HENRI BAILLÈRES
CIRAD-Forêt

GILLES CALCHÉRA
CIRAD-Forêt

LIONEL DEMAY
CIRAD-Forêt

MICHEL VERNAY
CIRAD-Forêt

AGI 750-76

CLASSEMENT MÉCANIQUE DES BOIS GUYANAIS DE STRUCTURE

SELON TROIS TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

Charpente traditionnelle en bois de Guyane avec des pièces de structure soumises à différentes sollicitations mécaniques : fermes en Angélique, poinçons en Bagasse, chevrons en Gonfolo, couverture en Wapa.
Traditional woodwork structure in French Guiana with structural parts subject to different mechanical stresses : Angelique trusses, Bagasse king posts, Gonfolo rafters, Wapa roofing.

Dans l'industrie, il n'existe pas de méthode efficace de référence pour le classement mécanique des bois. L'objet de cet article est de présenter trois techniques non destructives, simples, et peu onéreuses portant sur des avivés en dimensions d'emploi.

Les exigences des nouvelles normes européennes de construction, définies dans l'Eurocode 5 (EC 5-DAN), imposent de laisser les règles de calcul des structures en bois aux contraintes admissibles (Règles CB 71) pour passer à celles concernant les structures en bois aux états limites. Pour des raisons commerciales et techniques, les bois guyanais utilisés dans la construction devront suivre ces règles et, par conséquent, les normes de produits cohérentes avec l'EC 5, éditées par le Comité Européen de Normalisation « structures en bois » (CEN/TC 124) qui s'apprêtent à être la référence européenne. Certaines de ces normes s'appliquent déjà* ; elles reposent en particulier sur deux caractéristiques mécaniques : le module d'élasticité et la résistance à la rupture.

Le classement mécanique des pièces en dimension d'emploi basé sur la mesure du module d'élasticité est largement pratiqué dans les grandes entreprises de nombreux pays (utilisation de la flexion statique au défilé dit « stress grading » en anglais). Les pièces employées en construction sont classées mécaniquement afin d'assurer fiabilité et sécurité. Dans une classe de résistance, la variation des propriétés de résistance est d'environ 9 MPa, ce qui représente approximativement 15 % de la moyenne de résistance. Cette variation est bien supérieure à celle des autres matériaux de construction et généralement pose problème aux ingénieurs du bois ainsi qu'aux prescripteurs. Une meilleure connaissance du comportement mécanique du matériau bois, indispensable à un emploi adéquat, intéresse donc les chercheurs comme les transformateurs ou les utilisateurs. Un classement adapté à l'utilisation est d'un intérêt capital pour la promotion de ce matériau.

Le but de cette étude est de valider certaines méthodes de classement mécanique non destructives des bois par rapport à la référence effective et normalisée mais destructive que constitue l'essai de flexion statique 4 points. Le choix des méthodes retenues, plutôt destinées à de petites entreprises, est basé sur la simplicité, la fiabilité et le faible coût des techniques à mettre en œuvre.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'ESSAI DE FLEXION STATIQUE RÉALISÉ

L'essai de flexion 4 points pour les bois de construction en dimension d'emploi a été mené en suivant le protocole défini par la norme NF EN 408. Cette norme européenne précise les procédures d'essai qui permettent d'obtenir, en particulier, le module d'élasticité et la résistance à la flexion qui servent à classer mécaniquement les bois (norme NF EN 408, 518, 519 et 338). Elle s'applique aux bois guyanais de structure.

LES TECHNIQUES DE CLASSEMENT NON DESTRUCTIVES EXAMINÉES

□ Méthode visuelle

Le classement visuel appliqué s'appuie sur les spécifications normatives concernant les sciages avivés, élaborées par le CIRAD-Forêt sur la base des prescriptions de l'A.T.I.B.T. (Association Technique Internationale des Bois Tropicaux). Ces règles de classement adaptées aux bois guyanais (CIRAD-Forêt, 1990) garantissent un niveau stable de qualité et

* En particulier : NF EN 336, NF EN 338, NF EN 384, NF EN 408, NF EN 518 et NF EN 519.

Mesure du module d'élasticité et de la résistance en flexion selon la norme NF EN 408.
Measurement of the modulus of elasticity and modulus of rupture in bending as per standard NF EN 408.

Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores par l'appareil SYLVATEST.
Measurement of propagation speed of ultrasonic waves by the SYLVATEST apparatus.

des standards dimensionnels. Elles définissent quatre choix :

• **Choix I** (utilisation en ébénisterie) : pièce sans défaut apparent ou présence de petits nœuds sains et sans aubier.

• **Choix II** (utilisation en menuiserie) : pièce avec des nœuds sains plus gros et plus nombreux que dans le choix I, aubier sain toléré en arête.

• **Choix III** (utilisation en charpente) : dans ce choix on tolère, en plus, les piqûres non actives, les galeries, les gros nœuds sains, les fentes sur les faces, une inclinaison de fil nette, aubier sain toléré.

• **Choix IV** (coffrage) : ce choix correspond à des bois ayant de gros défauts, à l'exclusion des « coups de vent », des pourritures, des échauffures, des nœuds malsains non adhérents... Ce choix ne peut pas être retenu pour la construction.

Il est important de souligner que ce classement n'a pas été mis au point spécifiquement pour trier mécaniquement les bois ; cependant, il a le mérite d'exister et d'être le seul classement pratiqué actuellement en Guyane.

□ Méthode ultrasonore : vitesse de propagation

La vitesse de propagation (V) des vibrations longitudinales dans une barre prismatique, composée d'un milieu élastique solide, est reliée à la rigidité élastique et à la densité (ρ) (TIMOSHENKO, 1961). On peut estimer, compte tenu du faible niveau de correction (environ 400 MPa), que la rigidité peut être remplacée par le module longitudinal d'élasticité (E_L) :

$$V = \sqrt{\frac{E_L}{\rho}} \qquad (1)$$

Afin d'obtenir la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore dans les éléments testés, nous avons utilisé un appareil du commerce développé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : le SYLVATEST. Celui-ci, conçu pour le classement des bois, est équipé de trois sondes de mesure (cf. fig. 1).

→ Dans la suite de l'étude, le module longitudinal d'élasticité obtenu en utilisant l'équation (1) est noté E_{US}.

□ Méthode vibratoire : l'analyse modale

A la suite des travaux entrepris par BORDONNÉ (thèse effectuée au CIRAD-Forêt en 1989), le CIRAD-Forêt dispose d'un appareillage permettant d'obtenir rapidement des modules d'élasticité en flexion par analyse des vibrations transverses.

Ce dispositif conçu initialement pour des éprouvettes normalisées peut être utilisé pour des pièces de dimensions variables. La méthode employée pour déterminer le module d'élasticité en flexion repose sur la recherche, puis l'interpréta-

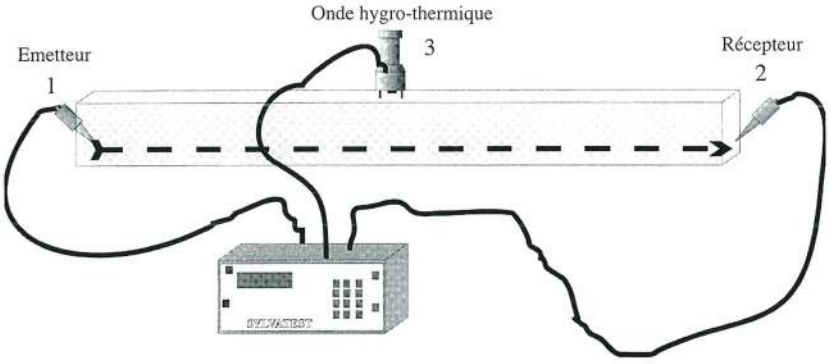


Figure 1. Dispositif de mesure du SYLVATEST.
SYLVATEST measuring device.

Des essais comparatifs réalisés par CURIE (1989), GÉRARD (1994), CASSAN (1995), BAILLÈRES et CASSAN (1997) ont montré une très bonne corrélation avec les résultats obtenus par des essais classiques de flexion (3 et 4 points) sur des éprouvettes sans défaut.

