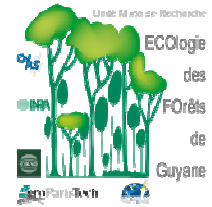




UNIVERSITE DE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC



MEMOIRE de MASTER II
Mention SCIENCES ET TECHNIQUES POUR L'INGENIEUR
Option MECANIQUE
Spécialité MECANIQUE & INGENIEURIES

Présenté et soutenu

par

Pierre Cabrolhier

Le 11 juin 2007

Description et comportement mécanique des bois contrefilés

Encadré par :

Jacques Beauchêne ^[1] et Bernard Thibaut ^[2]

Co encadré par :

Bruno Clair ^[3]

[1] : Chargé de recherche au sein de l'UMR Ecologie des Forêts de Guyane, au laboratoire du Centre technique du Bois Guyanais de Pariacabo (Kourou, Guyane Française)

[2] : Directeur de l'UMR Ecologie des Forêts de Guyane et chargé de recherche

[3] : Chargé de recherche au sein de l'équipe Mécanique de l'Arbre et du Bois, au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier

*Ce n'est point dans l'objet que réside le sens des choses,
mais dans la démarche.*

-Antoine de Saint Exupéry-
(Extrait de *Citadelle*)

*Je ne puis regarder une feuille d'arbre
sans être écrasé par l'univers.*

-Victor Hugo-

Avant propos :

Ce mémoire de Master 2 présente les travaux qui ont pu être réalisés dans le cadre d'une collaboration entre l'UMR Ecologie des Forêt de Guyane (ECOFOG), à Kourou, et le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de Montpellier.

Je tiens tout d'abord à adresser mes sincères remerciements aux personnes qui ont rendu ce stage possible, et qui m'ont accueilli dans leur laboratoire. A commencer par Bernard Thibaut et Jacques Beauchêne pour la Guyane où une grande partie du stage s'est déroulée, puis à Joseph Gril et Bruno Clair pour Montpellier.

Je souhaite souligner par ailleurs le formidable accueil qui m'a été fait au sein des équipes, que ce soit au laboratoire de Pariacabo en Guyane, ou dans l'équipe MAB du LMGc de Montpellier. Et remercie ainsi tous ceux que je ne cite pas mais auxquels je pense affectueusement.

Le bois est un matériau que j'ai commencé à découvrir par le contact, et par son travail, notamment à travers l'ébénisterie. Après plusieurs stages réalisés en laboratoire de recherche sur la mécanique de l'arbre et du bois, je commence à ressentir de nouveaux aspects de ce matériau qui me passionnent. Je découvre un travail aux facettes multiples, où tant de pistes restent encore à arpenter. Je suis heureux d'avoir eu la possibilité de réaliser une partie de ce stage en Guyane française, et de découvrir la grande biodiversité d'une forêt tropicale.

Bien entendu, dans le cadre de ce projet, je tiens à remercier tous ceux qui m'auront grandement aidé pour son avancement. A commencer par Iris Brémaud qui malgré les kilomètres a su être présente. A Tancrède Alméras aussi, qui aura apporté son aide très précieuse sur les aspects mécaniques. A Martinus Koese et Fernand Boyer qui m'auront beaucoup aidé sur les aspects usinages. Un grand merci bien entendu à mes encadrants, Bernard Thibaut, Jacques Beauchêne, et Bruno Clair pour leurs conseils et leur aide.

Sommaire

I- Introduction générale, notions importantes :.....	- 4 -
II- Description du contrefil :.....	- 1 -
2.1- La genèse du contrefil :.....	- 1 -
2.2- Les effets du contrefil :	- 1 -
2.3- Variabilité du contrefil :.....	- 2 -
a) Matériel et Méthode :	- 3 -
b) Résultats et discussions :.....	- 3 -
c) Observations sur une section complète :.....	- 4 -
III- Analyse mécanique :	- 6 -
3.1- Matériel et méthode :	- 7 -
a) Flexion 4 points ou flexion circulaire :	- 7 -
b) Vibrations libres sur poutres flottantes : la méthode « Bing » :.....	- 8 -
c) Vibrations forcés sans contact sur des poutres libres élancées :	- 9 -
d) Diffraction par rayons X :.....	- 10 -
3.2-Présentation des débits :.....	- 11 -
a) Barreaux de Flexion 4 points :.....	- 11 -
b) Barreaux de « Bing » :	- 12 -
c) Eprouvettes de vibrations forcées :	- 12 -
d) Eprouvettes de DRX :	- 14 -
3.3- Résultats et discussions :.....	- 14 -
a) Echelle microscopique : Variation de l'Angle des Microfibrilles :.....	- 14 -
b) Echelle locale : Eprouvettes de vibration forcée.....	- 16 -
c) Repère global : Discrétisation sur les barreaux de flexion 4 points	- 18 -
IV- Conclusions et perspectives :.....	- 21 -
V- Références :.....	- 23 -
ANNEXE 1	- 24 -
ANNEXE 2	- 25 -
ANNEXE 3	- 28 -
ANNEXE 4	- 29 -

I- Introduction générale, notions importantes :

Le bois est un matériau composite vivant qui a une structure complexe. Il est anisotrope et multi-échelle, i.e. suivant la direction considérée et l'échelle d'observation, les propriétés mécaniques sont différentes (facteur 10 sur le module d'élasticité, entre la direction longitudinale et radiale-tangentielle). A l'échelle macroscopique on peut considérer 3 directions principales et deux plans de symétrie (RT et LR), conférant au bois la propriété d'orthotropie cylindrique, réduisant ainsi la matrice de complaisances à 9 coefficients. On peut alors, en restant dans le domaine des petites déformations, appliquer le modèle de l'élasticité linéaire orthotrope, selon lequel les composantes des déformations sont reliées aux composantes des contraintes par une matrice symétrique de complaisance :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RL} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix}$$

La détermination des 9 coefficients n'est pas aisée, mais il est possible d'utiliser le modèle empirique mis au point par Guitard (1987) [11], basé sur une compilation des données de la littérature (43 feuillus de densité 0.1~1.28 g/cm³ et 37 résineux de densité 0.26~0.59 g/cm³). C'est un modèle que l'on peut considérer comme « robuste » et qui a été validé par de nombreuses études. Notamment par Bérard (2003) qui, dans sa thèse, a fait une comparaison entre le modèle proposé par Guitard et la détermination expérimentale des 9 coefficients par la méthode de la goniométrie ultrasonore.

La structure du bois est de type cellulaire, la densité représente alors la proportion de matière et de vide. C'est pourquoi, nous parlerons souvent de Module Spécifique, qui est le rapport du module d'élasticité divisé par la densité, à un taux d'humidité donné.

La Figure 1 représente les différentes échelles de description. La genèse du bois se fait au niveau du cambium. Les variations observées dans le bois, viennent de différences subtiles en termes de division et d'expansion cellulaire, la cellule étant l'élément de base de la composition du bois. Sa paroi est structurée en plusieurs couches aux propriétés différentes, et composée de trois types de macromolécules :

- La cellulose : C'est un polymère linéaire de glucose présent à environ 50-60% sous forme cristallin et forme ainsi des fibrilles de section carrée de l'ordre de 3,5nm de côté. Celles-ci sont assemblées entre elles et forment des microfibrilles très rigides et hydrophobes. Le reste de la cellulose est sous forme amorphe.
- Les Hémicelluloses : C'est un polymère de sucres peu cristallin qui peut s'associer à d'autres constituants, comme la cellulose et la lignine. L'hémicellulose est plus hydrophile que la cellulose.
- La lignine : C'est un réseau polymérique amorphe et de fort poids moléculaire.

On distingue 3 couches au niveau de la cellule, dont la plus importante est divisée en 3 sous-couches. La couche S₂ représente en général 75 à 85% de la paroi. Les microfibrilles qui ont été déposées lors de la différenciation cellulaire forment généralement un angle faible avec l'axe longitudinal de la cellule, de 5 à 30° dans le bois normal. La couche S₂ a une grande importance dans le comportement physico-mécanique du bois. L'angle des microfibrilles (AMF) a notamment un impact sur la rigidité du matériau et sur le retrait au séchage dans les 3 directions. En effet, le caractère anisotrope du bois est en grande partie gouverné par l'inclinaison des microfibrilles de cette couche.

I-INTRODUCTION GENERALE, NOTIONS IMPORTANTES

Des relations entre la rigidité du bois et l'AMF ont été souvent étudiées, notamment sur les résineux, par Booker et al. (1998), Tsehaye et al. (1998), Abasolo et al. (2000), Yamamoto et al. (2002), ou encore Barnett (2004) (cités par Ruelle dans sa thèse (2006) [9]). Ils trouvent généralement une diminution du module d'élasticité longitudinal avec l'augmentation de l'AMF.

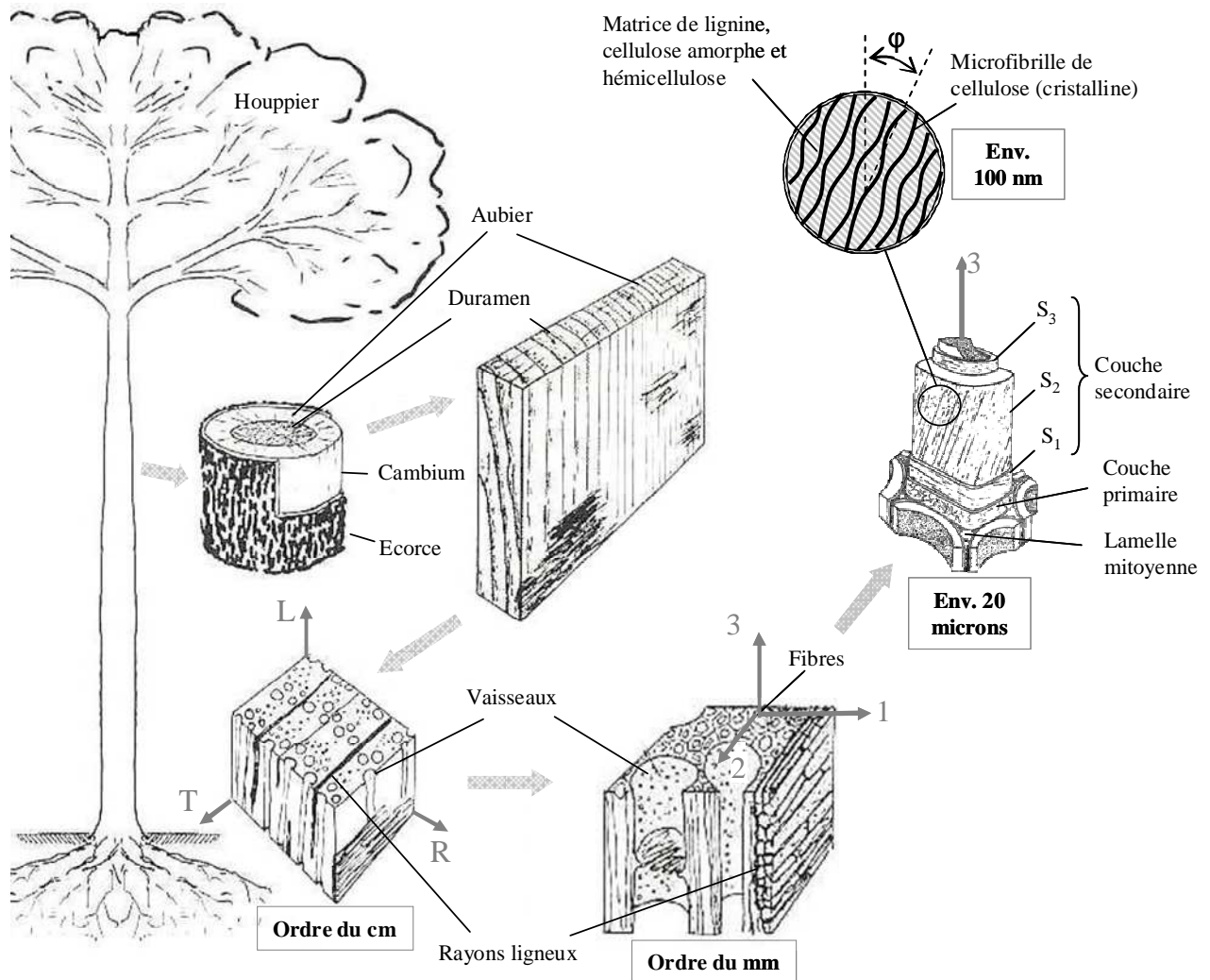


Figure 1 : Le bois, matériau orthotrope et multi-échelle

[R,T,L] : repère à l'échelle macroscopique

[1,2,3] : repère lié à la fibre du bois

ϕ : angle des microfibrilles par rapport à l'axe longitudinal de la fibre

II- Description du contrefil :

II-DESCRIPTION DU CONTREFIL

Les contraintes extérieures dans les forêts tropicales, bien plus faibles que dans des zones tempérées, ont laissé libre court à des stratégies complexes de développement au sein des espèces. Cette grande biodiversité se retrouve entre les classes d'espèces, mais aussi en leur sein.

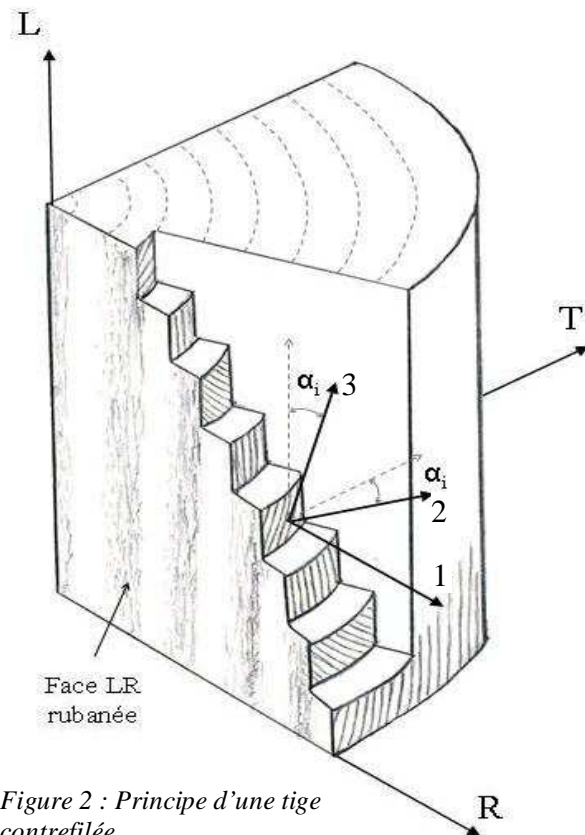


Figure 2 : Principe d'une tige contrefilée.

[R, T, L] : Repère global de la tige
[1, 2, 3] : Repère local lié à la fibre du bois

Un grand nombre d'arbres en forêt guyanaise développent la stratégie du contrefil, ce qui se traduit localement par une variation de l'angle du fil sur le rayon (cf. Figure 2). Rotation de la direction privilégiée du bois autour de l'axe R.

D'après Kribs (1950) cité par Hernandez et Almeida (2003) [2], 75% des 258 arbres tropicaux analysés possèdent du contrefil. Sur les espèces prélevées lors de ce stage nous avons pu constater le nombre important d'espèces présentant du contrefil, avec une très importante variabilité sur l'intensité et l'homogénéité de celui-ci sur le rayon.

