3mm) ont été réalisées : 7 non traitées, 7 traitées à 180°C et 7 traitées à 180°C et comprimées à 150°C.

Ces essais, réalisés dans des conditions identiques (après étuvage des éprouvettes, afin de les mettre toutes dans des conditions hygrométriques homogènes), ont montré que :

Le taux de compression (variation de l'épaisseur h) est de 11,7 % sur le 3^{ème} lot. A ce taux, la densité (ρ) a augmenté en moyenne de 7,2% entre une éprouvette non traitée et une éprouvette comprimée.

Le module d'élasticité progresse en moyenne de :

- 5,8% par traitement thermique
- 13,6% par traitement thermique et compression

Cette série d'essai confirme bien que le forgeage est deux fois plus efficace que le traitement thermique classique dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques en flexion du bambou.

• Serie 28: pac-leroy	non traité					05.08.2019
<i>Proben- kennung</i>	<i>m</i> g	<i>b</i> mm	<i>h</i> mm	<i>E_B</i> N/mm ²	<i>ρ</i> g/cm ³	
pac-leroy-01	1,274	5,07	3,02	28710	1,03	
pac-leroy-02	1,262	5,01	3,07	28333	1,02	
pac-leroy-03	1,293	5,09	3,05	30040	1,04	
pac-leroy-04	1,288	5,11	3,04	28756	1,03	
pac-leroy-05	1,267	5,09	3,05	28300	1,02	
pac-leroy-06	1,260	5,03	3,06	27561	1,02	
pac-leroy-07	1,264	5,09	3,03	28766	1,02	
moyenne	1,27	5,07	3,05	28638	1,03	
• Serie 29: pac-leroy	traité 180°C 120mn					05.08.2019
<i>Proben- kennung</i>	<i>m</i> g	<i>b</i> mm	<i>h</i> mm	<i>E_B</i> N/mm ²	<i>ρ</i> g/cm ³	
pac-leroy-11	1,231	5,05	3,04	30982	0,99	
pac-leroy-12	1,250	5,02	3,04	30506	1,02	
pac-leroy-13	1,247	5,01	3,03	30564	1,02	
pac-leroy-14	1,220	4,97	2,97	30208	1,03	
pac-leroy-15	1,224	4,99	3,02	29464	1,01	
pac-leroy-16	1,240	4,98	3,03	30549	1,03	
pac-leroy-17	1,196	4,96	3,00	29412	1,00	
moyenne	1,23	5,00	3,02	30241	1,01	
delta /28	-3,4%	-1,4%	-0,9%	5,6%	-1,1%	
• Serie 30: pac-leroy	traité 180°C 120mn + comprimé (T°150°C)					06.08.2019
<i>Proben- kennung</i>	<i>m</i> g	<i>b</i> mm	<i>h</i> mm	<i>E_B</i> N/mm ²	<i>ρ</i> g/cm ³	
pac-leroy-21	1,224	5,22	2,67	31664	1,10	
pac-leroy-22	1,218	5,20	2,72	31639	1,08	
pac-leroy-25	1,211	5,15	2,74	30453	1,07	
pac-leroy-26	1,220	5,15	2,67	33727	1,11	
pac-leroy-27	1,251	5,15	2,74	33792	1,10	
pac-leroy-28	1,231	5,18	2,68	32471	1,11	
pac-leroy-29	1,233	5,23	2,60	33922	1,13	
moyenne	1,23	5,18	2,69	32524	1,10	
delta /28	-3,6%	2,2%	-11,7%	13,6%	7,2%	

D'après les essais réalisés, la compression à chaud a un effet au moins deux fois supérieur à celui d'un traitement thermique classique, sur l'amélioration du module d'élasticité. On peut donc considérer qu'il s'agit d'une grande avancée. Mais, cet effet est-il durable ? Nous savons, d'après les études faites par Wolfram SCHOTT que l'effet du traitement thermique diminue avec le temps du fait que le bambou, même protégé d'un vernis époxy, se réhydrate. Qu'en est-il dans le cas de l'effet de la compression ?