→ Par commodité pour la suite de l'étude, le module d'élasticité dynamique (noté E_d) désignera la valeur obtenue par cette méthode par opposition au module d'élasticité statique obtenu en flexion 4 points.

tion du spectre des fréquences propres issues des vibrations naturelles en appliquant la théorie des poutres élastiques développée par TIMOSHENKO (1953 et 1961). L'élément de bois à tester repose sur deux supports élastiques afin que la propagation des vibrations soit la plus libre possible et puisse être provoquée par une simple percussion sur l'une des extrémités (cf. fig. 2). A l'autre extrémité, un microphone enregistre les vibrations émises et les transmet via un filtre « passe-bas » à une carte d'acquisition sur micro-ordinateur pour une analyse par « transformée de Fourier rapide » (F.F.T.). Le traitement mathématique du signal (calcul et régression linéaire) est effectué par un programme écrit en VisualBasic qui intègre les caractéristiques géométriques et le poids de l'éprouvette.

PROCÉDURE D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ESSAI

En raison de leur importance économique, les deux essences retenues pour l'étude ont été l'Angélique (*Dicorynia guianensis* Amsh.) et le Gonfolo (*Qualea spp.*). Les arbres dans lesquels ont été prélevés les débits proviennent de différents sites situés dans les forêts domaniales guyanaises proches de la bande côtière. Au total, 7 gonfolos et 9 angéliques ont été retenus. Les grumes (de 12 à 16 m de longueur) ont été

Mesure du module d'élasticité en flexion par la méthode vibratoire « Système BING ».
Measurement of the elasticity modulus in bending by vibration method « BING System ».

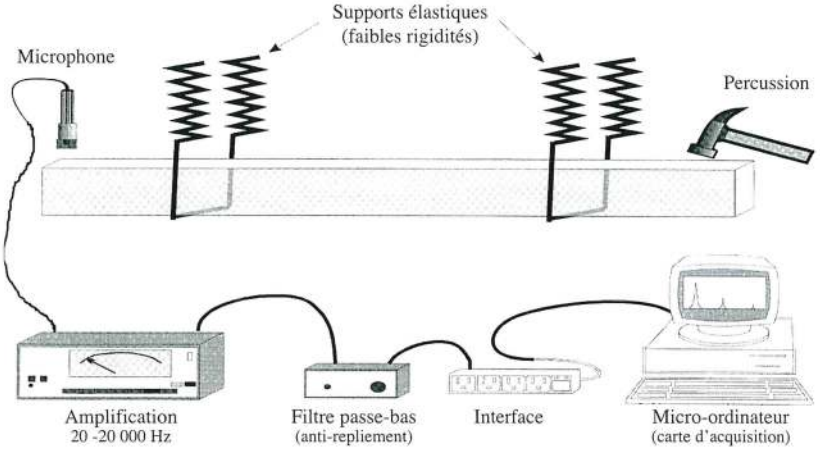


Figure 2. Chaîne de mesure et de traitement du dispositif « BING ». Les éléments : amplification, filtre, interface et acquisition sont intégrés dans une seule carte.
Measuring and handling, sequence of the « BING » apparatus. The various parts include : amplification, filter, interface and acquisition, all incorporated in a single card.

tronçonnées en 3 à 5 billons de 3,5 m de longueur.

Après sciage, 96 pièces de Gonfolo et 86 pièces d'Angélique de dimensions nominales 60 × 155 × 3 500 mm^3 ont été sélectionnées de façon à obtenir, après classement visuel, des avivés dans les quatre choix. Les avivés ont ensuite été séchés sous vide de façon progressive pour atteindre une humidité proche de 12 %. Après une phase de stabilisation d'environ deux semaines, ces pièces ont été mises aux cotes (55 × 138 × 3 000 mm^3), les pièces les plus déformées ayant été rejetées afin d'éviter les problèmes d'instabilité et de déversement au cours de l'essai statique.

Pour chacun des **77 avivés d'Angélique et des 86 avivés de Gonfolo** finalement retenus, les mesures ont été effectuées dans l'ordre suivant au cours de la même journée :

- vitesse de propagation de l'onde ultrasonore,
- densité calculée sur la pièce entière à partir de ses dimensions et de sa masse à l'humidité correspondante,
- module d'élasticité dynamique,
- module d'élasticité statique,
- résistance à la flexion,
- humidité obtenue par double pesée sur une éprouvette de 20 mm de large, prélevée dans la section de la pièce en son milieu,
- mesure de la surface projetée des défauts sur la section transversale.

Ce dernier paramètre permet de calculer le KAR *(Knot Area Ratio)* qui est le rapport entre la surface projetée sur la section transversale des défauts situés entre les appuis internes, dans la zone de flexion pure (en majorant cette longueur de 10 % de part et d'autre des appuis internes), et la surface transversale totale. Ce rapport est classiquement utilisé sur des résineux (PERTOSPER, 1995) pour estimer l'effet des nœuds sur les caractéristiques mécaniques. Dans le cas des pièces testées au cours de cette étude, tous les défauts ont été pris en compte : nœuds, trous, pourriture, poches de résines, « coups de vent* »...

Lors de l'essai de flexion statique, afin de respecter les règles de mise en œuvre des pièces utilisées en structure, les plus gros nœuds et autres défauts importants ont été placés du côté de la face comprimée (intrados de la pièce fléchie). Les coups de vent sont très peu détectables visuellement ; c'est la raison pour laquelle, malgré leur influence présumée sur la résistance des pièces, ils ont été aléatoirement positionnés entre la face tendue et la face comprimée.

Dans la suite de l'étude, les paramètres mesurés sont ramenés à une humidité de référence de 12 % en utilisant les équations suivantes pour une humidité H en dessous du point de saturation des fibres :

□ **Densité**

$$\rho_{12} = \rho_H \frac{(100 + \alpha (H - 12))}{(100 + (H - 12))}$$

α : coefficient de retrait volumique (%/%), sa valeur est de 0,55 pour l'Angélique et 0,58 pour le Gonfolo (banque de données du CIRAD-Forêt).

□ **Module d'élasticité longitudinal en MPa (équation empirique)**

$$E_{12} = \frac{E_H}{1 - 0{,}0143 (H - 12)}$$

(BOSTRÖM, 1995 d'après KOLLMANN et CÔTÉ, 1968).

□ **Résistance à la flexion en MPa (équation empirique)**

$$f_{m,12} = \frac{f_{m,H}}{1 - 0{,}0295 (H - 12)}$$

(BOSTRÖM, 1995 d'après KOLLMANN et CÔTÉ, 1968).

SIGNIFICATION DES SYMBOLES UTILISÉS DANS L'ARTICLE

KAR est le rapport entre la surface projetée sur la section transversale des défauts situés entre les appuis internes, dans la zone de flexion pure (en majorant cette longueur de 10 % de part et d'autre des appuis internes), et la surface transversale totale,

ρ_{12} est la densité à 12 %,

$E_{stat,12}$ est le module d'élasticité à 12 % obtenu par l'essai de flexion statique normalisé,

$f_{m,12}$ est la résistance à la flexion,

$E_{US,12}$ est le module d'élasticité à 12 % obtenu par la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores,

$E_{d,12}$ est le module d'élasticité à 12 % obtenu par l'analyse des vibrations transverses.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

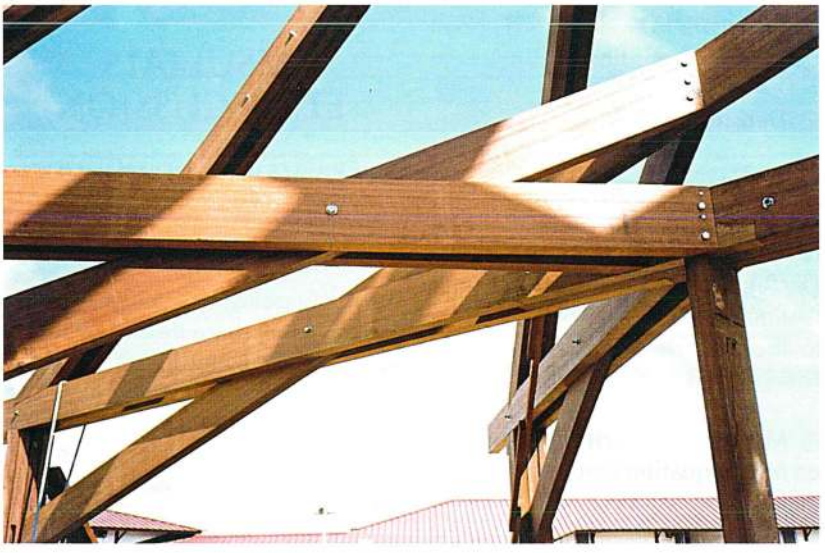
ÉVALUATION DU MODULE D'ÉLASTICITÉ STATIQUE

□ **Par la méthode visuelle**

Pour l'Angélique, l'analyse de variance à un critère de classification n'indique aucune différence significative sur le module d'élasticité entre les différents choix. En revanche pour le Gonfolo, il existe

* Ce terme désigne une anomalie de structure présente sous la forme d'une fracture transversale très ténue, dont l'aspect à l'échelle microscopique s'apparente à une rupture en compression avec un flambement important des cellules accompagné de nombreuses fissures transversales dans les parois. Elle engendre, dans la majorité des cas, une faible résistance à la rupture en traction longitudinale. Cette dénomination, adoptée par les utilisateurs, ne permet en aucun cas d'affirmer que des vents violents sont à l'origine de ce défaut. Notons que le terme anglais équivalent à « fracture de compression » *(compression failure)* serait certainement plus adapté pour décrire ce défaut.