2.1- La genèse du contrefil :

Plusieurs thèses sont à envisager pour la formation de l'angle spiralé du fil.

Détienne (1979) [1], sur les *Faro Daniellia* sp. Pl. observe une disposition régulière en quinconce des cellules cambiales. Il explique alors le contrefil par un événement apparaissant dans un étage qui perturbe l'imbrication régulière des cellules

dans celui-ci, et dans les cellules des étages adjacents. Ce qui provoque un déplacement de l'extrémité de la cellule de la gauche vers la droite, ou inversement.

Selon Kojis (2004) [3], qui a travaillé sur l'histoire des événements cellulaires dans le cambium étagé du *Lonchocarpus sericeus* (Poir.) DC, l'arrangement du parenchyme est constant mais l'orientation des cellules varie fortement avec le contrefil. Il observe une intrusion tangentielle sur le haut des cellules lors de la division péricleinale qui prend part au changement d'orientation.

Schulgasser (2006) [10] a montré que l'angle spiralé du grain pourrait être formé lors du processus de division cellulaire et de maturation dans la région du cambium. Mais le mécanisme de l'orientation reste inconnu dans le cas du contrefil. Schulgasser tente alors d'expliquer le phénomène de la fibre torse (une seule ondulation sur le rayon), en prenant en compte l'évolution de l'AMF entre bois juvénile et bois adulte, ainsi que les phases de sénescences dans le cas des arbres âgés. L'AMF crée un effort de cisaillement au niveau des cellules, qui ont alors tendance à vriller. Il suggère alors que les arbres de fil droit contrent cet effet pour ne pas vriller, et que les arbres à fil spiralé ne le font pas. Cette thèse n'explique pas hélas les phénomènes plus complexes comme le contrefil ou le fil ondulé.

2.2- Les effets du contrefil :

Compte tenu du fait qu'un très grand nombre d'espèces tropicales présentent du contrefil, il n'est pas irraisonnable de dire qu'il présente un avantage écologique significatif, ou au moins,

qu'il ne présente aucun inconvénient pour l'arbre. Plusieurs auteurs développent la thèse de l'avantage, notamment Weeb (1969) [6] qui a fait une étude sur les Sweetgum aux Etats-Unis. Selon lui, le contrefil améliore la distribution de l'eau dans la couronne de l'arbre, et apporte aussi une bonne adaptabilité pour répondre à une variation des conditions environnementales. C'est aussi ce que défend Détéienne (1979) [1].

Weddell (1961) [7], a montré que sur l'Utile et le Greenheart, le module de rupture en flexion et dans une moindre mesure, le module d'élasticité longitudinal, diminuent lorsque l'amplitude du contrefil augmente. Sur trois espèces Amazoniennes, *Ishpingo*, *Pumaquiro* et *Tulpay*, Hernandez et Almeida (2003) [2], ont trouvé que la résistance au cisaillement LT chute avec l'augmentation de l'angle maximum de déviation (distance angulaire entre deux inclinaisons maximales du fil en direction opposée).

Aussi, il semble que le contrefil diminue l'éclatement à cœur. Les contraintes de croissances étant élevées sur une période plus longue dans les arbres tropicaux, et le fait que les premières branches soient à environ 20 m en forêt, il est possible que le contrefil apporte une meilleure stabilité interne, évitant ainsi un éclatement à cœur lors de la croissance.

Les plus importants désavantages que l'on puisse noter sont de l'ordre du bois mis en œuvre. Weeb [6], note que le contrefil cause d'importants problèmes, comme de la torsion, ou encore l'arrachage lors de l'usinage, des contreplaqués ou des meubles. Rendant ainsi l'obtention d'un bon état de surface plus délicate. Mais c'est aussi une caractéristique recherchée pour son aspect esthétique. Sur le plan radial, on voit apparaître des bandes en raison des différences de réflexion et d'absorption de la lumière. On parle souvent de « bois rubanés » (cf. Figure 2). De nombreuses essences contrefilées sont utilisées dans l'ébénisterie et considérées comme des bois « nobles », notamment l'Ebène Verte, ou le Satiné Rubané.

2.3- Variabilité du contrefil :

Sur le Sweetgum, Weeb [6] remarque que les variations du contrefil sur la section sont indépendantes du taux de croissance. Il note aussi une héritabilité du contrefil dont l'origine lui est inconnue.

Détéienne [1] sur les Faro (*Daniellia* sp. Pl.), observe que sur des cernes suffisamment larges (supérieurs à 2 mm), la direction du fil fait une oscillation d'une ligne de parenchyme à l'autre. Il remarque aussi que sur des Faro d'origines différentes, l'oscillation en début de cerne n'est pas forcément la même (à droite ou à gauche). Généralement, il constate que les cernes les plus larges présentent la plus grande amplitude du fil, et vice-versa. Il trouve aussi d'importantes variations au niveau de l'individu. Pour des longueurs d'onde équivalentes (distance radiale entre 2 points où le fil retrouve la même direction d'inclinaison après une oscillation complète) l'amplitude peu varier du simple au double.

Thinley (2005) [5] qui a fait une étude sur de jeunes *Eucalyptus dunnii*, remarque une importante variation du contrefil inter- et intra-arbres. Il peut être cyclique, constant, ou fortement croissant. Il constate aussi que la longueur de l'ondulation ne dépend pas de la provenance de l'arbre, la famille ou le site, mais de la taille des arbres, ce qui suggère que le contrefil est un phénomène saisonnier ou annuel.

Plusieurs méthodes existent pour décrire le contrefil dans un arbre. Les deux plus employées sont, des coupes anatomiques successives dans le plan TL (c'est la méthode qu'utilisent Détéienne [1], Kojs [3]...), et le fendage radial (souvent plus utilisé, notamment par Hernandez et Almeida [2], Thinley [5], Weeb [6]...). Ogata et Fujita (2004) [4] ont mis au point une autre méthode permettant de mesurer l'angle du grain avec un microscope confocal et une analyse d'image par corrélation-transversale. Le microscope confocal permet de réaliser des

II-DESCRIPTION DU CONTREFIL

images de grande résolution qui sont comme des coupes "optiques" d'une épaisseur d'environ $0.4\mu\text{m}$, obtenues à différents niveaux dans l'épaisseur d'un échantillon.

Pour des raisons de disponibilité et de facilité d'utilisation, nous avons choisi d'utiliser la méthode du fendage radial avec une analyse d'image dans le logiciel ImageJ.

Après fendage Weeb [6], ou encore Hernandez [2] mesurent l'aire totale résultante et la divise par le rayon pour corriger les différents taux de croissance, le quotient résultant est l'index du fil (IF). Nous avons donc fait des mesures d'IF et de l'angle de déviation maximal (ADM).

a) Matériel et Méthode :

Après sélection des espèces disponibles dans l'atelier et des possibilités d'usinage, *i.e.*, bonne orientation et longueur suffisante pour l'usinage, des cubes ont été réalisés pour faire une description et une comparaison du contrefil dans des espèces différentes.

Les débits ont été réalisés dans l'atelier de menuiserie de Pariacabo, à l'aide d'une dégauchisseuse (pour les réorientations des barreaux), d'une raboteuse (pour le parallélisme), et d'une scie circulaire (pour l'obtention de cubes réguliers). Les débits et les calculs d'angles et d'aires sont présentés dans la Figure 3.

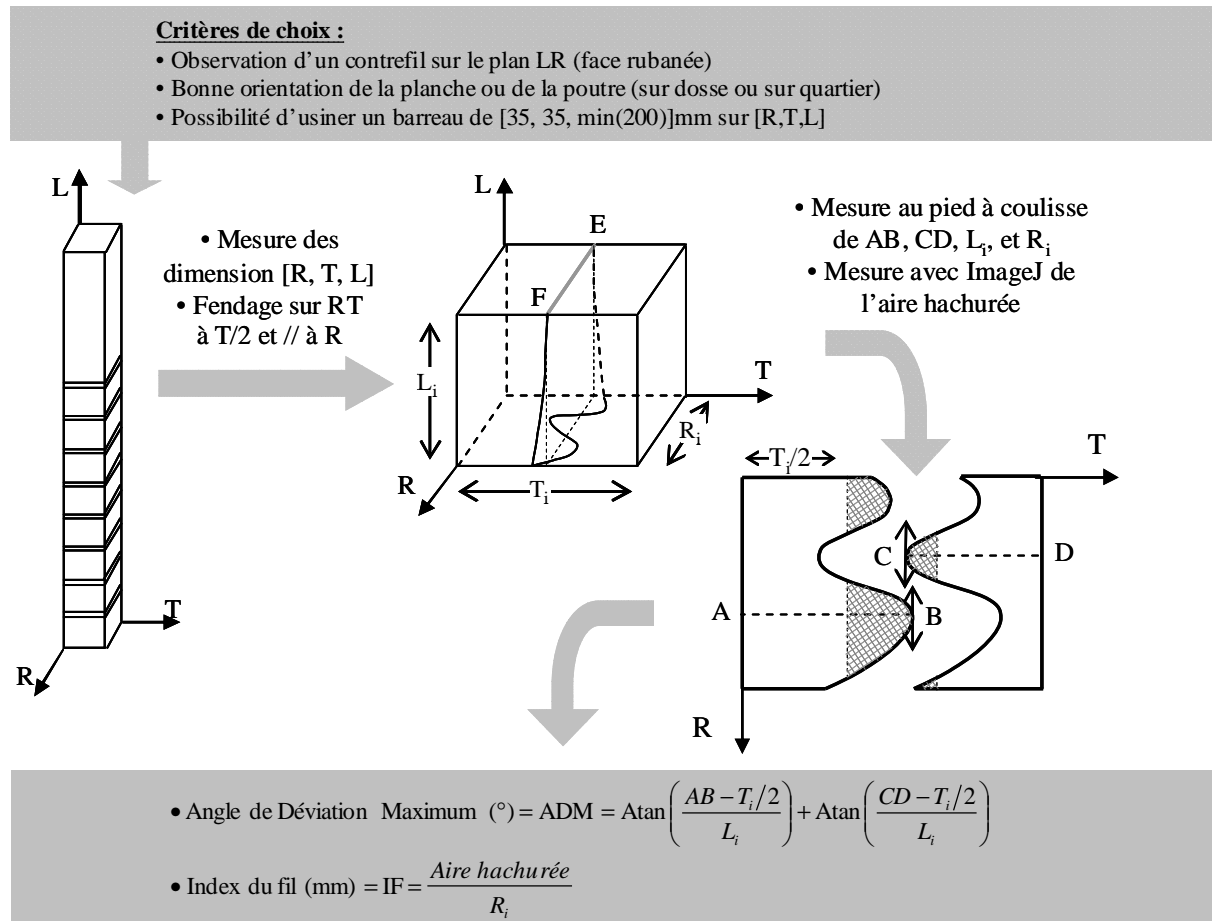


Figure 3 : Protocole d'usinage et de fendage à l'aide d'une machette

b) Résultats et discussions :

On note bien une corrélation entre l'ADM et l'IF avec un seuil de signification supérieur à 0,1% ($R^2=0,81$) sur les quelques espèces étudiés (cf. Figure 4). Tout comme Weeb [6] ou Hernandez [2] la trouvaient sur d'autres essences. La relation entre L'ADM et l'IF aillant un caractère géométrique, les résultats obtenus ne sont pas surprenant.

II-DESCRIPTION DU CONTREFIL

Ce qui est important de noter est la grande variabilité de contrefil, le Tableau 1 synthétise le type de contrefil des 10 espèces étudiées. Même s'il est indéniable qu'un grand nombre d'arbres tropicaux présentent du contrefil, il est la plupart du temps d'amplitude faible avec une période très variable. L'écart type dans le Tableau 1 montre bien que sur certaines espèces le contrefil n'est pas régulier sur la hauteur, notamment sur le Goupi avec un écart type de $11,1^\circ$ de l'ADM.

On remarque aussi une forte évolution du contrefil sur la hauteur dans certaines espèces.

Plusieurs essences présentent un contrefil que l'on décrit comme double. Comme il est expliqué sur la Figure 5, à un instant donné sur le rayon le fil fait un angle α par rapport à l'axe du tronc (le contrefil tel qu'on l'a décrit plus haut), mais fait aussi une oscillation sur 3 (de part et d'autre de la direction de la fibre).

c) Observations sur une section complète :

Afin de compléter l'observation du contrefil nous avons réalisé des fendages sur des sections complètes à partir de 2 essences, le Satiné Rubané et le Goupi (cf. ANNEXE 1).

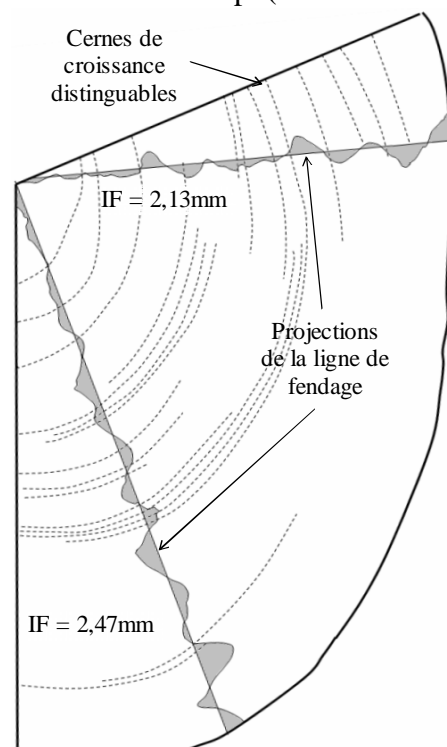


Figure 6 : Fendage sur la section d'une branche de Goupi (plan RT)

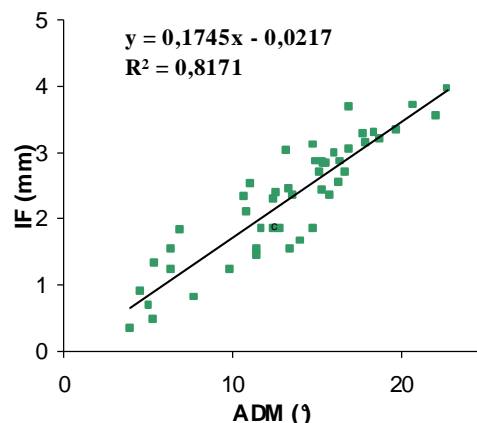


Figure 4 : Relation Angle de Déviation Maximal ($^\circ$) et l'Index du Fil (mm)

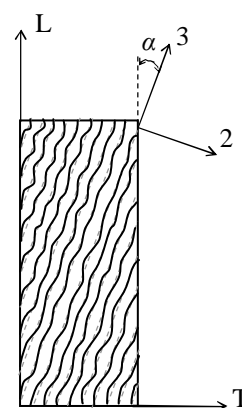


Figure 5 : Contrefil à oscillation « double » (plan TL)

Les observations que l'on peut faire sont intéressantes mais difficiles à exploiter, ne connaissant pas l'histoire de l'arbre.

Sur les deux espèces, on note tout d'abord une grande variabilité sur la section, qui tend à dire que le contrefil est localisé selon les besoins de l'arbre, particulièrement sur le Goupi. On remarque aussi que le contrefil commence très tôt dans la croissance de l'arbre, et tend à s'amplifier sur la fin. Appuyant ainsi notre hypothèse de l'utilisation du contrefil pour éviter l'éclatement à cœur, conférant aussi une meilleure stabilité.

