

Caractérisation du matériau bois de structures utilisé en construction par la méthode vibratoire : une technique de mesure non destructive

Abdoulaye ASSOUDO*, C. Alphonse QUENUM, C. Toussaint KOSSOU, Naïmoulaye CHITOU, Emile A. SANYA, Gérard DEGAN et C. Edmond ADJOVI

Laboratory of Energetic and Applied Mechanics (LEMA), EPAC, 01 BP 2009 Cotonou, University of Abomey-Calavi, Benin

* Correspondance, courriel : assoudo@gmx.fr

Résumé

Le présent article décrit une nouvelle méthode non destructive de caractérisation des poutres de structures en bois. Basée sur l'excitation par vibrations, la méthode développée est fondée sur la théorie de Bernoulli et Timoshenko. Elle a été appliquée aux types de bois lamellé-collé, Laminated Veneer Lumber ainsi qu'aux composites en I, pour les règles de conception, de calculs de dimensionnement et de suivi de leur endommagement. Sur la base d'un vaste programme expérimental de caractérisation des poutres de ces différents types de bois, la comparaison des modules élastiques a été effectuée entre les valeurs estimées par la méthode vibratoire et celles fournies par la méthode statique fondée sur la mesure de la flèche relative. Les résultats obtenus mettent en évidence que la mesure du module d'élasticité par la méthode dynamique non destructive proposée peut être retenue pour caractériser les poutres en vue de la détermination des niveaux de charge des essais de comportement différé et de la durée de vie, deux facteurs phénoménologiques très importants qui, à ce jour, ne sont pas assez clarifiés dans les règles régissant les calculs des poutres à base de bois de grandes dimensions.

Mots-clés : *vibrations, poutres de structures, durée de vie, flexion circulaire.*

Abstract

Characterization of structural wooden beams by vibratory method : a non-destructive technique of measurement

This paper describes a new non-destructive characterization method for structural wooden beams. Based on vibrations exciting, the developed method is based on Bernoulli and Timoshenko theory. It has been applied to the lamellate-stuck types, Laminated Veneer Lumber and I composites types, for their design rules, calculations and damage monitoring. Based on an extensive experimental program of beams characterization for such different wood types, comparison of elastic modulus was made between estimated values from vibrations method and those provided by the static method funded on relative arrow or flich measurement. The obtained results show that elasticity modulus measurement with the proposed non-destructive dynamic method can be used for wood beams characterization, in view of determination of loading levels during delayed behavior testing and lifespan studying, two very important phenomenological factors that, to date, are not sufficiently clarified in the governing rules for larger wood beams calculation.

Keywords : *vibrations, structures' beams, lifespan, circular bending.*

1. Introduction

Le bois est un matériau composite à caractère très hétérogène, poreux et fortement hygroscopique. Son comportement mécanique est orthotrope, dépendant considérablement de l'essence, de son organisation cellulaire mais aussi de l'âge du matériau, de sa teneur en eau, de sa rétractibilité et enfin de sa densité. Autrement dit, les propriétés élastiques du bois sont fortement conditionnées par son état physique, ce qui suscite beaucoup plus encore aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches scientifiques, notamment sur l'étude et la tenue de comportement mécanique des pièces de bois en vue d'effectuer un choix judicieux pour la réalisation de toutes structures ou ossatures travaillantes [1] Les caractéristiques mécaniques du bois sont difficiles à déterminer en raison de la dispersion importante des résultats, provenant des variations de qualité dans la même essence, pour le même type d'arbre, dans la même pièce [2] Le caractère anisotrope du bois rend nécessaire la recherche des propriétés pour chaque direction d'effort par rapport à celle des fibres.

Il en résulte que, les calculs doivent prendre en compte la disposition de fibre du bois par rapport aux sollicitations appliquées [3] Aujourd'hui, la conception des structures, conforme à une approche moderne de la sécurité, suscite un certain nombre de problèmes liés à l'utilisation du bois dans le génie civil. La rédaction des nouvelles règles européennes expérimentales de calcul des structures en bois ENV-1995 (Eurocode 5), propose des règles essentiellement basées sur la méthode classique de détermination des modules élastiques : celle reposant sur la mesure de la flèche relative des essais statiques des poutres de grandes dimensions. Or, plusieurs études ont été menées sur les méthodes vibratoires dont les énormes potentialités sont utilisées avec succès par nombre d'auteurs [4,5].