Charpente en Angélique boulonnée. Pièce de grande longueur soumise à des contraintes de flexion.
Wood structure made of bolted Angelique. Very long piece subject to bending stresses.



Pièces de structure en Angélique (système poteau-poutre).
Angelique structural elements (pole-beam system).

une différence significative au seuil de 5 % entre l'ensemble des choix III et IV, qui ne sont pas significativement différents, et l'ensemble des choix I et II : les choix III et IV ont un module d'élasticité plus faible (cf. fig. 3).

☐ Par la densité

Un très gros nœud sur une pièce de Gonfolo est à l'origine de la très faible valeur de $E_{stat,12}$ (< 10 000 MPa) observée sur le graphique du Gonfolo de la figure 4. De même pour l'Angélique, un coup de vent occupant une surface importante pourrait expliquer la très faible valeur de module d'élasticité présente dans le graphique de l'Angélique de la figure 4.

Alors que l'écart de variation de densité est voisin pour les deux essences, la corrélation entre ρ_{12} et $E_{stat,12}$ est notablement meilleure pour le Gonfolo, et ceci malgré une proportion de défauts apparents plus élevée chez cette dernière (cf. fig. 4 et tableau I, p. 54). En effet, une partie des avivés en Gonfolo sont classés en choix IV, choix qui n'est pas présent chez l'Angélique dans notre échantillonnage. Le $E_{stat,12}$ de cette essence présente une variabilité qui semble s'atténuer lorsque la densité augmente. Ce phénomène est la conséquence d'un effet « arbre » prononcé puisque les pièces de densité supérieure à 0,9 et possédant un module d'élasticité au-dessus de 23 000 MPa proviennent toutes du même arbre.

☐ Par le KAR

Il n'existe aucune corrélation significative entre la proportion de défaut évaluée par le KAR et le module longitudinal d'élasticité statique ($E_{stat,12}$). Les singularités du bois, tout du moins celles prises en compte dans le KAR (nœuds, galeries, trous et coups de vent essentiellement) n'expliquent pas la variabilité totale observée de $E_{stat,12}$. Ce constat paraît raisonnable puisque les défauts (sauf les coups de vent) ont été placés du côté de la face comprimée afin de limiter leur influence sur les caractéristiques mécaniques.

☐ Par la méthode ultrasonore

Les corrélations entre le module d'élasticité ultrasonore ($E_{US,12}$) et le module d'élasticité statique longitudinal ($E_{stat,12}$) sont positives et significatives au seuil de 1 ‰ pour les deux essences (cf. fig. 5). La corré-

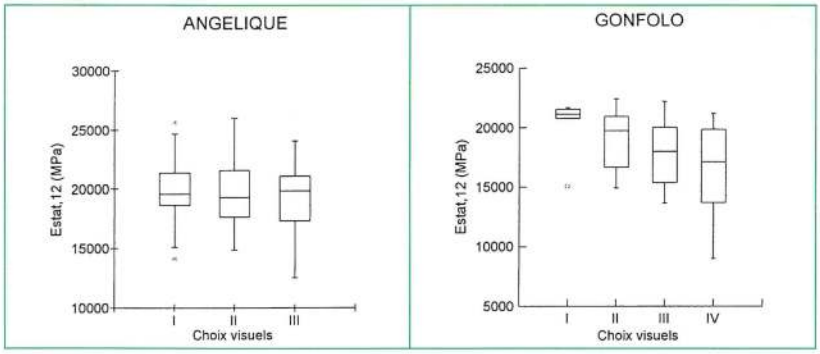


Figure 3. Comparaison des modules d'élasticité obtenus dans les différents choix pour l'Angélique et le Gonfolo.
Comparison of modulus of elasticity obtained in the different choices for the Angelique and the Gonfolo.

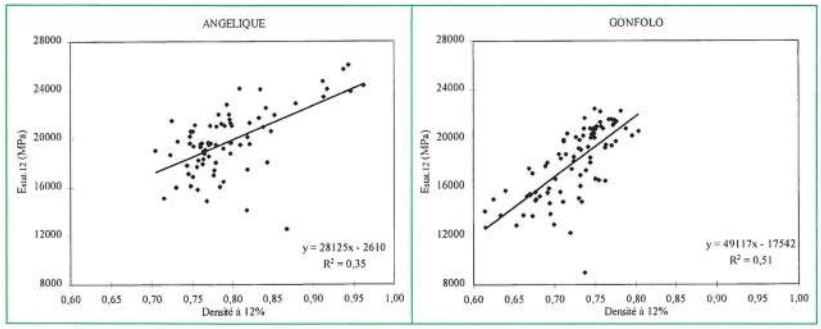


Figure 4. Régressions entre la densité et le module d'élasticité statique pour l'Angélique et le Gonfolo.
Regressions between density and static modulus of elasticity for the Angelique and the Gonfolo.

que s'il affecte la section entière de la pièce. A l'inverse, des vitesses lentes de propagation dues à de petites déviations de fil successives peuvent être enregistrées alors que ces dernières n'ont qu'une influence limitée sur le module longitudinal d'élasticité. Le classement par la méthode ultrasonore peut donc sous-classer ou surclasser les bois suivant le type de singularités de structure rencontré. Les indications portées sur les graphiques de la figure 5 permettent d'illustrer le comportement de la propagation des ondes ultrasonores que nous avons évoqué ci-dessus.

Le module ultrasonore ($E_{US,12}$) surestime le module statique ($E_{stat,12}$) d'environ 20 % pour l'Angélique et 15 % pour le Gonfolo (cf. tableau I). La surestimation systématique du module d'élasticité statique par la méthode ultrasonore peut s'expliquer par la nature viscoélastique du matériau. Celle-ci induit une augmentation du module d'élasticité lorsque la vitesse de chargement ou de la fréquence d'excitation de l'essai s'accroît (HAINES *et al.*, 1996).

A titre de comparaison, les corrélations du même type réalisées sur des

lation est moins étroite pour l'Angélique (R^2 = 0,63) que pour le Gonfolo (R^2 = 0,74). La propagation des ondes ultrasonores est peu perturbée par des défauts du type grande fente longitudinale ou microflambements des fibres dus aux coups de vent (à condition qu'ils n'occupent pas toute la section) que l'on rencontre plus fréquemment chez l'Angélique. En effet, lorsque le fil du bois ne subit pas de déviation importante et reste continu sur tout ou partie de la section de l'avivé, la vitesse enregistrée correspond à la vitesse maximale de propagation. En d'autres termes, un défaut ne peut perturber significativement la vitesse de propagation

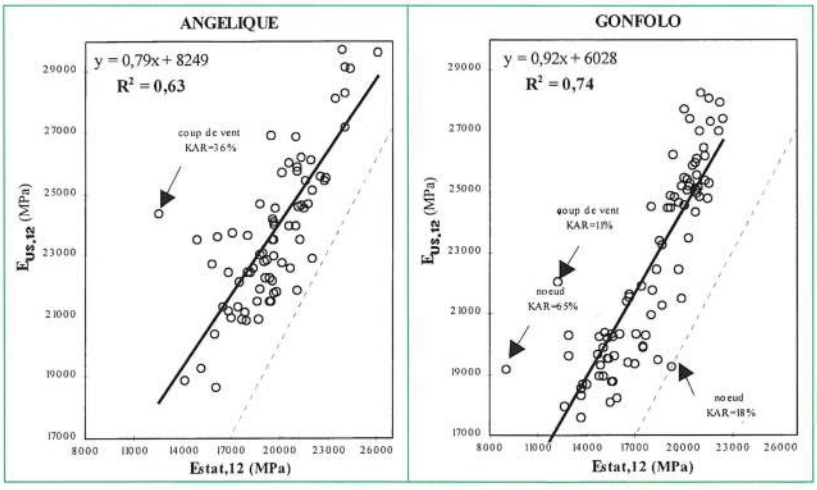


Figure 5. Régressions linéaires entre $E_{stat,12}$ et $E_{US,12}$ pour l'Angélique et le Gonfolo.
Linear regressions between $E_{stat,12}$ and $E_{US,12}$ for the Angelique and the Gonfolo.