Sur la Figure 6, on peut noter que l'Index du Fil (IF) est assez proche pour les deux fendages (2,13 et 2,47 mm respectivement pour le haut et pour le bas). L'amplitude du contrefil ne semble donc pas dépendre de la vitesse de croissance. Par ailleurs, le fil ne semble pas ici suivre une oscillation régulière sur le rayon. On peut aussi noter le décalage au début de la croissance qui fait penser à un phénomène de fibre torse.

II-DESCRIPTION DU CONTREFIL

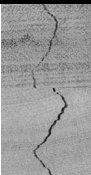









Appellation locale (<i>Nom Latin</i>)	Nom international (<i>Famille</i>)	Nbre cubes	ADM (°) (<i>écart type</i>)	IF (mm) (<i>écart type</i>)	Photo	Observations
Bagasse (<i>Bagassa guianensis</i>)	Tatajuba (<i>Moraceae</i>)	8	15,2 (3,7)	2,8 (0,6)		Contrefil homogène sur L, ADM et IF assez régulier entre les arbres
Goupi (<i>Goupia glabra</i>)	Cupiuba (<i>Goupiaceae</i>)	9	15,8 (11,1)	2,5 (2,4)		Contrefil souvent double sur le même axe de rotation (R) + Importantes variations sur L
Alimiao (<i>Pseudopitadenia suaveolens</i>)	Timborana (<i>Mimosaceae</i>)	8	15,9 (7,6)	2,9 (1,3)		Croissance particulière du cambium = variations sur L importantes
Dodomissinga (<i>Parkia nitida</i>)	Faveira (<i>Mimosaceae</i>)	8	7,2 (1,0)			ADM faible et Période étendue (de l'ordre de 50mm)
Gaïac de Cayenne (<i>Dipteryx odorata</i>)	Cumaru (<i>Fabaceae</i>)	5	11,9 (7,4)			Contrefil serré, oscillation double sur R et fil ondulé (oscillation sur T) + Très peu fissile.
Gonfolo Gris (<i>Ruizterania albiflora</i>)	Mandioqueira (<i>Vochysiaceae</i>)	7	16,3 (9,5)	2,8 (1,3)		Oscillation double sur R importante
Satiné Rubané (<i>Brosimum rubesens</i>)	Satine (<i>Moraceae</i>)	5 et 7	12,9 et 12,9 (2,4 et 5,4)			Variation entre les arbres souvent marquée
Ebène Verte (<i>Tabebuia Sp.</i>)	Ipe (<i>Bignoniaceae</i>)	9	6,1 (5,9)	0,9 (1,4)		Contrefil serré, mais beaucoup plus facile à fendre que le Gaïac de Cayenne + Semble suivre les cernes de croissance
Jaboty (<i>Erismia uncinatum</i>)	Jaboty (<i>Vochysiaceae</i>)	9	4,3 (6,1)			ADM faible et Période étendue
Koumanti Oudou (<i>Aspidosperma Sp.</i>)	Araracanga (<i>Apocynaceae</i>)	7	11,1 (6,9)	1,8 (0,8)		Contrefil très variable sur le rayon + Importantes variations sur L de l'ADM (Pas de contrefil double sur R)

Tableau 1 : Synthèse des échantillons fendus et comparaison avec l'Angle de Déviation Maximal (ADM (°)) et l'Index du Fil (IF (mm)).

III- Analyse mécanique :

Afin de décrire le comportement mécanique de bois contrefilé, nous avons réalisé des essais à différentes échelles. Et selon les disponibilités du matériel végétal de l'atelier de Pariacabo et en scierie, nous avons sélectionné 3 espèces, l'Alimiao (*Pseudopitadenia suaveolens*), le Satiné Rubané (*Brosimum rubesens*) et la Bagasse (*Bagassa guianensis*).

Remarque : Nous n'avons pas utilisé de Goupi (hormis pour les éprouvettes d'AMF) en raison de la variabilité de son contrefil sur la hauteur, ni de Gonfolo Gris pour son oscillation double sur R (cf. Tableau 1 dans la partie précédente).

3.1- Matériel et méthode :

Nous nous sommes intéressés au comportement en flexion des trois essences étudiées. Flexion statique avec un banc d'essai de flexion 4 points, flexion dynamique avec des essais vibratoires (libres et forcés). Et pour finir nous avons analysé les variations de l'AMF avec l'angle du fil, d'après des mesures réalisées par diffraction des rayons X.

Pour les mesures de masse nous avons utilisé deux types de balances. Pour les masses supérieures à 220 g nous avons utilisé une balance classique avec une précision de $\pm 0,1$ g. Et pour les masses inférieures, une balance interfacée avec une précision de $\pm 0,1$ mg. Les pesées ont été réalisées plusieurs fois dans le temps à partir de la fin de l'usinage, afin d'avoir un suivi sur les variations d'humidités des éprouvettes. En parallèle nous avons étuvé à 120°C pendant 48 h des échantillons provenant des mêmes débits, afin de connaître le taux d'humidité de nos éprouvettes.

Pour les mesures de dimensions inférieures à 200 mm nous avons utilisé un pied à coulisse interfacé avec une précision de $\pm 0,05$ mm. Pour les autres mesures nous avons simplement utilisé un réglet où l'on peut estimer la précision à $\pm 0,2$ mm. Pour toutes les mesures de largeurs et d'épaisseurs nous avons fait une moyenne en trois points différents.

La densité a été déterminée à partir des mesures de masses et de dimensions. C'est en fait la masse volumique de nos éprouvettes, ramenée à la masse volumique de l'eau en g/cm^3 mais que l'on considère souvent sans unité.

a) Flexion 4 points ou flexion circulaire :

Afin d'obtenir des informations sur le module d'élasticité longitudinal sur une section comprenant au moins une oscillation complète, nous avons réalisé des essais de flexion circulaire.

Le montage a été mis en place de façon à respecter la norme NF en 408 des essais mécaniques sur le bois et structure en lamellé collé. La dimension des barreaux a été fixée à [50, 25, 1000] mm sur [R, T, L], respectant ainsi la longueur minimale de 19 fois la hauteur de la section.

L'éprouvette est chargée symétriquement en flexion en 4 points, 2 sur une portée de 18 fois la hauteur (soit 900 mm) pour le bas, et les 2 autres, centrée à 6 fois la hauteur pour le haut (soit 300 mm), comme indiqué sur la Figure 7.

Les liaisons sont des linéaires annulaires, et l'axe de chargement est pourvu d'une liaison rotule pour que le montage ne soit pas hyperstatique. Le déplacement est imposé sur la traverse du haut à 0,08 mm/s, respectant ainsi la vitesse maximale de 0,003 mm/s fois la hauteur. L'arrêt se fait en effort à 1000 N, pour ne pas provoquer l'endommagement de l'éprouvette (au maximum $0,4 * F_{\text{max}}$). La flèche est mesurée à l'aide de trois comparateurs interfacés placés sous le barreau comme indiqué sur la Figure 7, avec une précision de $\pm 0,03$ mm.

III-ANALYSE MECANIQUE

Le module d'Elasticité longitudinal est ensuite calculé à l'aide de la formule :

$$E_L = \frac{l_1^3}{16.I} \text{ pente}$$

Avec :

l_1 la longueur entre les appuis en mm

I : le moment quadratique, qui est dans le cas d'une section rectangulaire : $I = \frac{b.h^3}{12}$ en mm^4 , b

et h étant respectivement la largeur et la hauteur de la section

pente : calculée à partir de la courbe effort-allongement, avec l'allongement déduit à partir des 3 comparateurs (cf. Figure 7).

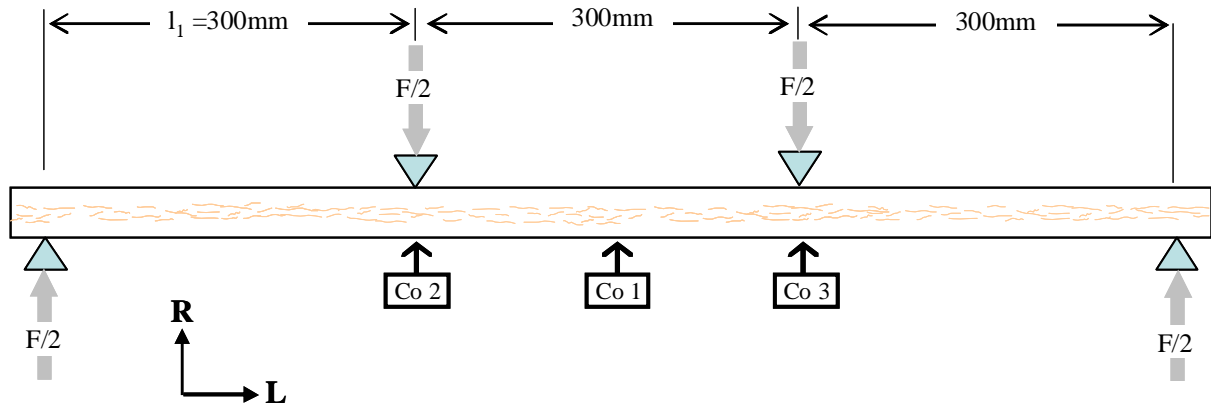


Figure 7 : Montage de flexion 4 points

Les Comparateurs Co2 et Co3 sont en regard de la charge. Le comparateur Co1 est placé au milieu. La flèche w est la différence entre Co1 et la moyenne de Co2 et Co3, en mm.

b) Vibrations libres sur poutres flottantes : la méthode « Bing » :

Cette méthode a été développée par Bordonné en 1989, souvent utilisé au CIRAD, elle permet de déterminer le module d'élasticité longitudinal en routine sur des barreaux de bois de forme et d'élancement fixés. Elle apporte aussi une approximation des modules de cisaillement G_{LT} et G_{LR} . Elle consiste à réaliser un choc vertical unique sur une poutre placée sur des supports élastiques aux nœuds de vibrations. On enregistre alors le son de la vibration de flexion à l'opposé de l'impulsion. Amplifié, filtré, et échantillonné, le signal est enregistré sur un ordinateur. A l'aide d'un logiciel d'acquisition, on détermine les fréquences propres, et le programme avec celles-ci et les mesures de masse et de dimensions, calcule E_L , et selon l'orientation de la poutre, G_{LT} et G_{LR} .

Les résultats sont calculés à partir de deux modèles théoriques, le modèle de Timoshenko et le modèle de Bernoulli.

Timoshenko prend en compte l'inertie de rotation ainsi que l'énergie de cisaillement pour calculer le module spécifique pour une fréquence propre k , qui est donné par la formule :

$$\left(\frac{E}{\rho} \right)_k = \frac{4\pi^2 f_k^2 l^2}{\alpha X_k} \left(1 + \alpha F_{1k}(m_k) + \alpha \frac{E}{KG} F_{2k}(m_k) \right)$$

Avec :

$\alpha = \frac{I}{Al^2}$, A étant l'aire de la section, l la longueur de l'éprouvette et I le moment quadratique

G : Module de cisaillement

m_k : $k^{\text{ième}}$ solution de $\cos(m)ch(m)=1$

$X_k = m_k^4$

$F_{1k} = \Theta^2(m_k) + 6\Theta(m_k)$ et $F_{2k} = \Theta^2(m_k) - 2\Theta(m_k)$, avec $\Theta(m_k) = m_k \frac{tg(m_k)th(m_k)}{tg(m_k) - th(m_k)}$

Le module spécifique est ensuite calculé par régression linéaire.

Le modèle de Bernoulli, plus simple, considère l'énergie de déformation due au cisaillement négligeable devant celle de la flexion. Pour chaque fréquence, le module spécifique est calculé par la formule :

$$\left(\frac{E}{\rho}\right)_k = \frac{4\pi^2 f_k^2 l^2}{\alpha X_k}$$

Avec :

$X_k = m_k^4$, et $m_1 = 4,73$; $m_2 = 7,8532$; $m_3 = 10,9956$

Remarque : D'après Brancheriau (2002), cité par Brémaud [8], pour les mesures de module, l'incertitude relative réalisée sur E, est estimée à 4%.

Nous avons réalisé pour chaque barreau la moyenne sur 3 mesures.

c) Vibrations forcées sans contact sur des poutres libres élancées :

Le montage tel que nous l'avons utilisé, a été réalisé et mit au point par Brémaud (2006) [8] en collaboration avec Y. El Kaim, au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier.

L'éprouvette à tester est suspendue par des fils de soie au niveau des nœuds de vibrations du mode 1 (soit 0,2242*longueur de l'éprouvette des deux côtés). Au préalable une fine pastille d'acier (du clinquant de 0.05 mm de 2 à 3 mm de large) est collée avec de la colle cyanoacrylate sur le dessous de l'éprouvette à une extrémité. Celui-ci est en regard d'un électroaimant sur lequel on réalise un balayage en fréquence. L'amplitude des vibrations est mesurée par un capteur de déplacement sans contact, placé au milieu de l'éprouvette pour le mode 1 (cf. Figure 8).

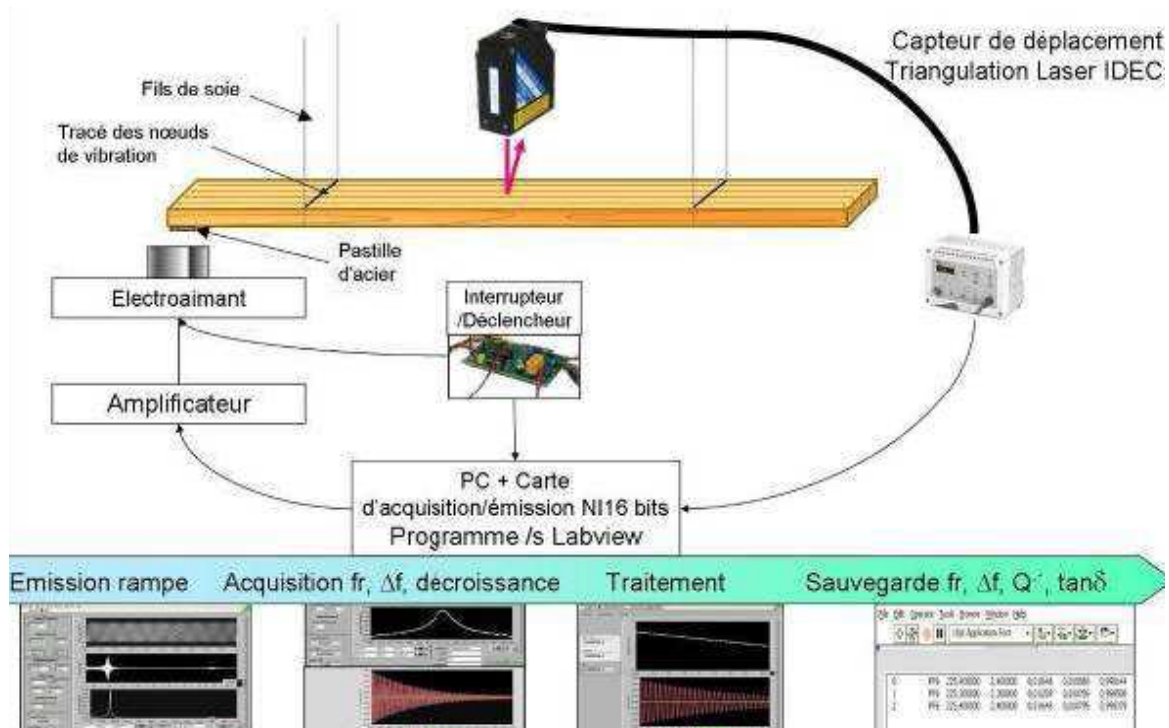


Figure 8 : Principe du dispositif expérimental de vibration forcée sans contact (extrait de la thèse de Brémaud (2006) [8])

Après acquisition sur un ordinateur et traitement sous le logiciel LabView, le module d'élasticité dynamique spécifique est calculé à partir du modèle de Bernoulli, avec la formule présentée plus haut, et que l'on peut écrire sous la forme :

$$\left(\frac{E}{\rho}\right) = \frac{(4\pi\sqrt{3})^2 f_k^2 l^4}{m^4 h^2} 10^3$$

Avec :

m : constante dépendant du mode de vibration (n), dans notre cas, $n=1$ et $m=4,730$

f_0 : Fréquence de résonance (Hz)

l et h : respectivement la longueur de l'échantillon et son épaisseur (m)

Le facteur d'amortissement $\tan \delta$ est déterminé par décrément logarithmique de l'amplitude des vibrations une fois l'excitation arrêtée. Mais, dans le cadre de ce projet nous nous sommes simplement intéressé aux modules d'élasticités longitudinaux, les résultats d'amortissement ne seront donc pas exploités ici.