Afin de poursuivre l'étude, j'ai repris de nouveaux essais, avec l'objectif de mesurer cette fois-ci, la variation du module d'élasticité dans le temps, sur des éprouvettes traitées ou comprimées. Pour réaliser ces essais, l'objectif était de mesurer immédiatement avant et après traitement ou compression, la résistance à la flexion d'un lot d'éprouvettes, puis de mesurer l'évolution de cette résistance 1 semaine et 1 mois après.

Dans ce cas, je ne pouvais plus utiliser le service d'un laboratoire d'analyse, mais il fallait que je puisse réaliser moi-même les essais mécaniques, le jour même du traitement et à des dates précises.

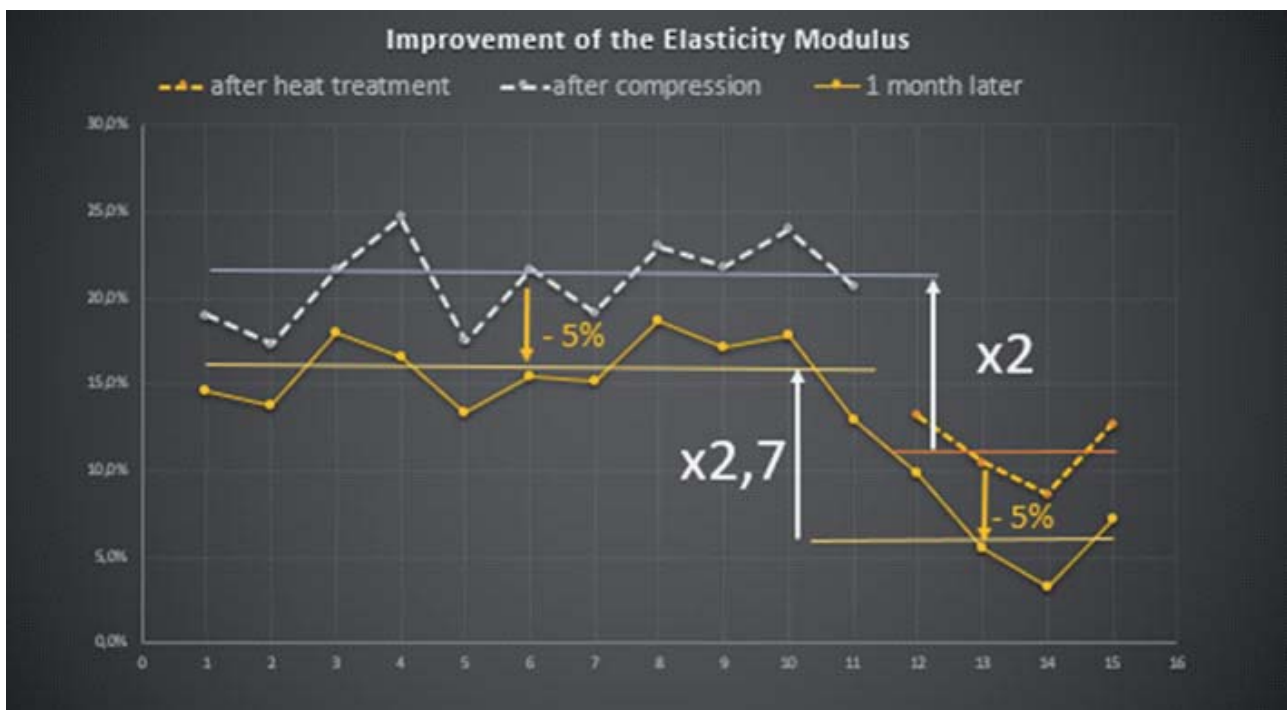


Cela a pu se faire en créant un outillage de mesure de flexion sous charge, et en comparant précisément la flexion de chaque éprouvette soumise à une même charge (ici un poids de 500g en bout d'éprouvette).