TABLEAU I

MOYENNES ET COEFFICIENT DE VARIATION DES MODULES D'ÉLASTICITÉ OBTENUS PAR LES TROIS MÉTHODES POUR L'ANGÉLIQUE ET LE GONFOLO

Modules d'élasticité (MPa)	ANGÉLIQUE (n = 77)		GONFOLO (n = 86)	
	moyenne (MPa)	coefficient de variation (%)	moyenne (MPa)	coefficient de variation (%)
$E_{stat,12}$	19 745	13,6	17 957	16,2
$E_{d,12}$	20 938	12,2	18 717	16,5
$E_{US,12}$	23 867	11,2	22 562	13,8

pièces de structure en dimension d'emploi d'Epicéa commun avec le système « SYLVATEST », par SANDOZ (1989), fournissent des coefficients de détermination de l'ordre de 0,7.

□ Par la méthode vibratoire

Comparativement à la méthode ultrasonore, l'analyse modale fournit une meilleure estimation de $E_{stat,12}$ (cf. tableau I et fig. 6) : la moyenne est plus proche et les régressions sont plus étroites. On retrouve une nouvelle fois une meilleure corrélation pour le Gonfolo que pour l'Angélique.

Les défauts autres que les coups de vent permettent d'expliquer une partie de la variabilité observée (fig. 6) :

• $E_{stat,12}$ est largement surestimé lorsqu'une très grande fente longitudinale sépare pratiquement la pièce en deux parties. En effet, tout se passe comme si l'essai était mené sur deux pièces distinctes dont les fréquences de vibration indépendantes sont acquises simultanément ; de ce fait, la fréquence de vibration enregistrée est plus élevée. Etant donné que $E_{d,12}$ est lié au carré des fréquences propres, il est logique de surestimer $E_{stat,12}$. Ce défaut n'a été détecté que lors de l'essai statique ; c'est la raison pour laquelle nous l'avons conservé dans l'analyse des résultats.

• Le module dynamique sous-estime $E_{stat,12}$ dans le cas de nœuds ou de coups de vent importants. Compte tenu de leur position (toujours du côté de la face comprimée) au cours de l'essai statique, ils ont eu peu d'influence sur $E_{stat,12}$. Dans le dispositif BING, la sollicitation étudiée est la flexion en mouvement plan et tous les modes propres de vibration sont sollicités simultanément. De ce fait, un défaut est successivement en compression ou en traction quelle que soit sa position dans la section, d'où une influence plus grande du défaut dans le cas de la mesure du module dynamique.

Par contre, les coups de vent n'ont eu aucun effet significatif sur $E_{d,12}$.

Dans le cas de l'Angélique, il faut noter que l'élimination de la pièce possédant une très grande fente longitudinale, défaut qui ne peut pas être retenu comme élément de structure, permet au R^2 de passer de 0,69 à 0,84. L'analyse du spectre des fréquences de cette pièce montre des perturbations significatives des modes d'ordre supérieur qui pourraient servir de critère d'identification des pièces douteuses.

A titre de comparaison, les corrélations du même type réalisées sur des pièces de structure en dimension d'emploi de plusieurs essences (essentiellement résineuses) avec des techniques différentes d'analyse des vibrations transverses, par BECKER (1995) et PERTOSPER (1995), fournissent des coefficients de détermination compris entre 0,70 et 0,95.

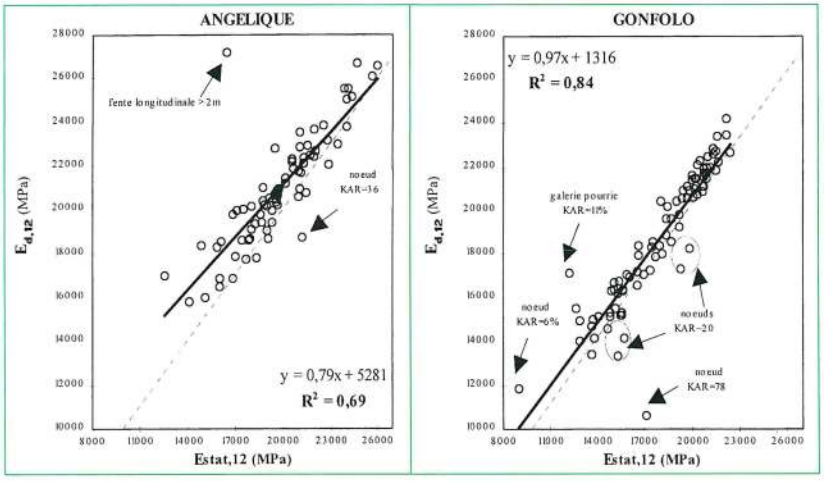


Figure 6. Régressions linéaires entre $E_{stat,12}$ et $E_{d,12}$ pour l'Angélique et le Gonfolo.
Linear regressions between $E_{stat,12}$ and $E_{d,12}$ for the Angelique and the Gonfolo.

□ Par des corrélations multiples

Une régression multiple avec KAR et ρ_{12} comme variables explicatives

n'apporte aucune amélioration pour l'estimation de $E_{stat,12}$.

L'application d'une régression multiple avec comme variables explicatives $E_{US,12}$ et KAR améliore peu la qualité de l'estimation de $E_{stat,12}$: de 0,4 point pour l'Angélique et de 0,1 point pour le Gonfolo. Le fait d'ajouter la densité comme variable supplémentaire n'apporte que très peu d'amélioration (cf. tableau II, p. 58).

Dans le cas de la méthode vibratoire, l'application d'une régression multiple avec comme variables explicatives $E_{d,12}$ et KAR n'améliore pas significativement la qualité de l'estimation de $E_{stat,12}$. Le fait d'ajouter la densité comme variable supplémentaire n'apporte aucune amélioration (cf. tableau II).

Dans tous les cas, l'estimation du module d'élasticité statique est meilleure pour le Gonfolo.

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE À LA RUPTURE

□ Par la méthode visuelle

Pour l'Angélique, l'analyse de variance à un critère de classification n'indique aucune différence significative sur la résistance à la rupture entre les différents choix. En revanche pour le Gonfolo, il existe une différence significative au seuil de 1 % entre les choix I et II, qui ne sont pas significativement différents, et les choix III et IV qui sont significativement différents entre eux (cf. fig. 7).

Le classement visuel du Gonfolo permet d'obtenir des lots relativement distincts du point de vue résistance mécanique. Cependant, comme le montre la figure 7, la dispersion des valeurs de $f_{m,12}$ dans chaque choix est importante.

□ Par la densité

Les coefficients de détermination entre ρ_{12} et $f_{m,12}$ sont peu élevés (cf. tableau II, p. 58), la densité est un estimateur peu fiable de la résistance à la flexion.

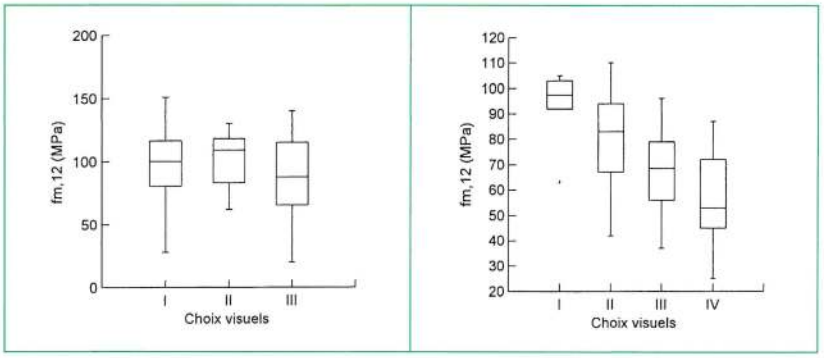


Figure 7. Comparaison des modules d'élasticité obtenus dans les différents choix pour l'Angélique et le Gonfolo.
Comparison of modulus of elasticity obtained in the different choices for the Angelique and the Gonfolo.