Comme pour la méthode «bing», les résultats sont moyennés sur trois mesures par éprouvettes.

d) Diffraction par rayons X :

La diffraction par rayons X (DRX) correspond à un phénomène d'interférence coopérative des photons ayant interagis avec les électrons fortement lié aux atomes d'un matériau. La DRX est utilisé comme une technique standard de cristallographie, et permet d'estimer l'angle que font les microfibrilles avec l'axe de la cellule (AMF).

Le faisceau de rayon X est perpendiculaire à la surface de l'échantillon, et en fonction de l'épaisseur de l'échantillon « bombardé » de rayon X, plusieurs centaines de cellules contribuent à la diffraction.

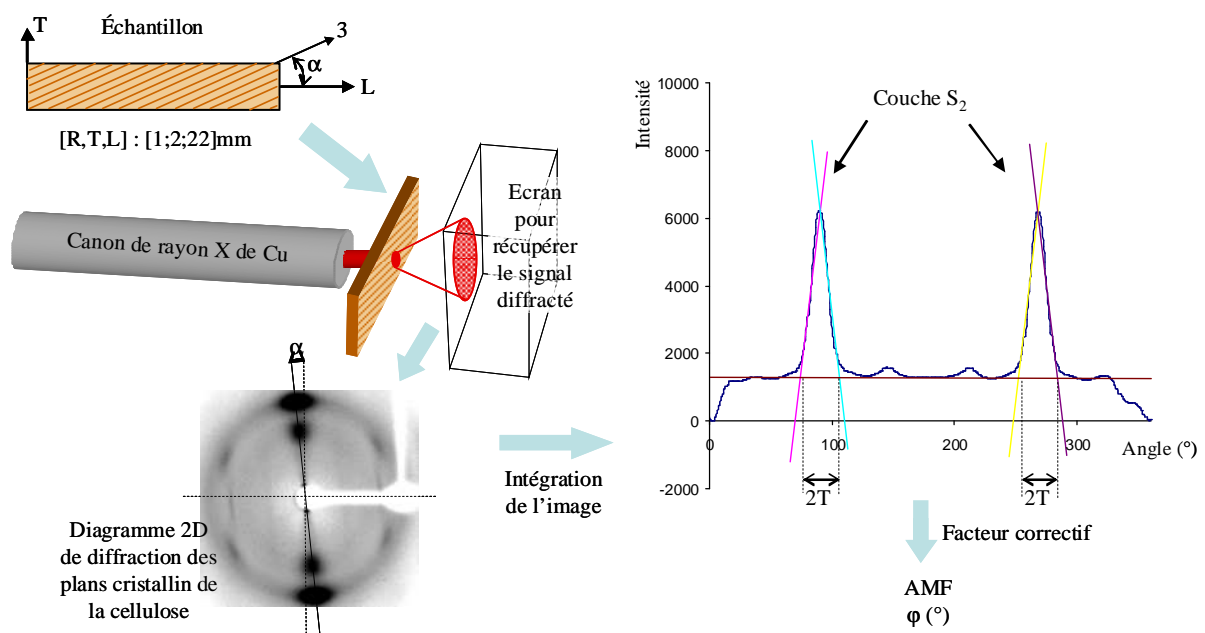


Figure 9 : Principe simplifié de la Diffraction par Rayon X, méthode SAXS (diffraction aux petits angles)

Les mesures des AMF deviennent à présent plus « faciles » par cette méthode. Ruelle (2006) [9] a dans sa thèse, fait des comparatifs entre différentes mesures d'AMF, permettant ainsi d'étalonner la mesure par DRX.

Deux techniques de diffraction sont couramment utilisées pour estimer l'AMF : elles se nomment : diffraction aux grands angles (WAXS – Wide Angle X-ray Scattering) et

diffraction aux petits angles (SAXS – Small Angle X-ray Scattering). Nous avons utilisé la méthode SAXS, présentée dans la Figure 9.

3.2-Présentation des débits :

La difficulté a été de trouver des planches ou des poutres présentant une orientation initiale suffisamment bonne pour faire tous les usinages, et un contrefil avec une amplitude et une période suffisamment élevées. Ainsi sur les 3 espèces étudiées tous les usinages n'ont pu être réalisés, excepté pour la Bagasse.

Tous les débits ont été réalisés à l'atelier de menuiserie de Pariacabo, à l'aide d'une dégauchisseuse, d'une raboteuse, d'une scie à format, et pour les éprouvettes de vibration forcée et de diffraction X, à l'aide d'une raboteuse et d'une scie circulaire de marqueterie.

La Figure 10 résume le protocole d'usinage qui a été mis en place.

Pour les essais de flexion, et les deux essais de vibration, chaque éprouvette a été numérotée et empilée sur des tasseaux par série, afin de les stabiliser plus rapidement dans une pièce régulée en température. Nous avons fait le choix de ne pas les sécher dans une étuve (48h à 60°C et 20°C&65%HR pendant 3 semaines, d'après le protocole de Brémaud [8]), mais de les laisser se stabiliser en contrôlant le taux d'humidité avec des témoins pour connaître notre humidité lors des mesures. L'humidité exacte de nos éprouvettes n'étant pas primordiale, puisque nous cherchons à faire une comparaison et non une base de données.

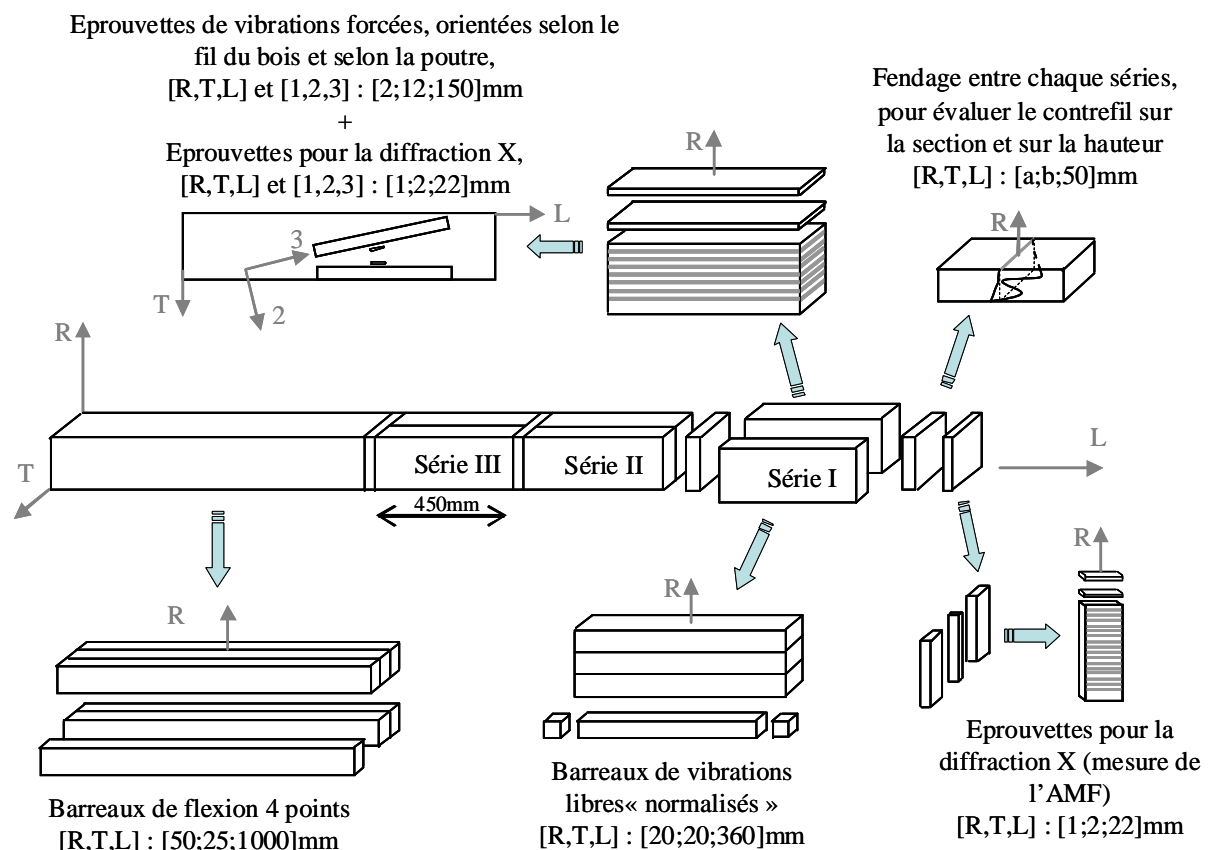


Figure 10 : Présentation des débits sur une poutre orientée

a) Barreaux de Flexion 4 points :

Les barreaux de flexion 4 points n'ont été réalisés que sur la poutre de Bagasse.

L'orientation a été estimée à « l'œil » lors des usinages avec la dégauchisseuse. Sur chaque barreau, une fois les essais réalisés, nous avons coupé deux pavés des deux cotés pour estimer le contrefil sur la section par fendage. L'IF et l'ADM ont été mesurés suivant le même protocole expliqué plus haut. Puis, toujours à l'aide du logiciel ImageJ, les angles ont été mesurés pour réaliser une discrétisation sur la section (présenté dans la dernière partie du rapport). Au total, 6 barreaux de [50 ;25 ;1000] mm sur [R,T,L] ont été réalisés.

b) Barreaux de « Bing » :

Comme pour les essais de flexion 4 points, les Barreaux de « Bing » ont seulement pu être prélevés sur la Bagasse. Nous en avons débité 4 par série, et noté leur emplacement sur la section. Pour la plupart il a fallu faire des réorientations afin de bien être dans le repère de la poutre/planche [R,T,L].

De la même manière que pour les barreaux de flexion, nous avons prélevé des cubes de chaque côté pour estimer et mesurer le contrefil dans les éprouvettes. Mais compte tenu de la faible section (20 mm sur R et T), n'ayant pas une période ou une demi-période de contrefil, nous n'avons pu mesurer l'ADM.

c) Eprouvettes de vibrations forcées :

Pour l'usinage des éprouvettes de vibration forcée, il a fallu réaliser des montages afin d'avoir une précision et une qualité d'usinage souhaitable (cf. Figure 11). D'après Brémaud (2006) [8], la précision des lamelles usinées a une grande importance, mais surtout l'homogénéité de l'épaisseur. Brémaud réalisait ses éprouvettes dans le plan RL à l'aide seulement d'une scie circulaire, prenant ainsi en compte un article de Sali & Kopac (1998) où ils montrent que le rabotage et le ponçage ont un effet négatif sur les mesures de vibrations.

Les éprouvettes que nous avons réalisées sont dans le plan TL, de façon à avoir une inclinaison du fil régulière sur la section. Nous avons, comme il est montré dans la Figure 10, réalisé dans un premier temps des planchettes à l'aide d'une scie à format, suffisamment large pour débiter nos éprouvettes d'amortissement (orientée et non-orientée). Compte tenu de la difficulté du débit, ces planchettes n'étaient pas suffisamment homogènes sur l'épaisseur. Nous avons donc fait le choix de faire un passage de chaque planchette dans une raboteuse de marqueterie, privilégiant ainsi le parallélisme à l'état de surface (petites ondes laissées par les fers).

Sur chaque planchette, nous avons réalisé une mesure de l'angle par traçage de la direction moyenne des fibres. Puis par mesure à l'aide d'un réglet, nous avons estimé l'angle à partir du cosinus. Une fois l'angle mesuré sur les 2 faces des planchettes, nous avons usiné les éprouvettes à l'aide des montages présentés dans la Figure 11. Une orientée dans la direction du fil, et l'autre selon l'axe de notre poutre/planche (que l'on peut supposer comme étant proche de l'orientation de l'arbre).

III-ANALYSE MECANIQUE

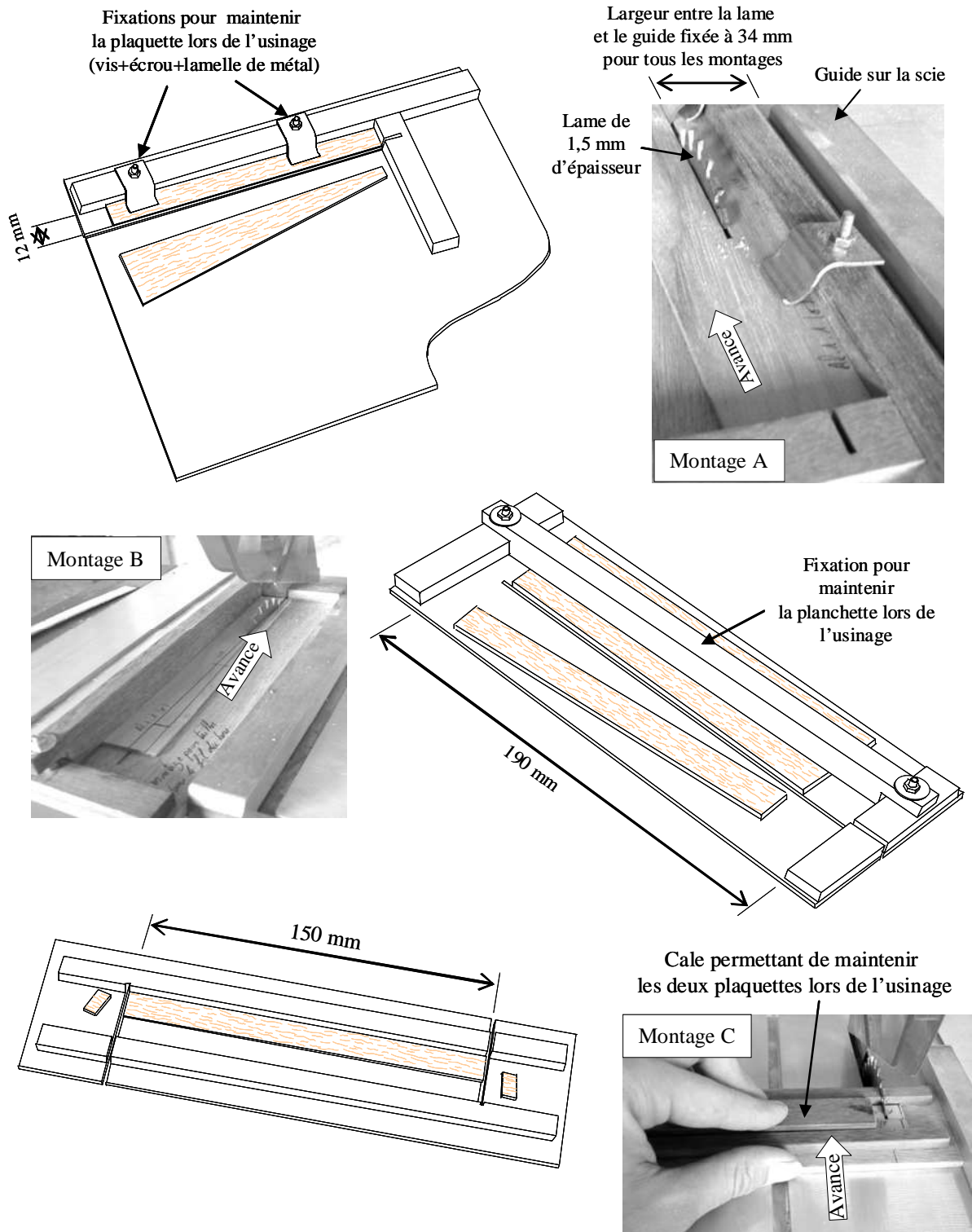


Figure 11 : Montages réalisés pour l'usinage des éprouvettes de vibrations forcés sans contact.