En effet, ces travaux ont permis de mettre en évidence les potentialités des vibrations linéaires à titre de méthodes non destructives pour la caractérisation des matériaux. Les composites en bois également n'ont pas manqué d'en bénéficier comme cela a été confirmé tout récemment avec les travaux de [6] relatifs à la détermination des caractéristiques élastiques. L'emploi de cette technique permet d'évaluer les modules élastiques des poutres de structure, sans altérer celles-ci par un chargement pouvant leur causer un dommage, ce qui fait d'elle une méthode d'essais non destructive. L'un des intérêts principaux de cette méthode d'évaluation des caractéristiques est qu'elle présente une excellente reproductibilité des résultats, une facilité de mise en œuvre et une rapidité d'exécution.

Le présent article vise à montrer que, pour la caractérisation des poutres de structures à base de bois de types Laminated Veneer Lumber et composites de section en forme de I), le modèle Timoshenko, utilisant les spectres de fréquences propres issues des vibrations naturelles pour la détermination des modules d'élasticité, plus élaboré que celui de Bernoulli, peut être exploité dans les règlements de calcul des structures tel l'Eurocode 5. Aussi, montre-t-on, par cette méthode originale, que la variation du taux d'humidité du matériau bois n'a aucun impact sur les valeurs mesurées des modules d'élasticité !

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

Les poutres de structures en LVL (kerto[®]-S) de dimensions $45 \times 100 \times 2100 \text{ mm}^3$ constituent les éprouvettes ou échantillons des matériaux à base de bois sur lequel ont porté tous les tests réalisés et décrits dans cet article.

2-2. Essais dynamiques

La méthode vibratoire d'évaluation non destructive est basée sur le principe de l'analyse spectrale des vibrations naturelles de flexion générées par un impact à l'extrémité d'une éprouvette maintenue par des appuis souples. Dans cette série d'essais, seules les vibrations de flexion sur chant nous ont intéressées. Ce mode d'excitation en vibrations de flexion sur chant est comparé aux autres modes d'obtention des caractéristiques mécaniques connus dans la norme française ou européenne. En effet, on peut en général, obtenir les modules élastiques dynamiques correspondants à diverses formes de sollicitations de charge à partir de différents modes d'excitation en vibrations comme ceux indiqués sur les dispositifs de mesures vibratoires présentés dans la figure 1. Après l'excitation en vibration de la charge (ici les poutres), l'analyseur déclenche automatiquement l'enregistrement du signal délivré par l'accéléromètre et calcule la transformation de Fourier discrète du signal.

Pour réaliser ces mesures de vibrations, nous avons utilisé :

- un marteau d'impact, « désignation B et K 8202 », ayant un capteur de force incorporé ;
-
- un accéléromètre, « désignation B et K 4390 », dont la fixation est obtenue au moyen d'une pâte en cire d'abeilles n'absorbant pas les fréquences de résonance.
-
- un micro-ordinateur muni du logiciel « OR762 » de traitement du signal qui permet aussi de stocker les données des signaux.

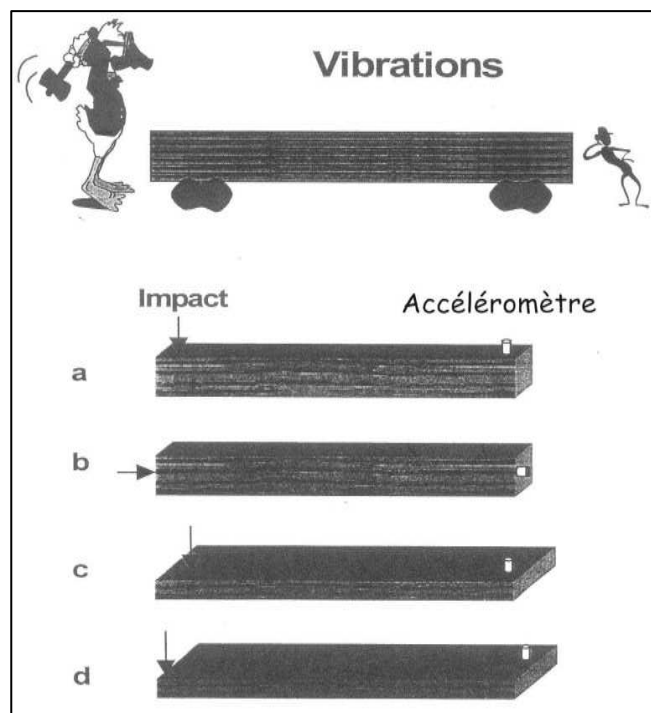


Figure 1 : *Dispositions des différents modes de sollicitations et d'excitation en vibration des poutres pour mesurer les caractéristiques mécaniques dynamiques.*