□ Par le KAR

La résistance à la flexion $f_{m,12}$ est significativement corrélée au KAR (fig. 8). Cette corrélation est meilleure pour le Gonfolo essentiellement en raison de l'absence de coup de vent. Ces corrélations démontrent que l'analyse visuelle quantitative des défauts peut être un outil intéressant de prédiction de la résistance à la flexion. Cependant, pour être utile, cette analyse doit être plus précise au risque d'être fastidieuse ; en effet, l'utilisation d'un paramètre tel le KAR ne rend pas compte de la nature du défaut dont l'influence est importante sur le type de rupture, ce qui se traduit dans les corrélations par une proportion élevée de la variance totale qui reste non expliquée. Par

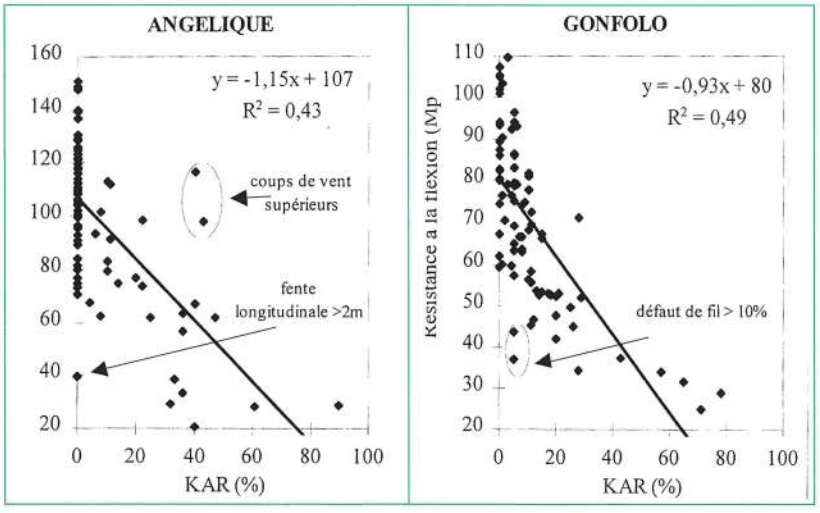


Figure 8. Relations entre le KAR et la résistance à la flexion pour l'Angélique et le Gonfolo.
Relationships between the KAR and the bending strength for the Angelique and the Gonfolo.

exemple, les défauts influents tels qu'une forte inclinaison de l'angle de fil ou la présence d'une grande fente longitudinale ne peuvent être intégrés dans le KAR. En outre, les coups de vent en position supérieure (au-dessus de l'axe neutre, dans la zone comprimée) ont eu peu d'influence sur la résistance à la flexion malgré un KAR élevé. Par contre, placés en position inférieure, ces derniers auraient conduit à une résistance à la flexion deux à trois fois plus faible.

□ Par le module d'élasticité statique

Le module d'élasticité semble être un meilleur estimateur que la densité bien que dans le cas de l'Angélique l'amélioration soit insignifiante (cf. tableau II). En effet, sur le graphique de l'Angélique de la figure 9, des points se détachent distinctement ; ils se caractérisent par des densités faibles associées aux plus basses valeurs de résistance à la flexion (< 40 MPa) sans pour autant induire un effet franchement négatif sur le module d'élasticité longitudinal. L'analyse des défauts sur les avivés associés à ces points met en évidence la présence de coups de vent au niveau de la zone de rupture. Ils sont situés en majorité en position inférieure, c'est-à-dire dans la zone tendue de la pièce fléchie. Ils ont provoqué des ruptures brutales, sous faible charge, sans atteindre de phase plastique.

Comme l'indique la figure 10, les coups de vent en position supérieure (*i.e.* au-dessus de l'axe neutre, dans la zone en compression) ne paraissent pas induire de rupture prématurée hormis sur un avivé pour lequel le coup de vent occupait une surface importante. Inversement, un coup de vent en position inférieure n'a pas provoqué de rupture précoce du fait de la faible surface qu'il occupait. Les coups de vent sont donc les défauts les plus influents sur le niveau de rupture en flexion mais leur influence dépend de leur position par rapport à l'axe neutre et de la surface qu'ils occupent. Par ailleurs, la fente longitudinale apparue au cours du séchage s'étendant sur plus de 2 m longitudinalement et sur toute la largeur de la pièce a induit une faible résistance à la flexion.

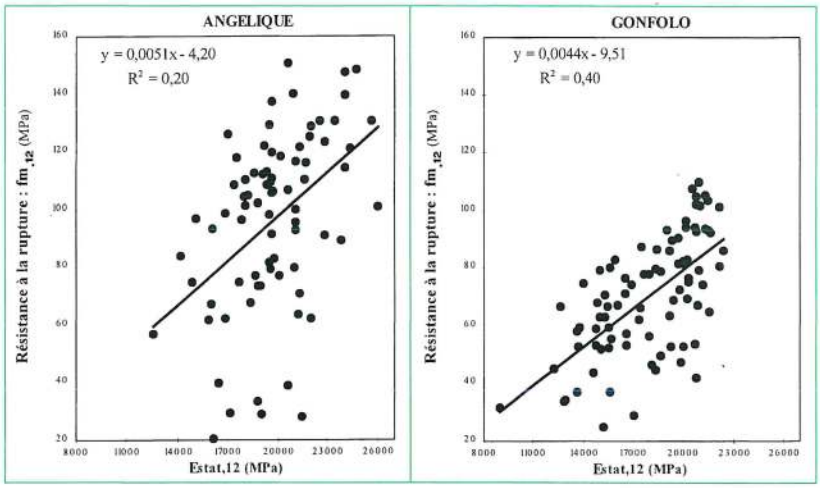


Figure 9. Relations entre le module d'élasticité statique ($E_{stat,12}$) et la résistance à la flexion ($f_{m,12}$) pour l'Angélique et le Gonfolo.
Relationships between the static modulus of elasticity ($E_{stat,12}$) and the bending strength ($f_{m,12}$) for the Angelique and the Gonfolo.

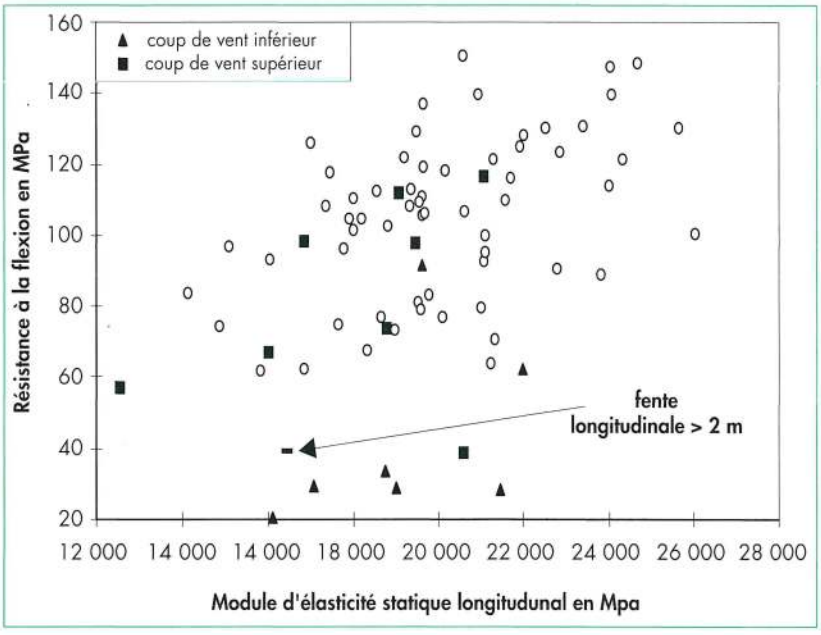


Figure 10. Incidence des coups de vent sur la relation entre le module d'élasticité statique et la résistance à la rupture en flexion de l'Angélique.
Effect of compression failure on the relationship between the static modulus of elasticity and the bending strength of the Angelique.

□ Par la méthode ultrasonore

La corrélation entre $E_{US,12}$ et la résistance à la flexion ($f_{m,12}$) est peu significative pour le Gonfolo et ne l'est pas pour l'Angélique. On peut observer sur la figure 11 que les pièces qui présentent un défaut de fil prononcé ont un $E_{US,12}$ particulièrement bas sans pour autant présenter une faible résistance à la flexion. Cette observation rejoint la remarque formulée plus haut, au chapitre « Evaluation du module d'élasticité statique », qui concerne l'influence de l'orientation du fil sur la propagation des ondes ultrasonores.

Les corrélations entre $E_{US,12}$ et $f_{m,12}$ réalisées avec le même appareillage sur des pièces de structure en dimension d'emploi en Epicéas commun par SANDOZ (1989), BOSTRÖM (1995) et PERTOSPER (1995) fournissent des coefficients de détermination compris entre 0,30 et 0,62.