Montage A : Découpe de l'éprouvette à 12mm

Montage B : Orientation d'un coté selon le fil du bois

Montage C : Découpe par deux des éprouvettes à 150mm

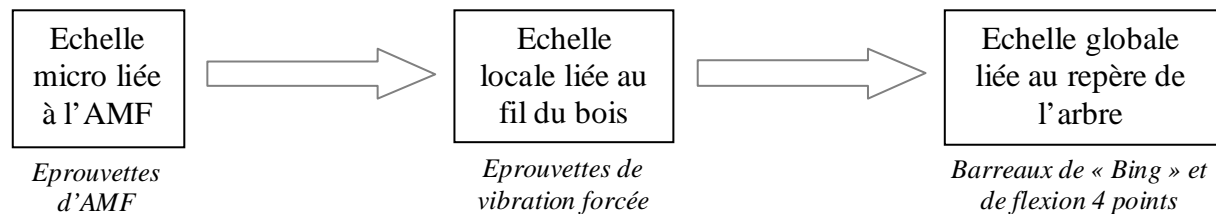
d) Eprouvettes de DRX :

Tous les échantillons pour la DRX ont été réalisés sur la scie circulaire de marqueterie sans montages. Nous avons usiné 171 éprouvettes de Goupi, 114 de Bagasse, 35 d'Alimiao, 17 de Satiné Rubané, et 36 de Gonfolo Gris. Comme pour les éprouvettes de vibration forcée, la face la plus large est sur le plan TL et l'épaisseur sur RL. Nous avons débité le maximum d'éprouvettes sur la section, comme indique sur la Figure 10, la lame de la scie utilisée étant de 1,5 mm d'épaisseur. Les éprouvettes de Goupi ont été prélevées sur une rondelle provenant d'une branche (cf. ANNEXE 2).

Sur la série I et III des éprouvettes de vibrations forcées, nous avons découpé 2 éprouvettes par plaquette, une orientée selon la poutre et l'autre selon le fil. Nous avons fait en sorte d'être au plus proche des échantillons de vibration, afin de pouvoir étalonner la mesure de l'angle du grain par DRX, avec la mesure de l'angle par traçage sur les planchettes initiales, mais aussi pour connaître l'AMF de nos éprouvettes vibrations forcée.

3.3- Résultats et discussions :

Les résultats que nous présentons dans cette partie concernent l'ensemble des échantillons testés. Nous avons cherché à mettre en évidence le changement d'échelle et les propriétés mécaniques et physiques des trois essences contrefilées testées.



Sur tous les résultats présentés, nous avons appelé le repère lié à l'arbre, le repère global [R,T,L], et le repère lié à la fibre, le repère local [1,2,3].

a) Echelle microscopique : Variation de l'Angle des Microfibrilles :

Les essais de DRX ont été réalisés à l'Institut Européen des Membranes (IEM) de Montpellier, avec l'aide de Bruno Clair (chargé de recherche au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier) et Ari Van Der Lee (Ingénieur à IEM). La quasi-totalité des éprouvettes ont été testées et les résultats sont présentés en ANNEXE 2.

La détermination des AMF a été faite à partir d'un modèle linéaire proposé par Cave [12] (1968). Ruelle [9] (2006) dans sa thèse, montre que le lien entre le paramètre de Cave et l'AMF dépend fortement de l'espèce considérée, ce qui implique alors des recalages afin de déterminer des valeurs d'AMF réelles. Ici, nous regardons juste les variations d'AMF. Ainsi, les valeurs données ne sont pas forcément les valeurs réelles présentes dans nos échantillons.

La première constatation est la très faible variation de l'AMF sur des échantillons d'une même série, avec une moyenne de 2° sur la variation de toutes les mesures. Sur la Figure 12, basée sur le modèle de

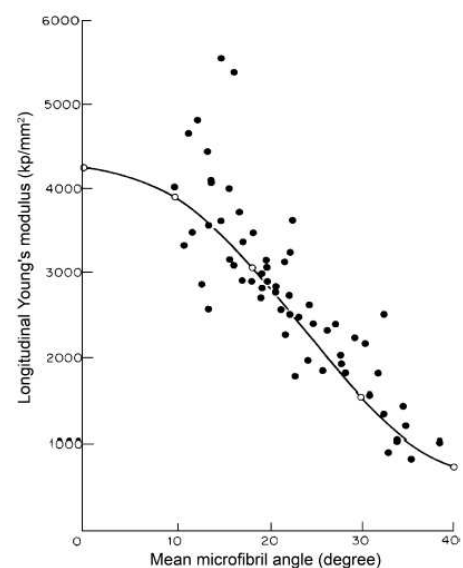


Figure 12 : Mesures (●) et prédiction (-) l'AMF moyen avec le module d'Young longitudinal, d'après Cave [12] (1968), cité par Ping Xu [13] (2004)

Cave et cité par Ping Xu [13] (2004), on peut voir l'évolution de l'AMF moyen en fonction du Module d'Elasticité Longitudinal. Expérimentalement on note une importante dispersion des valeurs de E_L pour des angles d'AMF autour de 10-15°, mais qui dépend fortement de l'espèce considérée (ici du *Pinus Radiata*). Lors de nos essais on trouve (avec le modèle de Cave, sans recalage), une moyenne de 11,2° pour l'AMF du Goupi, 10,2° pour la Bagasse, 10,6° pour le Satiné Rubané, et 10,3° pour l'Alimiao. En regard du modèle de Cave présenté sur la Figure 12, on constate une faible variation du module. Nous pourrions alors le vérifier avec les mesures d'AMF réalisées sur les séries I et III de la Bagasse, où grâce aux essais de vibrations forcées on connaît le Module d'Elasticité Longitudinal réorienté selon le fil du bois (cf. partie suivante).

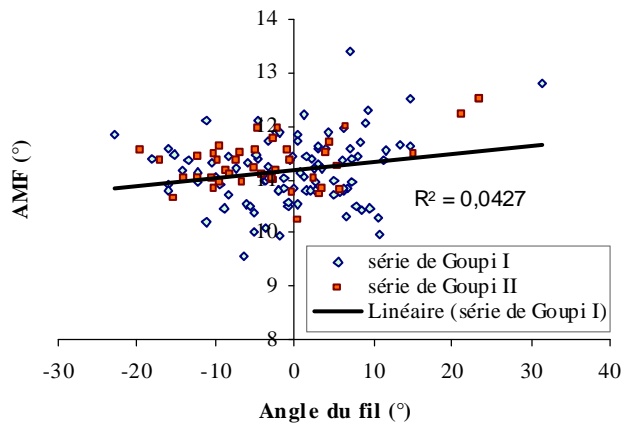


Figure 13 : Lien entre l'angle du fil et l'Angle des Microfibrilles, sur les échantillons de Goupi

Série de Goupi I: 97 échantillons prélevés sur toute une section en passant par la moelle
Série de Goupi II: 43 échantillons prélevés sur une seule partie de la section

La deuxième analyse que l'on peut faire sur les résultats est la faible relation entre l'angle du fil et l'AMF, avec une signification au seuil de 5%. Sur la Figure 13, on peut voir que la dispersion des points est importante, avec un R^2 égal à 0,04 sur les 97 échantillons de la série de Goupi I testée.

Dans sa thèse, Baettig (2005) [14], explique que parfois l'inclinaison des AMF est confondue avec la pente du fil du bois (sur les arbres présentant du fil tors), les deux phénomènes produisant des conséquences similaires. Lorsque l'on confronte l'angle du fil et l'AMF en fonction du n° de l'échantillon, on

peut parfois noter quelques similitudes, notamment sur les échantillons de Bagasse prélevés sur toute la section (cf. Figure 14). Cependant, compte tenu la très faible variation de l'AMF, il est très difficile de bien relier les deux paramètres.

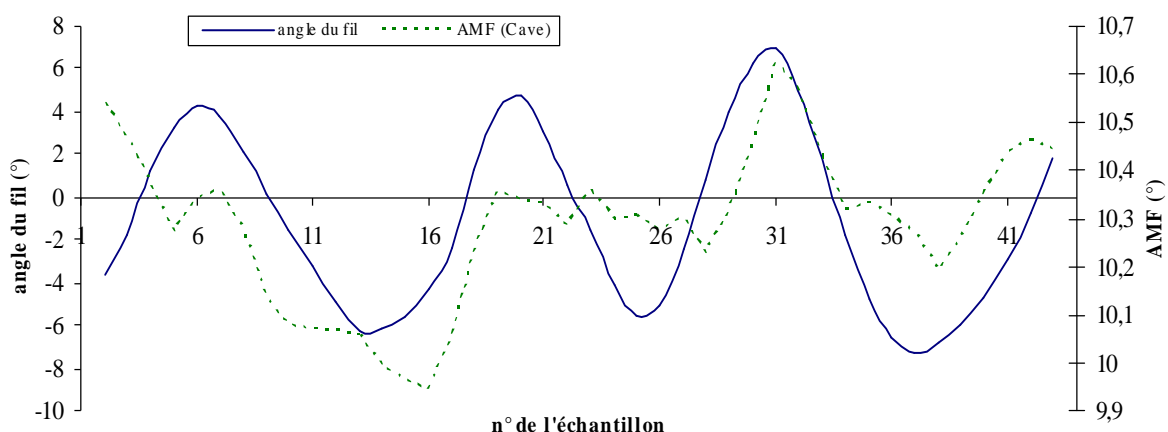


Figure 14 : Lien entre le n° de l'échantillon, et les moyennes par 3 de l'angle du fil (°) et de l'AMF (°).
Échantillons de Bagasse prélevés sur toute la section de la poutre (cf. Figure 10 en bas à gauche)

b) Echelle locale : Eprouvettes de vibration forcée

Pour les épreuves de vibration forcée, compte tenu de la faible variation de l'angle d'une face à l'autre (variation inférieure à 1% sur 102 épreuves), nous faisons l'hypothèse d'une homogénéité dans l'épaisseur.

Les relations entre les différentes propriétés mesurées sont analysées, dans un premier temps au niveau de chaque épreuve, puis entre les épreuves orientées selon [R,T,L] et [1,2,3]. 134 épreuves ont été testées, séries, orientations, et espèces confondues.

Lors des mesures de masse et dimension nous avons noté des commentaires sur les épreuves, comme le gauchissement, les flèches sur rive ou sur dosse, ou encore des « peluches » apparues à l'usinage (souvent la conséquence de bois de tension).

Sur la série de Bagasse III, nous pouvons faire la comparaison entre les angles mesurés par traçage et par DRX (cf. Figure 15). On confirme ainsi la détermination de l'angle sur nos mesures, où on peut estimer l'incertitude des 2 méthodes à $\pm 2^\circ$.

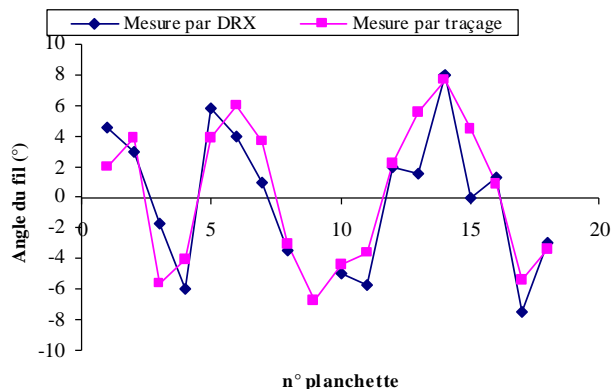


Figure 15 : Comparaison entre la mesure par traçage sur les planchettes usinées, et la mesure par la DRX (série de Bagasse III)

Le mécanisme permettant la réorientation du fil dans l'arbre ne semble pas avoir une influence sur la densité. En effet, sur la Figure 17, on peut voir que la relation entre l'angle du fil et la densité pour les échantillons de Bagasse est théoriquement significative au seuil de 5% ($R^2=0,11$), mais compte tenu de la faible variation de densité, on ne peut pas parler d'une corrélation significative entre les deux paramètres.

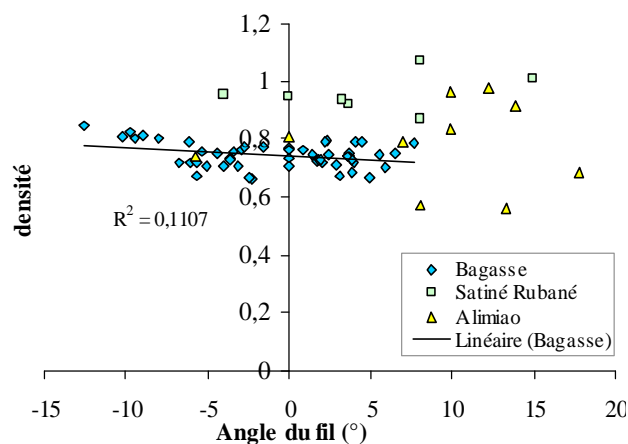


Figure 17 : Relation de l'angle du fil (°) et de la densité des épreuves

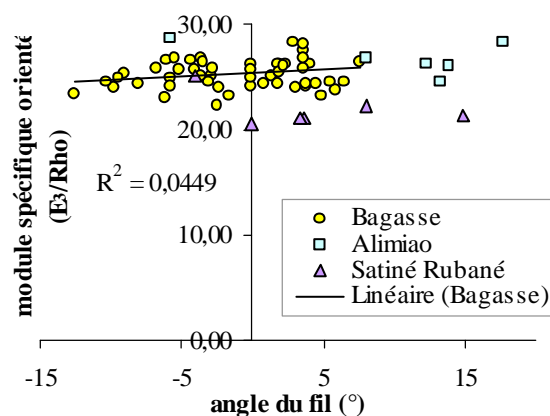


Figure 17 : Relation angle du fil et module spécifique orienté selon l'axe longitudinal de la poutre (E_L/ρ).