a : vibrations de flexion sur chant,

b : vibrations longitudinales

c : vibrations de flexion à plat,

d : vibrations de torsion.

Un dépouillement, basé sur l'analyse en modes propres de vibrations, permet, à l'aide de la théorie développée par Bernoulli et Timoshenko, de déterminer les modules d'élasticité d'Young. La méthode de Bernoulli et Timoshenko repose essentiellement sur la résolution de l'équation aux dérivées partielles du mouvement. La quintessence de la procédure dans cette méthode est présentée dans les paragraphes qui suivent. En effet, l'équilibre des efforts appliqués à l'élément de la poutre compris entre les abscisses x et $x + dx$ est déterminé aux moyens des bilans effectués de la façon ci-après décrite:

- Pour les forces extérieures :

$$V(x + dx) - V(x) = \rho S dx \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -\frac{\partial V}{\partial x} dx \Rightarrow \rho S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad (1)$$

- Pour les Moments des forces extérieures :

$$M(x + dx) - M(x) = \rho I dx \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} = \frac{\partial M}{\partial x} dx - V dx \Rightarrow \rho I \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} = \frac{\partial M}{\partial x} - V \quad (2)$$

Equations dans lesquelles les variables ont les significations suivantes : V est l'effort tranchant, M le moment fléchissant, $U(x, t)$ le déplacement et I le moment d'inertie de la section S .

En résistance des matériaux, l'effet d'inertie de rotation mis en évidence par Rayleigh et l'effet de cisaillement relevé par Timoshenko permettent d'établir les relations respectives ci-après:

$$\frac{\partial \beta}{\partial x} = \frac{M}{EI} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\partial U}{\partial x} \quad (4)$$

En procédant à l'élimination des variables V , M et β des équations précédentes, on peut accéder à l'équation du mouvement de l'onde sollicitant la poutre:

$$EI \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

L'équation aux dérivées partielles où $U(x, t) = F(x) \sin(2\pi f_k t + \phi)$ est la description de la trajectoire du mouvement de l'onde naturelle. La solution à variables séparables, de l'équation ci-dessus devient un nouveau système (cas unidimensionnel suivant l'axe Ox) à résoudre:

$$\frac{d^4 F(x)}{dx^4} - \frac{\rho S}{EI} 4\pi^2 f_k^2 F(x) = 0 \quad (6)$$

où f_k est la fréquence de la vibration au $k^{ème}$ rang.

En désignant par $a^4 = \frac{\rho S}{EI} 4\pi^2 f_k^2$ on écrit l'équation (6) sous la forme :

$$\frac{d^4 F(x)}{dx^4} - a^4 F(x) \quad (6')$$

La solution générale de l'équation (6) ou (6') est donnée, en fonction des quatre racines $\pm a$ et $\pm ia$ de l'équation caractéristique, sous la forme simplifiée:

$$F(x) = C_1 \cdot \cos(ax) + C_2 \cdot \operatorname{ch}(ax) + C_3 \cdot \sin(ax) + C_4 \cdot \operatorname{sh}(ax) \quad (7)$$

Le dispositif, utilisé dans les essais dynamiques réalisés, fait apparaître des conditions limites suivantes dans le cas de la flexion:

$$\begin{array}{llll} V = 0 & \text{en} & x = 0 & \text{et} & x = L \\ M = 0 & \text{en} & x = 0 & \text{et} & x = L \end{array}$$

L'introduction de ces conditions aux limites de type vibration, se traduisant par des efforts tranchants et les moments nuls aux extrémités de la poutre, amène à écrire que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 F(x)}{dx^2} = 0 \\ \frac{d^3 F(x)}{dx^3} = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \text{en } x = 0 \text{ et } x = l \quad (8)$$