□ Par la méthode vibratoire

La prédiction de la résistance à la rupture par le module dynamique est satisfaisante pour le Gonfolo (R^2 = 0,51) ; elle dépasse, qui plus est, la prédiction obtenue avec le module statique (R^2 = 0,40). Pour l'Angélique, la prédiction est faible, même si l'on élimine la pièce présentant la grande fente longitudinale (R^2 = 0,18), cf. figure 10 et tableau II.

Les corrélations entre $E_{d,12}$ et $f_{m,12}$, réalisées avec d'autres systèmes d'analyse vibratoire sur des pièces de structure en dimension d'emploi de différentes essences tempérées (essentiellement résineuses), par BECKER (1995), PERTOSPER (1995) et DIVOS, TANAKA (1997), fournissent des coefficients de détermination compris entre 0,11 et 0,79.

□ Par des corrélations multiples

Il est important de noter que le fait de retenir simplement les variables explicatives KAR et ρ_{12} dans la régression multiple permet d'obtenir des coefficients de détermination très proches de ceux obtenus par la méthode ultrasonore ou vibratoire (cf. tableau II). Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'utiliser de telles techniques de classement puisqu'un opérateur correctement formé, muni d'un double décimètre et d'une balance, est capable d'obtenir une prédiction de la résistance à la flexion très correcte.

Si l'on exclut la pièce très fendue, la régression multiple avec $E_{d,12}$, et KAR pour variables explicatives permet d'obtenir une meilleure prédiction de $f_{m,12}$ comparativement à l'utilisation des variables explicatives $E_{US,12}$ et de KAR.

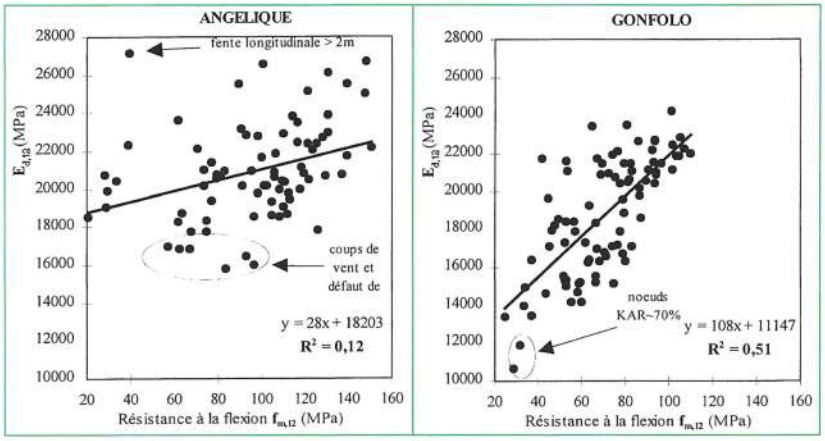


Figure 12. Relations entre le module d'élasticité obtenu par la méthode vibratoire ($E_{d,12}$) et la résistance à la flexion ($f_{m,12}$) pour l'Angélique et le Gonfolo.
Relationships between the modulus of elasticity obtained by the vibration method ($E_{d,12}$) and the bending strength ($f_{m,12}$) for the Angelique and the Gonfolo.

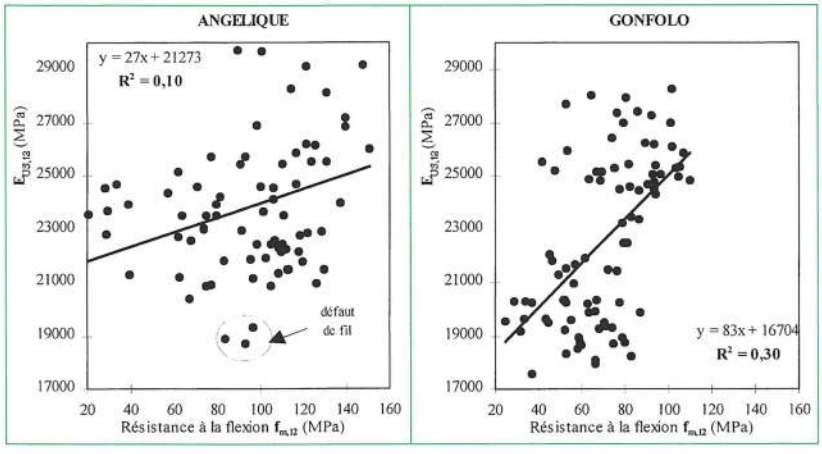


Figure 11. Relations entre le module d'élasticité obtenu par la méthode ultrasonore ($E_{US,12}$) et la résistance à la flexion ($f_{m,12}$) pour l'Angélique et le Gonfolo.
Relationships between modulus of elasticity obtained by the ultrasound method ($E_{US,12}$) and the bending strength ($f_{m,12}$) for the Angelique and the Gonfolo.

TABLEAU II

CORRÉLATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES OBTENUES EN FLEXION STATIQUE ET LES VALEURS DES PARAMÈTRES OBTENUS PAR DES MÉTHODES NON DESTRUCTIVES POUR L'ANGÉLIQUE ET LE GONFOLO

VARIABLES EXPLIQUÉES	VARIABLES EXPLICATIVES	COEFFICIENTS DE DÉTERMINATION		
		Angélique n = 77	Angélique n = 76*	Gonfolo n = 86
Module d'élasticité longitudinal statique (NF EN 408) $E_{stat,12}$	densité : ρ_{12}	0,34	*(0,35)*	0,51
	KAR *(proportion de défauts)*	0,06	*(0,07)*	0,16
	densité, KAR	0,34	*(0,35)*	0,56
	module ultrasonore : $E_{US,12}$	0,63	*(0,62)*	0,74
	module ultrasonore, densité	0,63	*(0,63)*	0,75
	module ultrasonore, KAR	0,67	*(0,67)*	0,76
	module ultrasonore, densité, KAR	0,69	*(0,69)*	0,77
	module dynamique : $E_{d,12}$	0,69	*(0,84)*	0,84
	module dynamique, densité	0,70	*(0,84)*	0,84
	module dynamique, KAR	0,70	*(0,85)*	0,85
	module dynamique, densité, KAR	0,70	*(0,85)*	0,85
Résistance à la flexion statique (NF EN 408) $f_{m,12}$	densité	0,20	*(0,21)*	0,19
	KAR	0,43	*(0,47)*	0,49
	module statique	0,20	*(0,18)*	0,40
	densité, KAR	0,49	*(0,52)*	0,57
	module statique, densité, KAR	0,52	*(0,55)*	0,64
	module ultrasonore	0,10	*(0,09)*	0,30
	module ultrasonore, KAR	0,50	*(0,53)*	0,61
	module ultrasonore, densité, KAR	0,50	*(0,53)*	0,61
	module dynamique	0,12	*(0,18)*	0,51
	module dynamique, KAR	0,47	*(0,55)*	0,65
	module dynamique, densité, KAR	0,49	*(0,56)*	0,65

* Les coefficients de détermination inscrits dans cette colonne ont été obtenus en retirant la pièce d'Angélique qui possède une grande fente longitudinale. En principe, si ce défaut avait été détecté après le séchage, cette pièce aurait été éliminée d'emblée de l'échantillonnage.

Une étude conduite par DIVOS et TANAKA (1997) sur de l'Epicea commun et du Pin montre qu'il est possible de prédire la valeur de $f_{m,12}$ avec un R^2 de l'ordre de 0,76. Pour atteindre un tel degré de prédiction, en plus du module dynamique (vibrations transverses), sont prises en compte la surface et la position des défauts sur la section de la pièce, pondérées par une fonction qui dépend du champ de contrainte théorique présent lors d'un essai de flexion. Des valeurs de R^2 proches de 0,90 sont possibles, en intégrant des variables supplémentaires telles que le module d'élasticité dynamique, obtenu par une sollicitation longitudinale (en percutant la pièce en bout).

La recherche des meilleurs estimateurs de la résistance à la flexion se heurte toujours au problème de la position et de la surface des défauts par rapport à la sollicitation. Si le sens de montage de la pièce dans la structure se fait aléatoirement, il faut alors considérer le cas le plus défavorable pour des raisons de sécurité : $f_{m,12}$ le plus bas entre les deux sens de flexion possibles.

Si l'on impose un sens de montage par rapport au plan de chargement, en principe le défaut le plus important est placé dans la zone comprimée ; on peut alors choisir le cas le plus favorable : $f_{m,12}$ le plus élevé entre les deux sens de flexion possibles. Dans tous les cas, des règles claires doivent être prescrites ; elles doivent conduire au meilleur choix des estimateurs et des méthodes de classement.