Comme sur la Figure 17, on ne trouve pas de relation significative entre l'angle du fil et le module spécifique de nos échantillons de Bagasse orientés selon l'axe du fil (cf. Figure 17 avec un $R^2=0,04$). On confirme ainsi les résultats obtenus par DRX qui n'indiquaient pas de liens importants entre l'AMF et l'angle du fil.

En utilisant une formule classique de changement de repère sur un matériau orthotrope, par rotation autour de l'axe R ou I d'un angle α , on trouve un module d'élasticité longitudinal de :

$$E_L = \frac{1}{S_{LL}}$$

Avec :

$$S_{LL} = S_{33} \cos^4(\alpha) + (2S_{23} + S_{44}) \cos^2(\alpha) \sin^2(\alpha) + S_{22} \sin^4(\alpha)$$

Où S_{22} , S_{33} , S_{23} , et S_{44} sont des coefficients de la matrice de souplesse dans le repère lié à la fibre. Etant donné que les expérimentations réalisées ne nous fournissent que le module longitudinal selon le fil du bois (et les modules de cisaillement G_{TL} et G_{RL} pour les barreaux de Bing), nous avons utilisé le modèle empirique de Guitard pour la détermination des coefficients manquant. Le modèle est détaillé en ANNEXE 4.

La Figure 18 montre l'évolution théorique du module spécifique en fonction de l'angle du fil. On remarque que le module spécifique chute rapidement même pour des angles inférieurs à 15° , ce qui explique les résultats présentés dans la Figure 19 A.

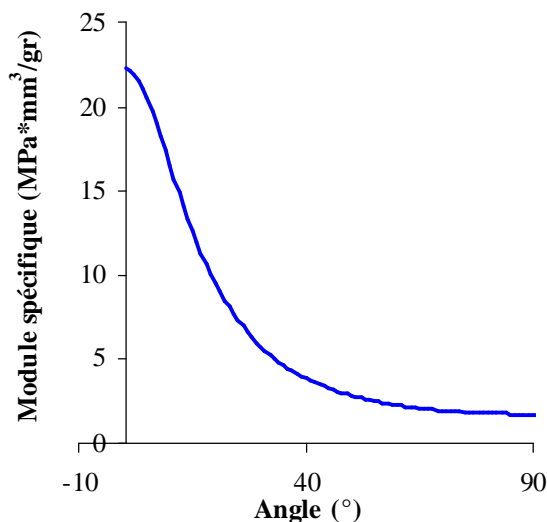


Figure 18 : Courbe théorique du module spécifique E_{LL}/ρ avec l'angle α

E_{LL}/ρ calculé avec le modèle de Guitard pour un feuillu standard ($\rho=0.66 \text{ gr/cm}^3$)

On constate par ailleurs, que le modèle de Guitard (en trait continu sur la Figure 19 A), prédit un module inférieur aux résultats expérimentaux si

l'on ne prend en compte que la densité moyenne des échantillons. Ainsi, pour approcher la solution réelle, nous avons utilisé les résultats de vibrations forcées des éprouvettes orientées selon le fil, en injectant directement les valeurs de E_3 dans le modèle de Guitard. La Figure 19 B montre que les résultats obtenus avec la réorientation et l'optimisation du modèle de Guitard. La relation entre les deux paramètres, significative au seuil de 0,1% permet de valider la méthode ($R^2=0,6$ avec une régression linéaire forcée à l'origine sur les échantillons de Bagasse).

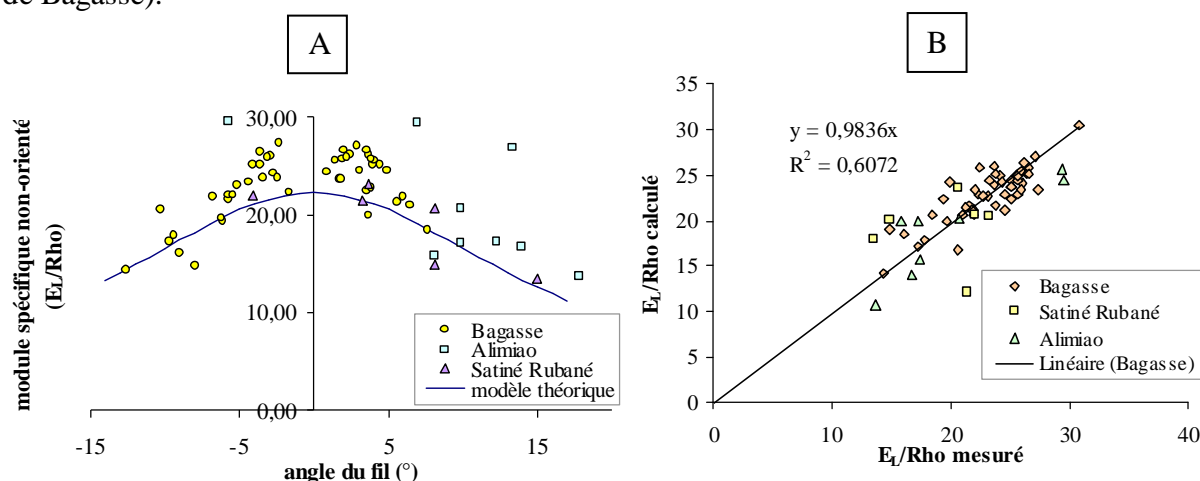


Figure 19 : Corrélation entre angle du fil et module spécifique

A – Orientation selon le fil [1,2,3]

B – Orientation selon l'arbre (poutre) [R,T,L]

c) Repère global : Discrétisation sur les barreaux de flexion 4 points

Compte tenu des résultats de DRX et de vibrations forcées, nous avons réalisé un modèle permettant de passer de l'échelle locale à globale, en réalisant une discrétisation sur nos barreaux de flexion 4 points. Ainsi, nous avons mesuré la répartition du contrefil moyennée à partir de fendages réalisés aux extrémités des barreaux, puis par discrétisation nous avons calculé le module d'élasticité global en flexion.

Comme le profil du contrefil n'est pas symétrique, on doit dans un premier temps chercher la position de la fibre neutre z_0 (cf. Figure 20).

D'après la théorie des matériaux composites stratifiés, le déplacement global est donné par la relation linéaire entre la déformation de membrane et la déformation de courbure, selon la formule :

$$\varepsilon = \varepsilon_0(z_0) + (z - z_0)C$$

Les ADM (Angle de Déviation Maximum) pour la Bagasse, étant faibles pour chaque barreau ($11,6^\circ$ en moyenne), on peut supposer être proche du repère d'orthotropie, et utiliser la loi d'élasticité en petite déformation, qui nous donne :

$$\sigma = E_L \varepsilon$$

E_L étant le module global d'élasticité dans l'axe longitudinal (repère global).

Sachant que, les efforts N , et les moments M sont :

$$\begin{cases} N = \iint \sigma dS \\ M = \iint z \sigma dS \end{cases}$$

Soit :

$$\begin{cases} N = \varepsilon_0(z_0) \left[\iint E_L(z) dS \right] + C \left[\iint z E_L(z) dS - z_0 \iint E_L(z) dS \right] \\ M = \varepsilon_0(z_0) \left[\iint z E_L(z) dS - z_0 \iint E_L(z) dS \right] + C \left[\iint z^2 E_L(z) dS - z_0 \iint z E_L(z) dS - z_0 \iint z E_L(z) dS + z_0^2 \iint E_L(z) dS \right] \end{cases}$$

D'où le système à résoudre :

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \iint E_L dS & \iint z E_L dS - z_0 \iint E_L dS \\ \iint z E_L dS - z_0 \iint E_L dS & \iint z^2 E_L dS - 2z_0 \iint z E_L dS + z_0^2 \iint E_L dS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_0(z_0) \\ C \end{bmatrix}$$

Or on se trouve sur la fibre neutre lorsque les termes hors diagonaux sont nuls :

$$\iint z E_L dS - z_0 \iint E_L dS = 0$$

D'où la position de la fibre neutre :

$$z_0 = \frac{\iint z E_L dS}{\iint E_L dS}$$

On se place alors dans le repère de la fibre neutre z_0 :

$$M = \left[\underbrace{\iint z^2 E_L(z) dS}_{K_2} - 2z_0 \underbrace{\iint z E_L(z) dS}_{K_1} + z_0^2 \underbrace{\iint E_L(z) dS}_{K_0} \right] C$$

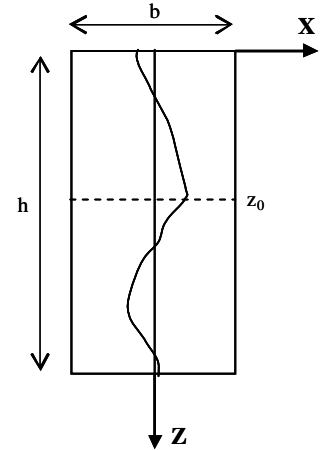


Figure 20 : Positionnement de la fibre neutre z_0

X et Z étant respectivement T et R dans le repère de la poutre

Et :

$$z_0 = \frac{K_1}{K_0}$$

D'où :

$$M = \left[K_2 - 2 \frac{K_1}{K_0} K_1 + \frac{K_1^2}{K_0^2} K_0 \right] C = \underbrace{\left[K_2 - \frac{K_1^2}{K_0} \right]}_K C$$

K est la rigidité de flexion, qui par définition est égale au produit du module d'élasticité avec le moment d'inertie calculé au centre d'inertie z_0 .

Remarque : On suppose ici qu'il n'y a pas de couplage entre les différentes courbures.

Soit :

$$E_L = \frac{K(z_0)}{I(z_0)}$$

Avec $I(z_0)$, le moment quadratique calculé à la fibre neutre :

$$I(z_0) = I(z_1) + \delta^2 S$$

z_1 étant le centre géométrique $\left(z_1 = \frac{h}{2} \right)$, δ l'écart entre z_1 et z_0 , et S la surface.

Pour une section rectangulaire, $I(z_1) = \frac{bh^3}{12}$

Remarque : On considère que le contrefil est constant sur l'axe X (T dans le repère de la poutre), d'où la symétrie en $b/2$.

Soit :

$$I(z_0) = \frac{bh^3}{12} + (z_0 - z_1)^2 bh$$

Ainsi, le module longitudinal en flexion est donné par :

$$E_L = \frac{K_2 - \frac{K_1^2}{K_0}}{\frac{bh^3}{12} + (z_0 - z_1)^2 bh}$$

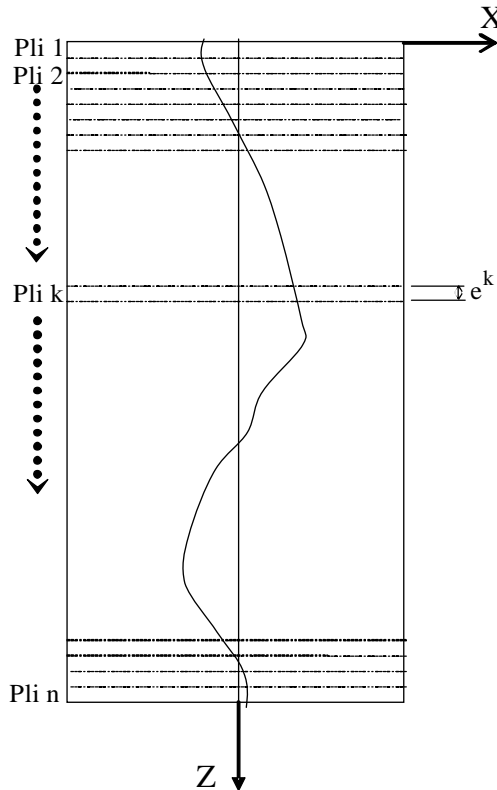


Figure 21 : Discretisation de la section des barreaux de flexion

Pour déterminer le module d'élasticité théorique de notre essai de flexion, en prenant en compte la répartition du contrefil dans la section, on fait une discrétisation (cf. Figure 21) sur l'axe Z .

Pour cela on utilise le logiciel ImageJ afin de déterminer l'abscisse x^k et l'ordonnée z^k du profil du contrefil sur chaque pli. k étant le numéro du pli considéré et x^k étant la moyenne dans le pli k .

On calcule ensuite l'angle du fil α^k de tous les plis, de la même manière qu'avec le calcul de l'ADM (avec la tangente de x^k sur la hauteur de l'échantillon fendu).

Remarque : Compte tenu de la variation du contrefil sur l'axe longitudinal, nous avons fait une moyenne du profil de part et d'autre du barreau.

De façon à déterminer le module d'élasticité longitudinal de chaque pli dans le repère du barreau de flexion (repère global), on utilise la moyenne des résultats obtenu avec les essais

de vibrations forcé des éprouvettes taillées dans le fil du bois. On trouve un E_3 moyen de 18870 MPa.

Comme expliqué précédemment, ce module nous permet d'optimiser le modèle de Guitard, et par rotation du repère de l'angle α^k , de calculer le module longitudinal dans le repère global. Ainsi on connaît E_L^k , e^k , et z^k sur toute la section (k étant le numéro du pli allant de 1 à n). Le module E_L^k n'étant plus dépendant de z , puisque l'on fait l'hypothèse que α^k est constant dans l'épaisseur du pli.

On peut alors calculer le module d'élasticité global discrétisé de nos barreaux de flexion, avec :

$$K_0 = \sum_{k=1}^n \iint E_L^k dS = \sum_{k=1}^n E_L^k \int_{-b/2}^{b/2} dx \int_{z^k}^{z^k+e^k} dz = b \sum_{k=1}^n E_L^k e^k$$

$$K_1 = \sum_{k=1}^n \iint z E_L(z) dS = \sum_{k=1}^n E_L^k \int_{-b/2}^{b/2} dx \int_{z^k}^{z^k+e^k} z dz = b \sum_{k=1}^n E_L^k \left[z^k e^k + \frac{e^{k2}}{2} \right]$$

$$K_2 = \sum_{k=1}^n \iint z^2 E_L(z) dS = \sum_{k=1}^n E_L^k \int_{-b/2}^{b/2} dx \int_{z^k}^{z^k+e^k} z^2 dz = b \sum_{k=1}^n E_L^k \left[z^k e^{k2} + z^k e^k + \frac{e^{k3}}{3} \right]$$

D'où la position de la fibre neutre discrétisée :

$$z_0 = \frac{\sum_{k=1}^n E_L^k \left[z^k e^k + \frac{e^{k2}}{2} \right]}{\sum_{k=1}^n E_L^k e^k}$$

De cette manière, on peut déterminer le module global E_L théorique après discrétisation sur chaque barreau de flexion.

Le Tableau 2 regroupe les résultats obtenus par mesure expérimentale de flexion 4 points ($E_L^{\text{mesuré}}$), par discrétisation à partir du profil de contrefil sur la section et l'optimisation du modèle de Guitard ($E_L^{\text{calculé}}$ avec E_3^{moyen}), et sans optimisation ($E_L^{\text{calculé}}$ avec E_3^{Guitard}).

Barreau considéré	$E_L^{\text{mesuré}}$ (MPa)	$E_L^{\text{calculé}}$ avec E_3^{moyen} (MPa)	$E_L^{\text{calculé}}$ avec E_3^{Guitard} (MPa)	nombre de plis	ligne neutre par rapport au haut (mm)
BI.1	17455	17864	16068	43	26,1
BI.2	18285	17087	15442	43	26,2
BI.3	18311	18103	15987	44	25,6
BI.4	17361	17490	14621	45	26,2
BI.5	17845	18930	15965	46	25,8
BI.6	17999	17867	15235	38	26,5

Tableau 2 : comparaison des modules E_L déterminé selon différentes méthodes

Ainsi, d'après le Tableau 2, on peut voir que le modèle tel qu'il a été mis au point s'approche bien plus de la solution expérimentale que le modèle de Guitard ne comprenant en compte que la densité du barreau.