Les valeurs de flexion mesurées sur le comparateur, corrigées de la variation du moment d'inertie (qui varie du fait de la variation des di-mensions avant et après le traitement ou la compression), m'ont permis de comparer la résistance intrinsèque du matériau.

Les mesures permettent de constater l'évolution du module d'élasticité du matériau, après traitement thermique et compression. Le graphe suivant montre que l'on retrouve bien, avec ces mesures, une amélioration de l'ordre de 10% du module d'élasticité, ce qui correspond à un facteur 2 entre l'efficacité du traitement thermique (éprouvettes 12 à 15) et celle de la compression (éprouvettes 1 à 11), confirmant les essais faits en laboratoire (ou plutôt la validité de ma méthode artisanale....). Par contre les éprouvettes comprimées, après 1 mois, reprennent l'humidité de l'air ambiant, tout comme celle traitées de façon classique. Les mesures de poids faites sur chaque éprouvette à chaque stade confirment aussi ce fait.

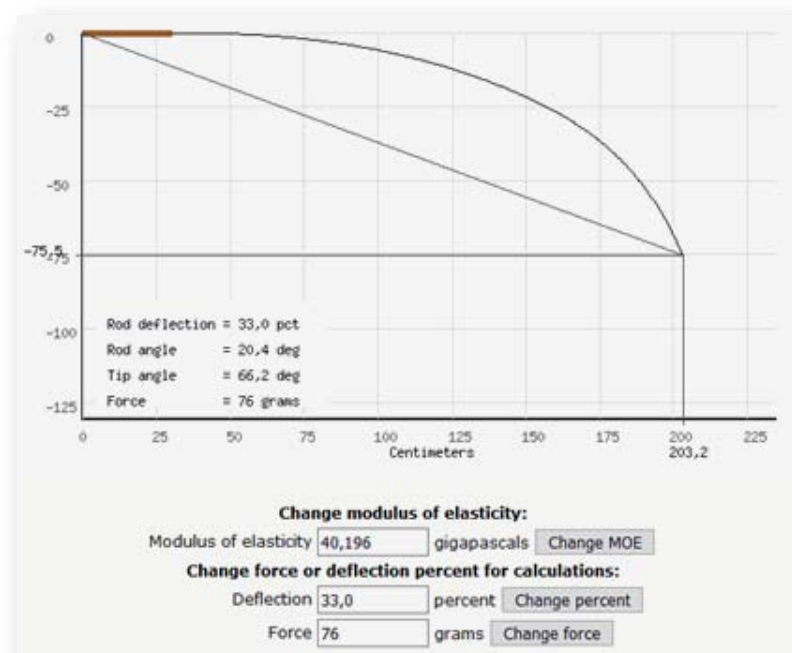
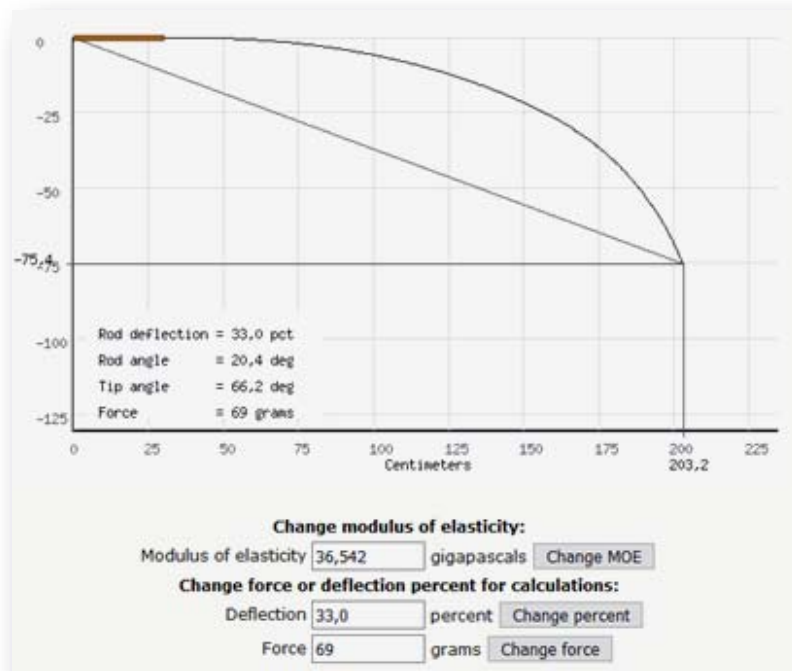
Après 1 mois, la reprise d'humidité étant égale en valeur absolue pour les deux procédés, le facteur d'amélioration du module d'élasticité entre le bambou traité et le bambou forgé devient 2,7, ce qui est considérable. Après 1 an, la reprise d'humidité peut encore faire perdre 3% de résistance au bambou traité, pour conduire à une amélioration résiduelle de l'ordre de 3% par rapport à un bambou non traité (suivant les études de W.Schott). En appliquant la meme variation sur le bambou forgé, le facteur d'amélioration entre un bambou traité et un bambou forgé serait alors d'un facteur 4, après 1 an !