Ces conditions aux limites conduisent à quatre équations linéaires des quatre constantes C_1, C_2, C_3 et C_4 de la solution générale (7). Un tel d'équations système n'a de solution non triviale que si son déterminant est nul, ce qui équivaut à la condition calculée :

$$\cos(a \cdot l) \times ch(a \cdot l) = 1 \tag{9}$$

En changeant les notations, pour plus de commodité, en posant que $m_k = a_k \cdot l$ ou encore $X_k = a_k^4$, on obtient alors, pour chaque mode k de vibration :

$$4\pi^2 f_k^2 = X_k \frac{EI}{\rho S l^4} \tag{10}$$

L'équation (7) a une infinité de racines m_1, \dots, m_k distinctes dont les calculs donnent, pour les trois premières:

$$m_1 = a_1 \cdot l = 4,73 \qquad m_2 = a_2 \cdot l = 7,853 \qquad m_3 = a_3 \cdot l = 10,995 \tag{11}$$

A partir du 3^{ème} mode de vibration, on peut approximer les racines de l'équation (7) par :

$$m_k = (2k+1) \frac{\pi}{2} \tag{12}$$

Si, pour une poutre flottante, on peut identifier la fréquence f_k d'un de ces modes propres et connaître l'ordre k de ce mode, alors on peut déduire la valeur du module d'élasticité dans la direction Ox par la relation:

$$E = 4\pi^2 \rho l^2 \frac{S l^2 f_k^2}{I X_k} \tag{13}$$

La formulation de Timoshenko ajoute à la précédente les déformations de cisaillement dans le plan de flexion. La part de cisaillement dans la déformation totale devient importante même dans les poutres élancées pour des modes vibratoires de rang élevé. La loi de comportement de la déformation au cisaillement s'écrit :

$$\beta = \frac{V}{GKS} \tag{14}$$

L'équation du mouvement, en fonction du déplacement ($U(x,t)$), s'écrit alors:

$$\frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + \rho \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{KG} \right) \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2}{KGE} \frac{\partial^4 U}{\partial t^4} + \frac{\rho S}{EI} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \tag{15}$$

Le développement de cette équation a été effectué par Le Nizerhy et al. (1981) et Bordonne (1989) et la solution obtenue présentée sous la formulation ci-après:

$$E = 4\pi^2 \rho l^2 \frac{f_k^2}{X_k \alpha} \left[1 + \alpha [\theta^2(m_k) + 6\theta(m_k)] + \frac{\alpha E}{KG} [\theta^2(m_k) - 2\theta(m_k)] \right] \tag{16}$$

où : $\theta(m) = m \frac{tg(m) \times th(m)}{tg(m) - th(m)}$ et $\theta^2(m) = m^2 \frac{tg(m) + th(m)}{tg(m) - th(m)}$

En posant:

$$F_1(m_k) = \theta^2(m_k) + 6\theta(m_k) \qquad \text{et} \qquad F_2(m_k) = \theta^2(m_k) - 2\theta(m_k)$$

Les paramètres caractéristiques de chaque mode vibratoire, pour les différentes approximations, sont donnés dans la suite de cet article et le module d'élasticité E_l se calcule, selon Timoshenko, à l'aide de la relation suivante :

$$E = 4\pi^2 \rho l \frac{f_k}{X_k \alpha} \left[1 + \alpha F_1(m_k) + \alpha \frac{E}{KG} F_2(m_k) \right] \tag{17}$$

avec : $\alpha = \frac{h^2}{12l^2}$ et $X_k = m_k^4$

où ρ est la masse volumique du LVL, E le module d'élasticité du matériau supposé homogène, G le module d'élasticité de cisaillement, K un facteur de forme encore appelé coefficient de la section réduite (généralement égal à $5/6$ pour les sections rectangulaire), β l'angle que fait la normale à la section en mouvement par rapport à l'axe neutre et $\cos(a_k l) \times ch(a_k l) = 1$ où K_k racine positive de l'équation.

La flexion circulaire ou à quatre points, dans le cas des mesures des propriétés mécaniques ou de caractérisation directe des poutres, présente l'avantage de réduire les déformations de cisaillement. L'Eurocode 5 admet l'hypothèse de négliger la déformation au cisaillement dans cette configuration d'essai.