Remarque : Les résultats de vibrations libres sur poutres flottantes (la méthode « Bing »), sont présentés en ANNEXE 3. La dimension des barreaux n'étant pas suffisante pour obtenir une oscillation complète du contrefil dans la section, et compte tenu du type d'essai (flexion dynamique), il n'est pas évident d'appliquer notre modèle sur les résultats.

IV- Conclusions et perspectives :

IV-CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Comme nous l'avons expliqué en Introduction, le trait caractéristique des forêts tropicales est sa grande biodiversité. C'est aussi une importante variabilité entre les espèces et en leur sein.

Après la phase de description de ce projet, il semble ressortir qu'il existe certaines classes de contrefil, que l'on pourrait caractériser selon leurs amplitudes, mais surtout selon leurs particularités, comme les oscillations « doubles ».

Ainsi, toujours dans un but descriptif, il faudrait prolonger l'étude réalisée sur la variabilité du contrefil à l'intérieur d'une poutre ou d'une planche, et faire une analyse complète sur un arbre. Réaliser aussi des comparaisons entre des arbres d'une même espèce, mais aillant poussés selon des conditions différentes (en forêt et isolé par exemple). Décrire de cette manière, d'avantage cette notion de variabilité sur la hauteur et de répartition sur la section, que nous avons remarqué lors de ce projet tout comme d'autres auteurs dans la littérature.

L'analyse mécanique réalisée a permis de mettre au point un modèle prédictif du comportement d'une poutre en flexion dont on connaît la répartition du contrefil sur la section, la densité, et le module d'élasticité longitudinal dans le fil du bois. Il serait important de faire des essais de rupture sur la même espèce, et ainsi faire le lien entre la perte de rigidité en flexion, l'augmentation de la ténacité, et la répartition du contrefil. Enfin de généraliser les essais de rupture sur différentes espèces avec différents types de contrefil.

Enfin, les nombreux essais réalisés pour mesurer l'angle des microfibrilles, nous ont apporté d'importantes données, qu'il serait intéressant d'analyser d'avantage. Notamment en utilisant un autre modèle pour la détermination de l'AMF avec le facteur correctif, comme par exemple avec le modèle proposé par Yamamoto (2002). Ces analyses complémentaires permettront de faire avancer l'hypothèse de Shulgasser (2006) sur les moteurs biologiques de la fibre torse, que nous avons décrit dans la première partie de ce rapport.

V- Références :

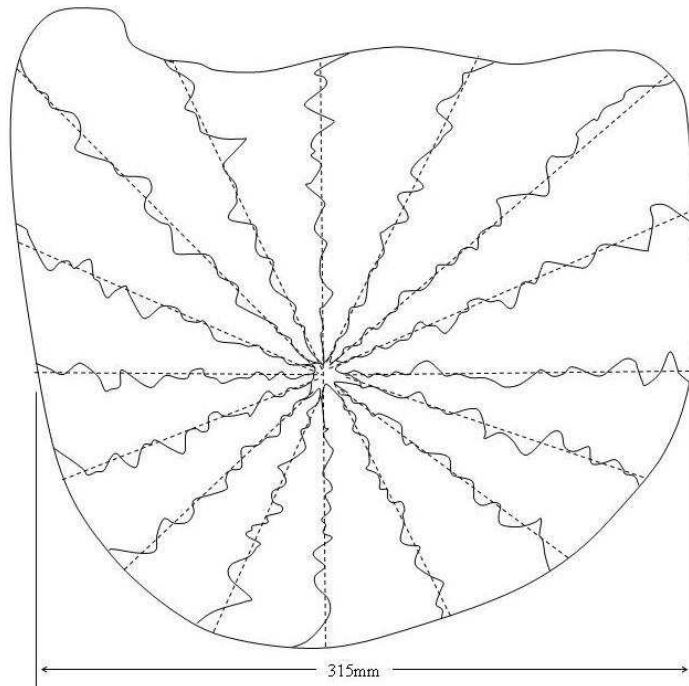
Articles et thèses cités dans le texte :

- [1]: **Détienne P.** (1979). Contrefil à rythme annuel dans les Faro, Daniellia sp. Pl. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, n°183
- [2]: **Hernandez, R.E. and G. Almeida.** (2003). Effects of wood density and interlocked grain on the shear strength of three Amazonian tropical hardwoods. *Wood and Fiber Sci.* 35(2): 154-166.
- [3]: **Kojs P. Wloch W. Rusin A.** (2004) Rearrangement of cells in storeyed cambium of Lonchocarpus sericeus (Poir.) DC connected with formation of interlocked grain in the xylem. *Trees* 18:136-144
- [4]: **Ogata Y. and Fujita M.** (2005). New anatomical method of grain angles measurement using confocal microscopy and image cross-correlation. *Trees* 19: 73-80
- [5]: **Thinley C., Palmer G., Vancley J.K., and Henson M.** (2005). Spiral and interlocked grain in Eucalyptus dunnii. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63: 372-379.
- [6]: **Webb C.D.** (1969). Variation of interlocked grain in Sweetgum. *Forest Products Journal* Vol. 19, No. 8.
- [7]: **Weddell, E.** (1961). Influence of interlocked grain on the bending strength of timber, with particular reference to utile and greenheart. *J. Inst. Wood Sci.* 7:56-72.
- [8]: **Brémaud I.** (2006). Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique. *Thèse, LMGC-CIRAD, Montpellier.*
- [9]: **Ruelle J.** (2006). Analyse de la diversité du bois de tension de 3 espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide de Guyane Française. *Thèse, UAG-UMR ECOFOG, Guyane Française.*
- [10]: **Schulgasser K. and Witzum A.** (2006). The mechanism of spiral grain formation in trees. *Wood Sci. Technol.* DOI 10.1007/s00226-006-0100-y.
- [11]: **Guitard D.** (1987) Mécanique du matériau bois et composites. *Cépaduès-Edition* 238 p. ISBN 2 8548 152 7.
- [12]: **Cave I.D.** (1997) Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood *Wood Sci. Technol.* 31 : 143-152.
- [13]: **Ping Xu and Huawu Liu** (2002) Models of Microfibril elastic modulus parallel to the cell axis. *Wood Sci Technol.* 38 : 363-374.
- [14]: **Baettig R.** (2005) Exploitation d'un rayonnement X polyénergétique pour la détermination de la teneur en eau et de l'angle des microfibrilles du bois : Approche théorique et expérimentale. *Thèse à l'ENGR des eaux et forêts, Nancy*

Articles non cités mais en rapport avec le contrefil :

- [15]: **Green D.W. and Rosales A.N.** (2006). Properties and grading of Danto and Ramon 2 by 4's. *Forest Products Journal.* Vol. 56. No. 4
- [16]: **Hejnowicz, Z. and Romberger J. A..** (1979). The common basis of wood grain figures is the systematically changing orientation of cambial fusiform cells. *Wood Sci. Technol.* 13: 89-96.
- [17]: **Hernandez, R.E.** (2007). Influence of accessory substances, wood density and interlocked grain on the compressive properties of hardwoods. *Wood Sci. Technol.* 41:249-265.
- [18]: **Hernandez, R.E.** (2006b). Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density and interlocked grain. *Wood Fiber Sci (in press)*
- [19]: **Ogata Y., Fujita M., Nobuchi T. & Sahri M.H.** (2003). Macroscopic and anatomical investigation of interlocked grain in Accia Mangium. *IWA Journal*, Vol. 24 (1),:13-26.

ANNEXE 1



Section d'une grosse de branche de Goupi :

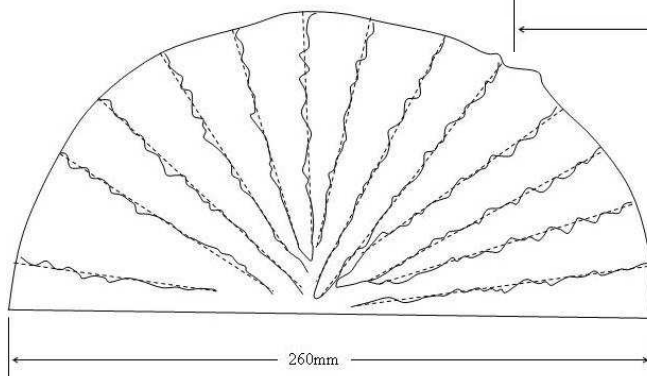
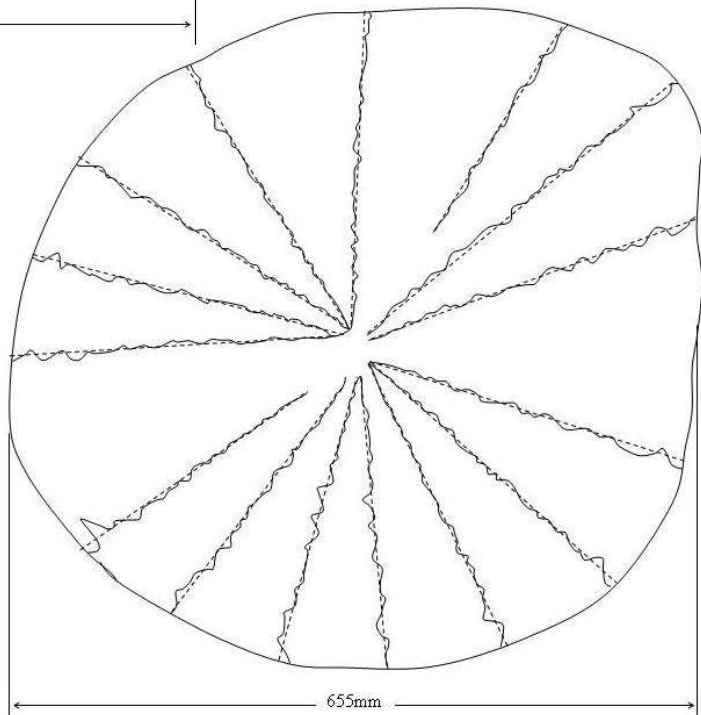
On observe des oscillations sur toute la section.

L'amplitude, la période et la distribution du contrefil, ne semble pas être régulière sur la section. Le contrefil étant parfois « double » sur le Goupi, il est possible que les angles importants en soient la conséquence

Section d'un Goupi à environ 4m de haut :

Le contrefil est ici d'amplitude moyenne bien plus faible que sur la section prélevée sur une grosse branche.

On observe encore ici des amplitudes locales très importantes.



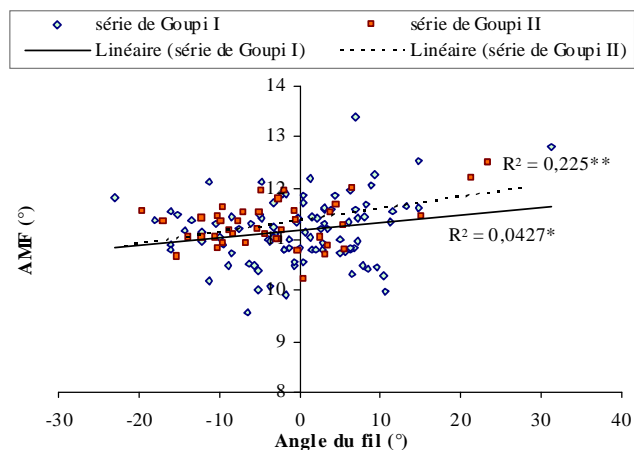
Demi-section du haut d'un Satiné Rubané (proche des branches) :

L'amplitude du contrefil est faible et la période courte, contrairement aux autres échantillons de Satiné Rubané testés.

ANNEXE 2

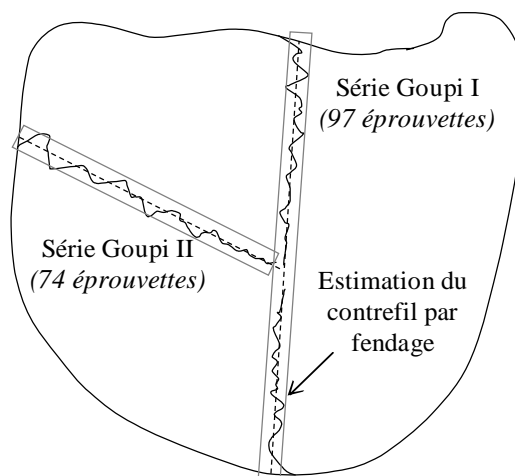
Présentation des résultats de Diffraction par Rayon X :

• Résultats des éprouvettes de Goupi :

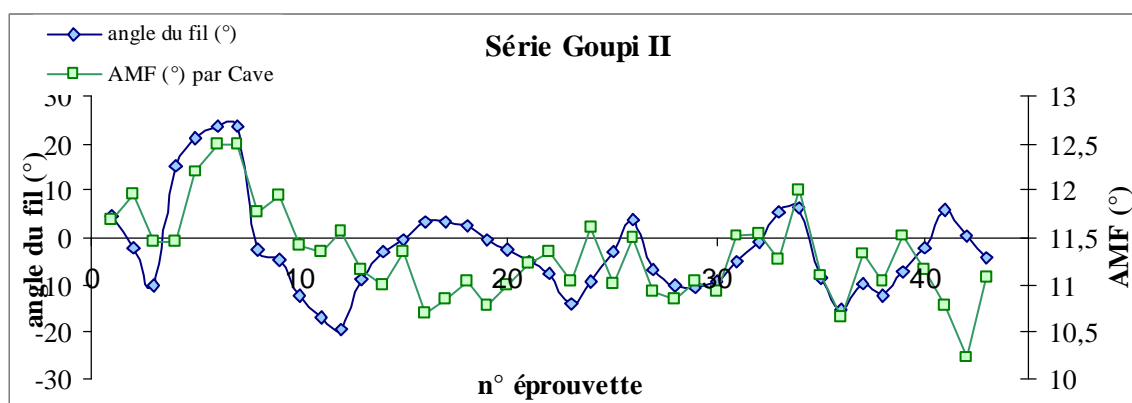
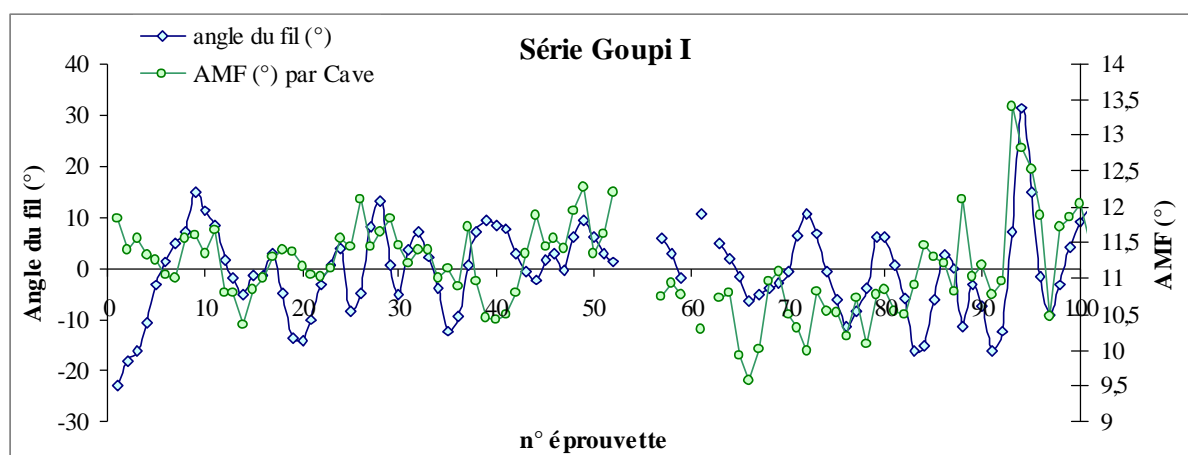