CONCLUSIONS

Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu trois techniques de classement non destructives (et non altérantes) afin d'en évaluer l'efficacité. Leur choix a été dicté sur la base d'un investissement humain et financier faible et une mise en œuvre simple :

- Le classement visuel s'appuyant sur les spécifications normatives concernant les sciages avivés élaborées par le CIRAD-Forêt sur la base des prescriptions de l'A.T.I.B.T. (Association Technique Internationale des Bois Tropicaux).
- Le classement mécanique basé sur la mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasonores. L'appareil utilisé est un appareil du commerce le « Sylvatest » (prix d'environ 40 kFF).
- Le classement mécanique basé sur l'analyse des vibrations naturelles transverses. Le dispositif utilisé est en cours de développement au CIRAD-Forêt (« Bing ») ; une première version est actuellement commercialisée (prix d'environ 30 kFF).

Il convient de souligner que la littérature, contrairement aux cas des résineux, est très pauvre sur les relations qui lient les propriétés mécaniques de pièces de bois feuillus à des paramètres obtenus par des méthodes non destructives.

Le classement visuel, tel qu'il est pratiqué actuellement en Guyane, n'est pas une technique efficace de classement pour les bois tropicaux utilisés en structure. Néanmoins, l'adoption d'une méthode de classement adaptée aux pièces de structure, calibrée pour chaque essence, qui utiliserait un critère tel que le KAR (mesure d'une proportion de défauts) ou un paramètre équivalent, auquel il conviendrait de combiner des estimations de défaut de fil et de fente longitudinale, pourrait s'avérer très efficiente pour classer les bois en fonction de leur résistance mécanique. En effet, la variabilité de la résistance à la flexion statique est expliquée entre 50 et 60 % en utilisant le KAR et la densité comme variables explicatives. Mais pour un classement qui puisse répondre aux exigences de l'Eurocode 5, il est nécessaire d'avoir également accès à une propriété de rigidité (le module d'élasticité). Pour cette raison, il est nécessaire d'opter pour une technique d'estimation adaptée aux exigences de l'entreprise.

Pour le module d'élasticité, la méthode « BING » est celle qui procure la meilleure estimation. Elle permet d'obtenir une prédiction de 7 à 15 % (sur le coefficient de détermination) supérieure à la méthode ultrasonore (« SYLVATEST »). Par ailleurs, elle fournit une valeur de module d'élasticité plus proche de la valeur obtenue par la méthode statique normalisée. Le fait d'ajouter d'autres variables prédictives telles que la densité ou le KAR n'améliore pas sensiblement la prédiction.

En ce qui concerne la résistance à la flexion, le module dynamique offre également une meilleure prédiction ; elle reste toutefois médiocre. La différence de prédiction est très marquée dans le cas du Gonfolo. Lorsque le KAR et la densité sont utilisés en outre comme variables prédictives, alors l'écart de prédiction est moins net entre les deux méthodes. Il faut insister sur le fait que ces paramètres expliquent, à eux seuls, une grande part de la variabilité observée sur la résistance à la flexion statique. De ce fait, l'emploi de l'une des deux méthodes non destructives comme variable explicative supplémentaire améliore peu la prédiction.

Pour des pièces de structure, le « coup de vent » (souvent présent dans certaines essences tropicales) est un défaut d'autant plus grave qu'il est très peu détectable aussi bien visuellement que par les méthodes non destructives. Il est donc nécessaire de poursuivre un effort de recherche dans la compréhension du déterminisme de ce défaut et les moyens de le détecter rapidement.

En fonction de l'espèce étudiée, la qualité de la prédiction des techniques non destructives est sensiblement différente ; celle-ci dépend essentiellement de la présence de certains types de défaut ou de singularité. En particulier, les coups de vent semblent altérer la qualité des prédictions.

D'un point de vue pratique, chacun des deux systèmes présente des avantages et des inconvénients. Ils nécessitent tous les deux une prise de dimension et de poids afin de déterminer la densité qui permet le calcul du module d'élasticité. Le « SYLVATEST » a comme avantages d'exister sur le marché et d'être parfaitement portable ; son principal inconvénient est l'utilisation de sondes qui nécessitent un positionnement parfait et oblige à préparer parfois un avant-trou afin d'améliorer le couplage entre la sonde et le bois. Le « BING » a comme avantages l'utilisation d'un matériel non spécifique (micro-ordinateur qui peut également servir à gérer les données), une simplicité de maniement ; il peut, en outre, fournir directement le module d'élasticité de la structure (le « SYLVATEST » indique localement le module d'élasticité de la matière) mais l'inconvénient le plus contraignant est de devoir poser la pièce testée sur des appuis élastiques. Ce système peut être utilisé sur chantier grâce à l'utilisation d'un micro-ordinateur portable.

Le système « BING » basé sur le principe de l'analyse des vibrations transverses naturelles présente un grand potentiel pour devenir un outil de classement efficace. Tout comme le Sylvatest, mais avec une évaluation supérieure du module d'élasticité, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, l'interprétation rapide des résultats, son utilisation possible par des non-spécialistes et sa généralisation à des pièces en dimensions d'emploi en font un outil de classement de choix.

Enfin, les études en cours au CIRAD-Forêt montrent qu'il est possible d'analyser le spectre de vibration obtenu par la méthode « BING » afin d'améliorer significativement la prédiction de la résistance à la rupture. ❐

Cette étude a été réalisée grâce à un financement D.D.E. de Guyane (Convention SPIOM/CIRAD – Arrêté N° 1597/D.D.E./I.I.D. 3B – en date du 23.08.1993).

▶ Henri BAILLÈRES
Gilles CALCHERA
Michel VERNAY
CIRAD-Forêt/Programme Bois

▶ Lionel DEMAY
O.N.F.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARCHER R. R., 1987.

Growth stresses and strains in trees, E. Timell éd. Berlin, Allemagne, Springer Verlag, Springer series in wood science, 240 p.

BECKER G., 1995.

Non-destructive evaluation of strength and stiffness of sawn timber from conifers and broadleaves using the natural vibration method. *In :* XX[e] Congrès mondial de l'IUFRO, 6-12 août 1995, Tampere, Finlande, 24 p.

BORDONNÉ P. A., 1989.

Module dynamique et frottement intérieur dans le bois mesurés sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Thèse en sciences du bois de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 109 p.

BOSTRÖM L., 1995.

Machine stress grading. Comparison of four different systems. SP report 49. Swedish National Testing and Research Institute, 52 p.

CASSAN P., 1995.

Caractérisation du module d'élasticité dans le bois par une méthode vibratoire en humidité variable : étude expérimentale. D.E.A. en Mécanique des matériaux. Université de Montpellier II, France.

CIRAD-Forêt, 1990.

La commercialisation des bois guyanais. Nogent-sur-Marne, France, CIRAD-Forêt, 24 p.

CURIE P., 1989.

Essais comparatifs pour la mesure du module d'élasticité. Rapport interne. Nogent-sur-Marne, France, C.T.F.T., 18 p.

DIVOS F., TANAKA T., 1997.

Lumber strength estimation by multiple regression. Holzforschung 51 (5) : 467-471.

EUROCODE 5, 1996.

Calcul des structures en bois. Partie 1.1. Règles générales et règles pour les bâtiments. Norme P21-711. Editions Eyrolles, Paris, France, 157 p.

GÉRARD J., 1994.

Contraintes de croissance, variations internes de densité et de module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les eucalyptus de plantation. Thèse en sciences du bois de l'Université de Bordeaux I, France, 160 p.

HAINES D., LEBAN J. M. L., HERBÉ C., 1996.

Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. Wood Science and Technology 30 : 253-263.

KOLLMAN F. F. P., COTE A. C., 1968.

Principles of wood science and technology. I. Solid wood. Berlin, Allemagne, Springer Verlag, 592 p.

PERTOSPER M., 1995.

Strength and stiffness of timber using conventional and dynamics methods. *In :* First European symposium on nondestructive evaluation of wood, University of Sopron, Hongrie, 24 p.

SANDOZ J. L.,1989.

Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology 23 : 95-108.

TIMOSHENKO, 1953.

Résistance des matériaux. 1[re] partie : théorie élémentaire et problèmes. Paris, France. Librairie polytechnique Ch. Béranger, 351 p.

TIMOSHENKO, 1961.

Théorie de l'élasticité. Paris, France Librairie polytechnique Ch. Béranger, 541 p.