Lors d'un essai de vibration, lorsque l'on néglige les déformations de cisaillement, on fait ainsi l'hypothèse que toute la section droite et plane de la poutre reste non seulement plane, mais perpendiculaire à l'axe neutre au cours de son mouvement [7]. Or, il existe en tout point une contrainte de cisaillement qui correspond, à l'échelle d'une section droite, à l'effort tranchant $V(x, t)$. Pour le modèle de Timoshenko, les deux premières fréquences propres des vibrations en flexion sur champ sont prises en compte ; ce qui a permis le calcul des différents modules dynamiques E et G .

2-3. Essais statiques

Les poutres sont soumises à une flexion quatre points connue aussi sous le nom de flexion circulaire. Les essais ont été réalisés sur un bâti du Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux de l'Université de Bordeaux 1 équipé d'un vérin de capacité quinze tonnes-force. Un capteur de force, placé entre l'extrémité du vérin hydraulique et l'axe du chevêtre, permet l'enregistrement des forces par l'entremise d'un dispositif d'acquisitions comme indiqué dans la **Figure 2**.

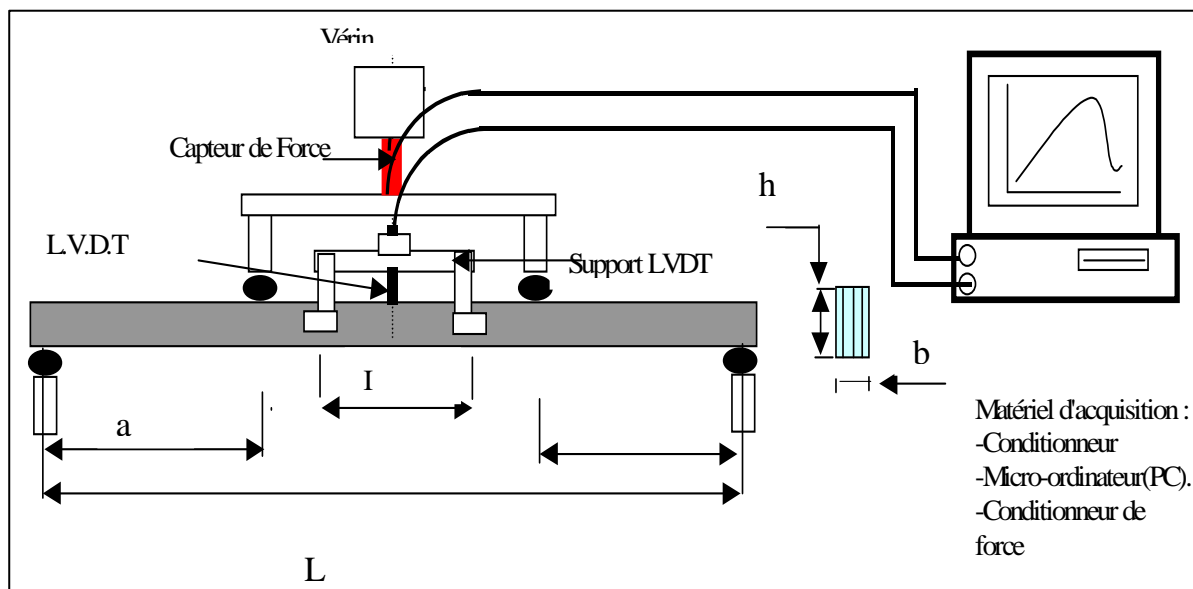


Figure 2 : Dispositif expérimental dans les mesures en essais statiques

L : portée de 2000 mm,

l : mesure relative de 480 mm

a : longueur entre les appuis extérieurs et les points de chargement est égale à 675 mm.

h : la hauteur de la poutre,

b : la largeur de la poutre

L'entraxe des appuis extérieurs est réglé pour toutes les poutres à tester d'une portée L de 2000 mm. Les appuis centraux sont à 650 mm. Les expériences de mesure ont été effectuées en suivant le protocole des essais recommandé par la norme EN408-95. Dans ces expérimentations, deux grandeurs mécaniques sont essentiellement intéressantes. Il s'agit de :

- la mesure du module d'élasticité global (E_{stat}) également appelé (MOE) obtenu à partir de la flèche absolue,
- la mesure du module de rupture (σ) désigné aussi par (MOR) calculé à partir des hypothèses de la Résistance des Matériaux.