* : Signification au seuil de 0,1%

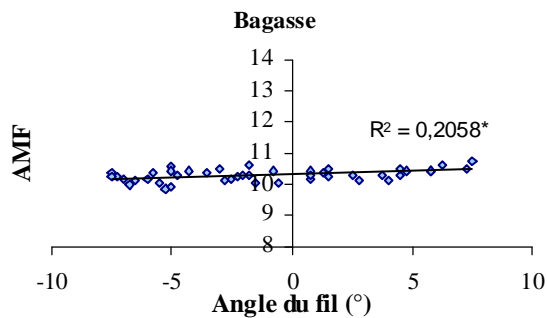
** : Signification au seuil de 5%



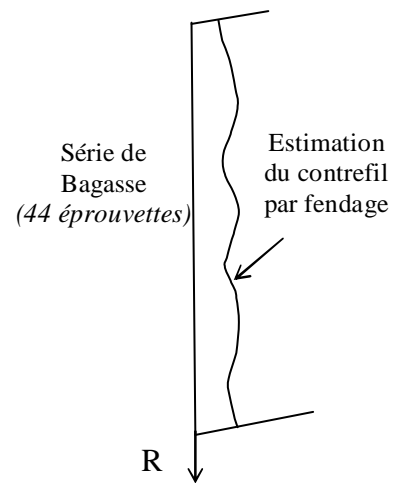
Section d'une grosse branche de Goupi, où 2 séries d'éprouvettes ont été réalisées



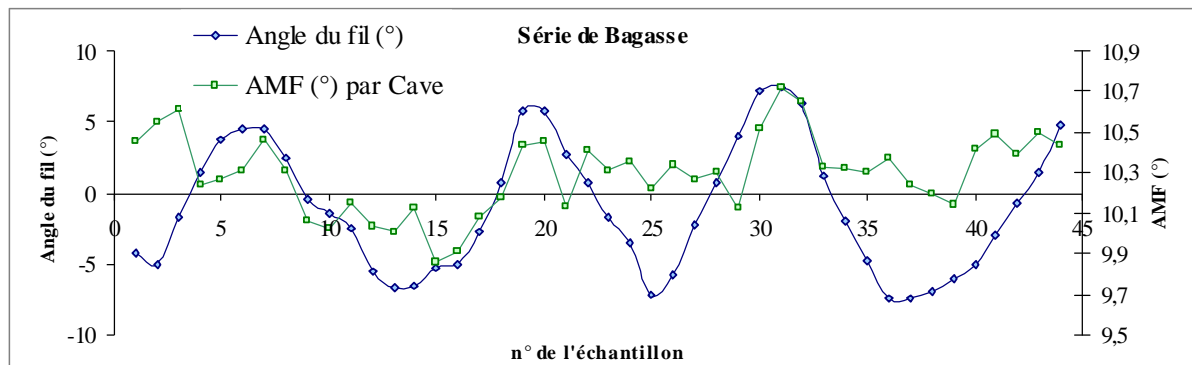
- Résultats des éprouvettes de Bagasse :



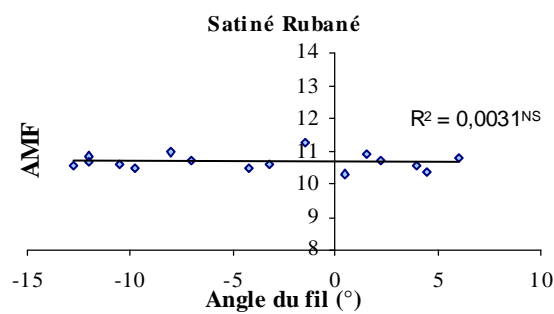
* : Signification au seuil de 1%



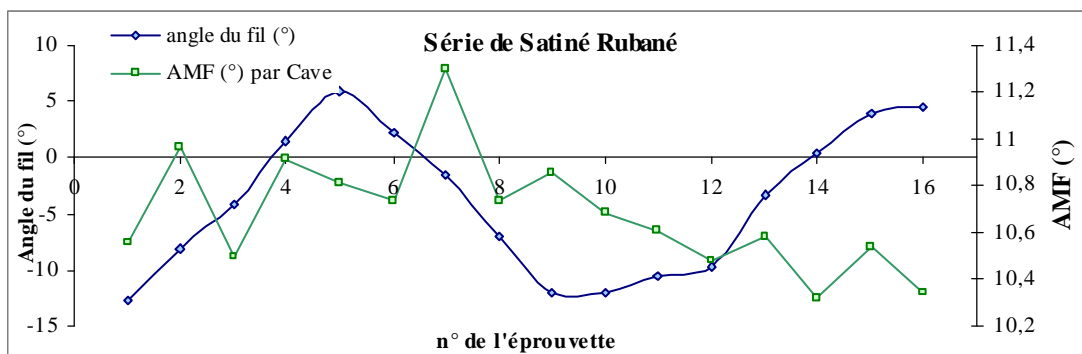
Section de Bagasse prélevé sur la poutre (cf. Figure 10)



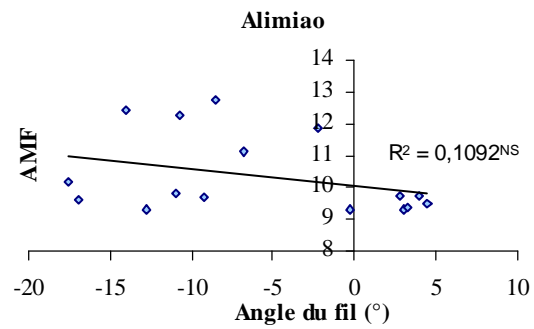
- Résultats des éprouvettes de Satiné Rubané :



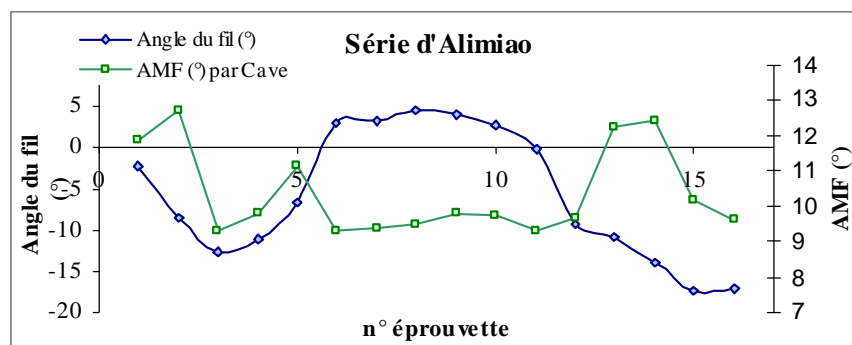
NS : Non significatif



- Résultats des éprouvettes d'Alimiao :



NS : Non significatif



ANNEXE 3

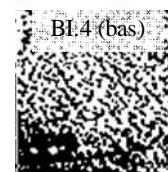
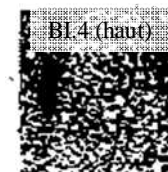
Résultats obtenus lors des essais de vibration sur poutres libre : La méthode « Bing »

Le tableau suivant résume les résultats obtenus, et permet de faire la comparaison entre le modèle de Bernouilli, de Timoshenko, et de Guitard (modules calculés pour un feuillu standard avec une correction sur la densité).

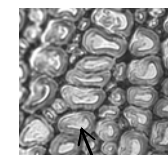
Série	n° barreau	Densité	IF (mm)	Percution sur R			Percution sur T			Modèle de Guitard (correction par la densité)		
				E _L (Mpa) <i>Timoshenko</i>	E _L (Mpa) <i>Bernouilli</i>	G _{RL} (Mpa)	E _L (Mpa) <i>Timoshenko</i>	E _L (Mpa) <i>Bernouilli</i>	G _{TL} (Mpa)	E _L (Mpa)	G _{TL} (Mpa)	G _{RL} (Mpa)
BI	BI.1	0,77	2,88	16793	15606	988	15954	15041	1133	17096	1198	1524
	BI.2	0,78	0,81	19891	18499	1243	20645	19100	1011	17433	1227	1557
	BI.3	0,70	1,52	18075	16692	1044	17541	16092	790	15586	1070	1375
	BI.4	0,76	0,71	22629	20888	1073	21675	19646	815	16918	1183	1506
BII	BII.1	0,72	0,34	18275	16935	938	18516	16850	789	16043	1108	1420
	BII.2	0,76	0,61	18202	16995	1033	19777	18076	871	16892	1180	1503
	BII.3	0,75	1,75	19568	18385	975	16551	15419	890	16732	1167	1488
	BII.4	0,70	1,79	16992	15925	1000	16890	15545	812	15501	1063	1367
BIII	BIII.1	0,71	2,73	19474	18054	956	17662	16253	789	15827	1090	1399
	BIII.2	0,73	2,71	19561	18207	1047	17178	15920	909	16310	1131	1446
	BIII.3	0,80	2,43	18660	17492	1055	20362	18637	841	17823	1260	1595
	BIII.4	0,77	1,38	18975	17671	1187	18333	16883	883	17129	1201	1527
BIV	BIV.1	0,74	1,46	17583	16435	1074	18125	16728	870	16411	1139	1456
	BIV.2	0,76	2,08	17228	16241	1154	18090	16791	970	16976	1188	1512
	BIV.3	0,72	1,23	18712	17374	1067	17108	15785	809	16021	1106	1418
	BIV.4	0,69	2,19	15614	14659	1069	16299	15088	768	15278	1044	1345

Remarque :

Certains résultats élevés de module longitudinaux (notamment pour le barreau BI.4) peuvent s'expliquer avec l'évaluation du bois de tension. Nous avons réalisé des coupes au microtome sur les zones sombres du bois, et après une coloration (pour mettre en évidence la couche G), nous avons estimé la quantité de bois de tension dans nos barreaux à partir de la couleur (à l'aide du logiciel ImageJ et de sections scannées à partir des barreaux). Tous les résultats élevés n'arrivent hélas pas à s'expliquer de cette manière.

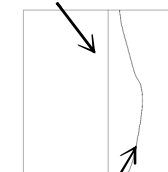


Blanc = bois de tension
Noir = bois opposé



Couche G : bois
de tension

Ligne de
fendage



Profil du
contrefil dans
la section

ANNEXE 4

Coefficients de la matrice de souplesse	« Feuillus » standard $H = 12\%$ $\rho = 0,65 \text{ gr/cm}^3$ $\text{MPa} = 10^6 \text{ Pa}$	Correction multiplicative en masse volumique ρ en gr/cm^3	Qualité de la régression effectif = 40 r %
$S_{11}^{-1} = E_1$	1810	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,30}$	0,933
$S_{22}^{-1} = E_2$	1030	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,74}$	0,920
$S_{33}^{-1} = E_3$	14400	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,03}$	0,917
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_2}{\nu_{21}} = \frac{E_1}{\nu_{12}}$	2680	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,41}$	0,886
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_3}{\nu_{32}} = \frac{E_2}{\nu_{23}}$	31200	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,09}$	0,805
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_1}{\nu_{13}} = \frac{E_3}{\nu_{31}}$	37300	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{0,913}$	0,727
$S_{44}^{-1} = G_{23}$	917	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,26}$	0,912
$S_{55}^{-1} = G_{31}$	1260	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,14}$	0,900
$S_{66}^{-1} = G_{32}$	366	$\ast \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,74}$	0,851

Modèles prévisionnels du comportement tridimensionnel élastique (modèle pour un feuillus) déterminé par Guitard [11].

TITRE : Description et comportement mécanique des bois contrefilés

RESUME:

La forêt tropicale guyanaise comporte entre 200 et 300 espèces d'arbres par hectare, alors qu'une forêt tempérée en compte environ une quinzaine. Les forêts tropicales humides sont des écosystèmes qui recèlent une des plus grandes biodiversités de la planète où les interactions entre les espèces et le milieu environnant atteignent des degrés de complexité élevés.

Les arbres développent ainsi des stratégies souvent différentes, notamment celle du contrefil que nous avons cherché à décrire et à caractériser, lors de ce stage de Master 2^{ème} année.

Cette structure particulière du bois se retrouve dans une proportion importante dans les forêts tropicales. Elle consiste en une alternance d'hélices en S puis en Z de l'orientation longitudinale des fibres.

Le stage s'est déroulé en grande partie en Guyane française, au sein de l'UMR « Ecologie des Forêts de Guyane » sur le site de Pariacabo (Kourou). La première phase a été la prospection et la description du contrefil sur différentes espèces. Nous nous sommes ensuite intéressés au comportement mécanique en flexion statique et dynamique à différentes échelles. Enfin, au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier, nous avons réalisé des mesures de l'angle des microfibrilles afin de déterminer son évolution en fonction de l'angle du fil.

Ainsi, prenant en compte les différentes échelles de description, nous avons mis au point un modèle permettant de prédire le comportement d'une poutre contrefilée en flexion, connaissant la répartition du contrefil dans la section, la densité, et le module d'élasticité longitudinal orienté selon le fil du bois

MOTS-CLEFS : Contrefil, bois tropicaux, angle des microfibrilles

TITLE in English: Description and mechanical behaviour of wood interlocked grain

SUMMARY:

The tropical forest in French Guyana counts between 200 and 300 species of trees per hectare. Whereas a temperate forest counts about fifteen. Wet tropical forests are ecosystems which conceal one of the largest biodiversities of the planet, where the interactions between the species and with the surrounding have high degrees of complexity.

Trees develop different strategies for survive, as the interlocked grain, which we described and characterized in this project. This particular structure of wood is a characteristic feature of a great number of tropical species. It is formed when the grain inclination changes from S or Z helix to the opposite slope during the growth.

The project took place in French Guyana, within the UMR ECOFOG « Ecologie des Forêts de Guyane » on the site of Pariacabo (Kourou). The first phase was about prospecting and the description of interlocked grain on various species. We have also been interested in the mechanical properties in static and dynamic flexion on various dimensions. At the end of the project, in the LMGC «Laboratoire de Mécanique et Génie Civil» of Montpellier (in France), we measured microfibrils angles in order to determine its evolution with the grain angle.

Thus, with these various description scales, we developed a model to predict the mechanical behaviour of an interlocked grain beam in flexion, knowing the interlocked grain distribution in the section, the density, and its longitudinal modulus of elasticity (oriented towards the grain direction).

KEYWORDS: Interlocked grain, wood tropical, the microfibrils ange.

Laboratoires où a été préparé le mémoire :

Laboratoire du Centre technique du Bois Guyanais de Pariacabo, Département des forêts, UMR Ecologie des Forêts de Guyane, BP 701, 97387 Kourou Cedex. Guyane Française.

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), CNRS UMR 5508, Université de Montpellier II, pl. E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5. France.