RÉSUMÉ

CLASSEMENT MÉCANIQUE DES BOIS GUYANAIS DE STRUCTURE SELON TROIS TECHNIQUES NON DESTRUCTIVES

Il s'agit de comparer trois méthodes non destructives de classement mécanique, simples et peu onéreuses, sur des avivés en dimension d'emploi suivant des principes différents : classement visuel, mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (système SYLVATEST) et analyse modale (système du CIRAD-Forêt : BING). Les avivés (55 × 138 × 3 000 mm^3) proviennent de deux espèces de la forêt guyanaise les plus utilisées localement pour la construction : l'Angélique (*Dicorynia guianensis* Amsh., 77 pièces testées) et le Gonfolo (*Qualea* spp., 86 pièces testées). Sur la base du classement visuel pratiqué classiquement en Guyane, tous les choix sont représentés. Les propriétés de référence sont le module d'élasticité et la résistance obtenus par un essai destructif de flexion statique quatre points.

La comparaison des valeurs et/ou des classements obtenus révèle que le classement visuel n'est pas une technique efficace, la technique ultrasonore est une méthode de terrain pratique et que seule l'analyse des vibrations transverses remplit toutes les conditions pour devenir un outil efficient.

Par ailleurs, on observe que l'espèce agit sur la fiabilité de la prédiction en ce qui concerne les techniques non destructives et que, pour des pièces de structure, le « coup de vent » (fracture transversale provoquant une très faible résistance à la rupture) est un défaut d'autant plus grave qu'il est très peu détectable aussi bien visuellement que par les méthodes employées.

Mots-clés : Résistance à la flexion. Module d'élasticité. Ultrason. Vibration. Classement des bois. Bois tropical.

ABSTRACT

MECHANICAL GRADING OF GUIANESE STRUCTURAL TIMBER USING THREE NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES

This study compares three non-destructive, simple and inexpensive methods of grading lumber in structural size. The three methods are : visual grading, measuring the propagation speed of ultrasonic waves (SYLVATEST system) and transverse vibration analysis (CIRAD-Forêt BING system). The edged timber (55 × 138 × 3 000 mm^3) originates from two Guianese forest species that are the most widely used, locally, for building : Basralocus/Angelique (*Dicorynia guianensis* Amsh., 77 lengths tested) and Mandioqueira/Gonfolo (*Qualea* spp., 86 lengths tested). Based on the visual grading method traditionally used in French Guiana, every quality was represented. The reference factors are modulus of elasticity and bending strength obtained by a destructive static four-point bending test for this kind of species.

Comparison of the values and/or grades obtained shows that visual grading is not an effective method, that the ultrasonic technique is a practical field method, and that transverse vibration analysis alone meets all the criteria making it an effective grading method.

It is also noted that the species has an effect on reliable forecasting with regard to non-destructive techniques and that, for structural lengths, the « gust of wind » (transversal fracture giving rise to a very low resistance to compression failure) is all the more serious a defect in so far as it is not at all easy to detect, be it visually or using the other methods adopted at the present stage of developments.

Key words : Bending strength. Modulus of elasticity. Ultrasonics. Vibration. Wood grading. Tropical wood.

RESUMEN

CLASIFICACIÓN MECÁNICA DE LAS MADERAS GUYANESAS DE CONSTRUCCIÓN SEGÚN TRES TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

Se trata de comparar tres métodos no destructivos, simples y económicos, de clasificación mecánica, de tablas. Dichos métodos son : clasificación visual, medida de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas (sistema SYLVATEST) y análisis modal (sistema del CIRAD-Forêt : BING). Las maderas (55 × 138 × 3 000 mm^3) proceden de dos de las especies guyanesas más usadas localmente para la construcción : la Angélica (*Dicorynia guianensis* Amsh., 77 piezas probadas) y el Gonfolo (*Qualea* spp., 86 piezas probadas). Tomando como referencia la clasificación visual, practicada habitualmente en Guayana, se hallan representadas todas las categorías. Las propiedades de referencia son el módulo de elasticidad y la resistencia obtenidos en un ensayo destructivo de flexión estática de tipo « quatro puntos ».

La comparación de los valores y/o de las clasificaciones obtenidos revela que la clasificación visual no es una técnica eficaz, por este tipo de maderas que la técnica de ultrasonidos es un método de campo práctico y que, únicamente, el análisis modal cumple con todos los requisitos para convertirse en un instrumento eficaz.

Por otro lado, se observa que la especie influye en la fiabilidad de la predicción de las técnicas no destructivas y que, en las maderas de construcción, la fractura transversal llamada « ráfaga de viento » (que provoca una débil resistencia a la ruptura) es un defecto tanto más grave cuanto que es difícilmente detectable con los métodos aquí expuestos en el estado actual de desarrollo.

Palabras clave : Carga de ruptura. Módulo de elasticidad. Ultrasonido. Vibraciones. Clasificación de productos. Madera tropical.

SYNOPSIS

COMPARISON OF THREE NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES FOR MECHANICAL GRADING OF GUIANESE STRUCTURAL TIMBER

HENRI BAILLÈRES, GILLES CALCHÉRA, LIONEL DEMAY, MICHEL VERNAY

The most basic requirements for any material used in engineered construction are that it should have sufficient strength to guarantee the desired level of structural safety and sufficient rigidity to meet the stability needs and required serviceability criteria. The main disadvantage of timber as an engineering material is that it does not have consistent, predictable, reproducible and uniform properties. As a consequence each product has to be graded mechanically in order to meet the standard requirements such as European standards applicable on French Guiana structural timber. Grading of lumber based on Modulus of Elasticity (MOE) is widely used throughout the world. Construction lumber is stress graded to ensure reliability and fiability.

The aim of this study is to compare three samples to use and inexpensive non-destructive methods in order to evaluate their efficiency for grading lumber in structural sizes.

MATERIALS AND METHODS

The mateiral is from two French Guiana species, the most widely used for construction : Basralocus (*Dicorynia guianensis* Amsy., 77 beams) and Mandioqueira (*Qualea* spp., 86 beams). All qualities with respect to bisual assessment were selected.

The reference test is a static four-point bending test complying with European standards which provides the modulus of elasticity and the strength.

THE THREE NON-DESTRUCTIVE METHODS VALUED

Visual grading

The visual grading applied comes from the specifications of the ATIBT (*International Technical Association of Tropical Timber*). These specifications adapted to the French Guiana timber guarantee a stable level of quality based on defect proportion and type and standard dimensions.

Ultrasonic measurements (SYLVATEST system)

The speed of propagation of ultrasonic longitudinal waves is measured on the longitudinal axis of the beam. This speed is linked to the longitudinal modulus of elasticity.

Transverse vibrations analysis (BING system)

After a percussion on a simply supported beam, a digital recorder piloted by a PC performs a Fast Fourier Transform of the sound wave. As a linear expression (approximate solution of the Timoshenko beam equation) links every eigenfrequencies to the mechanical parameters, the MOE and the shear modulus are quickly computed.

VALUATION OF MODULUS OF ELASTICITY (MOE)

The visual method is not efficient for predicting MOE. There are good correlations between dynamic MOE (BING and SYLVATEST system) and static MOE (R^2 around 0,7), the transverse vibration method gives the best results. Multiple parameter regression analysis with dynamic MOE, density and a parameter link to the proportion of defect (KAR : Knot Area Ratio) as predictors do not give better results. In all cases, the evaluation is better for Mandioqueira than for Basralocus.

VALUATION OF BENDING STRENGTH (BS)

The visual method helps to grade the lumber but with a very important variability. The correlations between dynamic MOE and BD are mediocre and not sufficient to grade on strength basis. The multiple parameter regression analysis with density and KAR as predictors gives a good prediction of BS, as good as dynamic MOE and KAR as predictors.

CONCLUSIONS

- The visual assessment adopted is not a good method for grading tropical structural timber, but the use of a criterion such as an appropriate KAR could be very interesting for accurately predicting the Bending Strength. This kind of criteria seems to be essential for assessing BS.
- The MOE has to be measured with sufficient precision in order to come up to standard and ensure a good valuation of BS.
- Transverse vibration analysis as great potential for becoming an efficient grading tool.
- The ultrasound technique is not as efficient as transverse vibration analysis. Nevertheless it is a highly practical technique for field measurements.
- The prediction quality differs with the species studied.
- For these two species, especially for Basralocus, local transversal fractures (compression failures) are a serious blemish for structural timber because they generate a weakness in the beam and cannot be detected by visual and non-destructive methods.

The major challenge for the future of structural lumber is to increase the level of prediction of Bending Strength. With this aim in view, analysis of the vibration spectrum is one way that would provide a simple and inexpensive tool. This is one of the research themes of CIRAD forest product laboratories.