Pour déterminer la valeur de la flèche, le capteur de déplacement, de type Linear Variable Differential Transformer, est fixé sur un support tel qu'indiqué sur la **Figure 2**. La flexion quatre points permet d'appliquer, entre les deux appuis intérieurs de l'éprouvette, un état de flexion pure. L'effort tranchant étant nul, les fibres du bois sont sollicitées en traction simple à la partie basse en dessous la ligne moyenne ou alors en compression simple au-dessus du même axe de la ligne moyenne. La durée adoptée dans les essais est celle préconisée par la norme qui, pour un essai instantané, va de 2 à 5 minutes pour les poutres de hauteur à 100 mm. Le taux d'humidité des poutres testées est considéré constant pendant la campagne des essais, bien que l'expérimentation ait duré deux semaines pendant une période sans fluctuations notables du climat environnant.

Un chargement en trois cycles a été effectué pour estimer l'effet de la charge/décharge sur le calcul du module. Le système d'acquisition enregistre pendant l'essai les forces et les déplacements des courbes obtenues. D'après la norme EN408-95, la charge appliquée, pour la détermination des modules d'élasticité, ne doit pas dépasser 30 % de la force de rupture instantanée, à teneur en eau équivalente, pour rester dans la limite élastique du bois.

3. Résultats

3-1. Résultats préliminaires des essais statiques

L'énergie de dissipation, due aux frottements internes du matériau, est calculée à partir de la surface de l'hystérésis découlant de la charge et décharge. La **Figure 3** montre que cette énergie est négligeable. Le calcul du module est effectué sur l'ensemble des points de mesure sans distinction.

3-2. -Résultats expérimentaux des essais dynamiques

Nous avons appliqué la méthode non destructive, exploitée sous les deux formes (Bernoulli et Timoshenko), pour caractériser 97 poutres LVL. Les valeurs des modules dynamiques obtenues sont résumées dans le **Tableau 1**.

Les courbes obtenues sont linéaires. Ces résultats confirment que les poutres LVL ont effectivement déployé un comportement élastique linéaire. Par ailleurs, lorsque la courbe de la force appliquée en fonction du déplacement est connue, la pente est alors égale à la raideur du matériau calculée par la relation:

$$\delta = \left| \frac{\Delta F}{\Delta w} \right| \tag{18}$$

où δ est la pente de la droite de régression linéaire, $\Delta F = F_2 - F_1$ est un accroissement de la force exprimée en Newton et $\Delta w = w_2 - w_1$ est l'accroissement du déplacement correspondant (pris en millimètres).

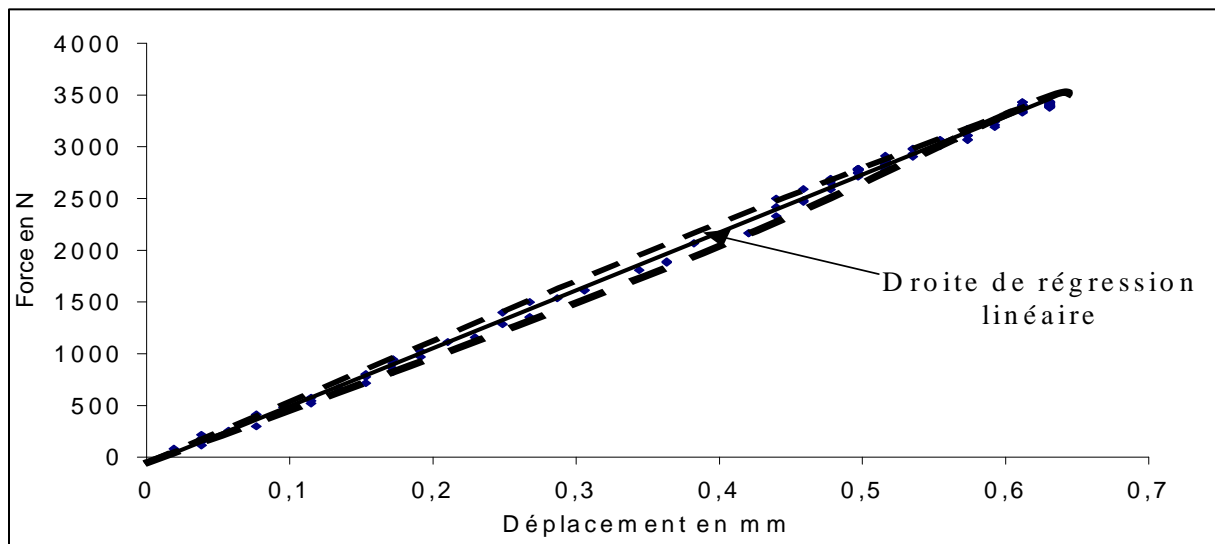
Tableau 1 : Résultats de caractérisation des modules d'élasticité des poutres LVL par la méthode de vibrations