Que signifie cela pour le comportement d'une canne ?

Afin de mesurer l'effet d'une amélioration de 10% du module d'élasticité entre une canne avec traitement thermique et une canne avec compression, j'ai utilisé la nouvelle fonctionnalité du logiciel HEXROD en ligne sur le net, permettant de réaliser des calculs de déflexion, en modifiant par exemple le module d'élasticité.

Les deux graphes suivants montrent le poids nécessaire pour faire fléchir la canne d'une hauteur égale au tiers de sa longueur. Entre le graphe de gauche et celui de droite, j'ai augmenté le module d'élasticité de 10% pour refléter l'amélioration apportée par la compression à chaud vis-à-vis du traitement thermique classique. La force nécessaire à appliquer à l'extrémité de la canne correspond à un poids de 69 g (canne traitée) alors que dans le cas d'une canne comprimée, cette force devient 76 g.



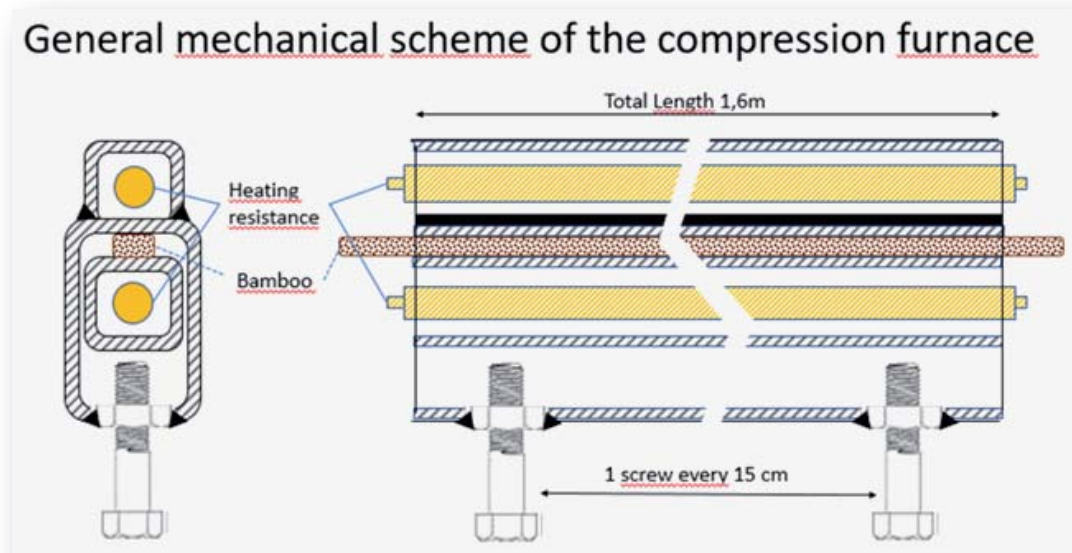
Ceci nous permet d'évaluer l'impact sur le numéro AFTMA de soie correspondant à chaque canne. En effet, si l'on utilise la méthode « Com-mon Cents System » développée par Dr W.Hanneman pour mesurer le numéro de la soie correspondant, la canne « avec traitement classique » correspond à une canne soie de 3, alors que la canne « comprimée/forgée » correspond à une soie de 3,5. La compression à chaud fait donc gagner un demi-numéro de soie à iso-profil.