Lots n°	Nombre de poutres dans le lot	Modules d'élasticité	Densité (ρ , kg/m ³)	E _{dyn} (MPa)		G _{dyn} (MPa)
				Méthodes de détermination :		
				Bernoulli	Timoshenko	
1	32	Moyenne	517	12800	13500	850
		Ecart type	7	488	544	91
		CV (%)	1	4	4	10
2	35	Moyenne	522	12000	13000	800
		Ecart type	8	733	742	110
		CV (%)	2	6	6	13
3	30	Moyenne	520	12400	13000	700
		Ecart type	5	628	706	140
		CV (%)	1	5	5	20

Le module d'élasticité en flexion E ou MOE est donné par la formule :

$$E = \frac{a \times l_1^2}{16 \times I} \times \left| \frac{\Delta F}{\Delta w} \right| \quad \Delta E = \pm 0,2 \text{ GPa} \quad (19)$$

dans laquelle, l_1 est la longueur du support du capteur LVDT représentant la longueur de base de mesure de la flèche ($l_1 = 480$ mm), I le moment quadratique de la section droite des poutres en LVL testées, a , la distance entre l'appui extérieur du bâti et l'appui intérieur de la poutre (dans notre configuration de charge : $a = 675$ mm).

**Figure 3 : Evolution de la flèche en fonction de la charge appliquée.**

3-3. Résultats expérimentaux des essais statiques

Une dispersion des points d'acquisition des forces est enregistrée au début de chaque essai. Les réponses des sollicitations des charges, lors des décharges, présentent aussi une petite irrégularité liée au fait que le mécanisme de commande est hydraulique.

Pour résoudre ces problèmes de détermination des modules d'élasticité, nous avons retenu les valeurs suivantes pour les fonctions F_1 et F_2 :

$$F_1 = 10\% \text{ de } F \text{ (force maximale appliquée).}$$

$$F_2 = 90\% \text{ de } F \text{ (force maximale appliquée).}$$

Tableau 2 : Résultats de détermination des modules d'élasticité des différents lots de poutres par la flexion quatre points

MOE statique	Lot n°1	Lot n°2	Lot n°3
Nombre de poutres	24	29	20
Moyenne en MPa	12900	12500	12950
Ecart type en MPa	909	908	582
CV (%)	7	7,3	4

4. Discussion

4-1. Analyse des résultats globaux

Les valeurs des modules élastiques globaux obtenues pour les trois lots de poutres, par la méthode statique standard ainsi décrite en respectant la norme EN408-95, ont été comparées aux modules dynamiques obtenus par la méthode non destructive.