A la suite de ces essais, et constats, il ne restait plus qu'à construire une canne en bambou forgé !

Ma petite presse à vis suffisait pour comprimer des éprouvettes de longueur 80 mm et largeur 5 mm ; il fallait trouver un concept de four pour comprimer des baguettes complètes de 1,5 mètre de longueur et 10mm de largeur maxi !!!

L'effort appliqué sur la petite presse à vis correspond à une pression de 50MPa soit 510kg/cm². Une baguette ayant une surface de 150cm², il fallait donc trouver un moyen capable d'exercer un effort de 510*150 = 76500kg soit 76,5 tonnes, en chauffant les outillages supérieurs et inférieurs à 180°C !

Après quelques essais infructueux, la solution a consisté finalement à utiliser un tube de section rectangulaire, à l'intérieur duquel un second tube coulisse, poussé par une série de vis. Le concept général est décrit par le schéma ci-dessous.



Enfin venu le temps de comprimer et de raboter du bambou forgé !

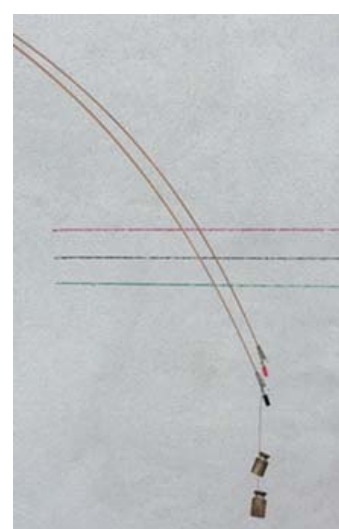
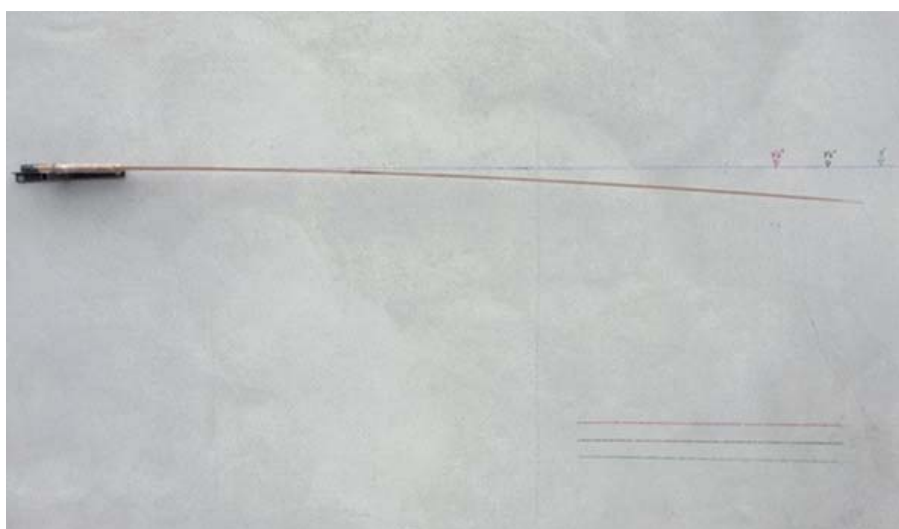
J'ai réalisé deux cannes identiques, l'une forgée, l'autre traitée. La canne forgée a été comprimée dans le four presse, l'autre a été traitée dans le même four avec les mêmes paramètres thermique mais en accostant simplement les outillages avec un couple de serrage très faible des vis. Chaque baguette est comprimée durant un temps de l'ordre de 6mn.

- 1 mn de mise en place (accostage des vis)
- 2 mn de montée en température
- Serrage des vis (1/2 tour = 0,5mm) et maintien 1mn
- Serrage des vis (1/2 tour = 0,5mm = et maintien 1 mn
- Desserrage/démontage.

Pour réaliser 8 baguettes (le talon et le scion d'une canne quadrata) cette opération prend une heure, incluant le temps de montée à température de démarrage du four. Ce temps est à comparer avec celui nécessaire pour comprimer les nœuds, et redresser les baguettes, puis traiter avec un four classique.... Je vous laisse faire le calcul.



Il ne restait plus qu'à mesurer le comportement des cannes afin de vérifier si l'on retrouvait bien la simulation de flexion faite avec HEXROD. Pour le vérifier, les deux cannes ont été fixées sur un support et un poids de 500gr a été fixé à l'extrémité. Sur la photo de droite on constate l'écart de flexion entre les deux cannes, et en particulier la plus grande rigidité de la canne forgée (pince rouge) par rapport à celle traitée d façon classique (pince bleue).



Par la suite, j'ai appliqué la méthode « Common Cents System afin de vérifier en accrochant un poids permettant de faire fléchir la canne du tiers de sa longueur , et confirmer que la canne forgée correspond à une soie de 3 alors que celle traitée de façon classique est une soie de 2,5. Ceci confirme bien l'écart entre les deux cannes observé avec le calcul d'HEXROD (même si le résultat entre calcul et réalité diffère d'un demi numéro de soie).

En conclusion, que peut-on retenir de la technique de construction du bambou forgé ? Quels sont les avantages et inconvénients d'une telle méthode de construction ?

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Le forgeage est 2 fois plus efficace que le traitement thermique classique pour améliorer la résistance en flexion du bambou. - Cette amélioration est encore multipliée par 2 (soit un facteur 4) si l'on prend en compte la reprise d'humidité du bambou qui annule une grande partie de l'effet du traitement thermique « classique » dans les mois qui suivent la construction de la canne. - L'amélioration apportée correspond à un demi numéro de soie. - Le forgeage permet de s'affranchir de l'opération de redressage des nœuds, longue, fastidieuse et susceptible de conduire à des dégradations du bambou si elle n'est pas faite dans les règles de l'art. - Le forgeage, permet d'obtenir une surface extérieure régulière et ne nécessite aucun rabotage de surface (ce qui enlève des fibres très dense et résistantes). - Le forgeage peut aussi servir à déformer et rigidifier des zones de la canne ou il est souhaitable d'améliorer les caractéristiques du bambou et en particulier dans les viroles en bambou. Il permet de réduire la surépaisseur de la canne dans cette zone en perturbant moins le comportement de la canne (voir image suivante) 	<ul style="list-style-type: none"> - La fabrication d'un four de compression nécessite des moyens et une attention particulière vu les efforts très importants en jeu (plusieurs dizaines de tonnes). Les composants mécaniques doivent être correctement dimensionnés. - La régulation thermique doit, elle aussi être bien réglée du fait de la dynamique thermique très importante.

Et pour finir, une vue de la virole en bambou forgé, permettant d'éviter de changer le profil de cette zone, en dehors de la longueur de la virole, sans aucun enlèvement de fibre externe.



Alors, le bambou forgé est-il une évolution ou une révolution ?

L'art de la fabrication des cannes en bambou refendu est un ensemble vaste qui comprend de nombreux domaines techniques (choix du bambou, choix des profils, méthode de rabotage, traitement thermique, collage, type de virole, accessoires, ...) où chaque détail est important. La qualité d'une canne dépend avant tout de la qualité de sa réalisation, et donc de la qualité du facteur de canne. Le bambou forgé est certainement une rupture sur le traitement thermique et sur le processus de construction d'une canne. Cette technique ouvre des possibilités nouvelles applicables à la fabrication de viroles bambou optimisées, elle impacte la méthode de fabrication (allègement du dressage des nœuds, modification du rabotage, ...) mais elle reste une évolution qui fera encore l'objet d'essais et de développements par tous les passionnés du bambou refendu.