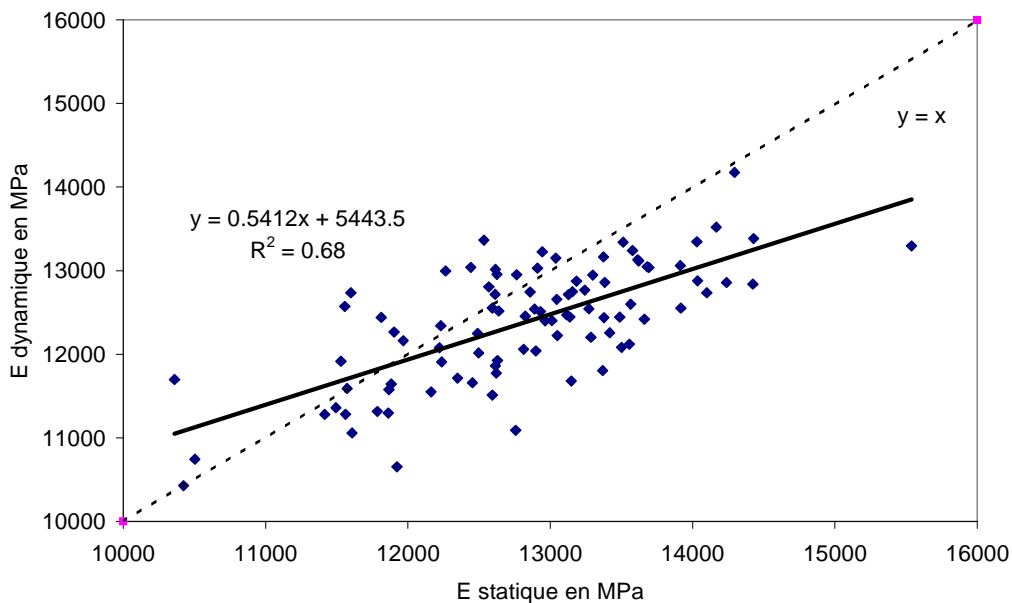


Figure 4 : Corrélation des modules statiques et dynamiques (module vibratoire déterminé par la méthode de Bernoulli) de toutes les poutres LVL testées.

La comparaison, entre les valeurs des modules élastiques dynamiques et celles statiques, a été effectuée sur toutes les poutres testées. On peut remarquer que l'écart type des résultats obtenus par la méthode vibratoire est légèrement inférieur à celui issu des valeurs fournies par la flexion statique.

Les essais vibratoires sont en effet plus reproductibles malgré que les essais de plusieurs lots de poutres soient menés pendant différentes saisons. De plus, à travers ces expériences menées, il est aisé de constater que, les deux méthodes de mesure des modules d'élasticité, par la vibration basée sur les théories de Bernoulli et Timoshenko d'une part, et par la méthode statique de l'autre, ont révélé que cette dernière (i.e. méthode statique) s'avère être lourde et onéreuse à mettre en œuvre.

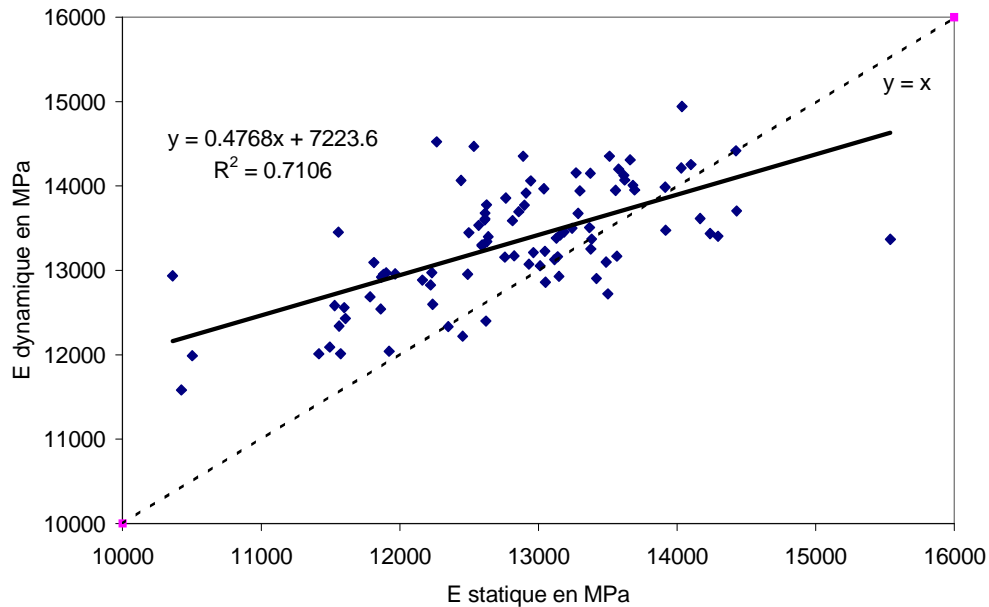


Figure 5 : *Corrélation des modules statiques et dynamiques (formulation de Timoshenko) de toutes les poutres testées.*

4-2. Effets de l'humidité sur les modules élastiques

Pour vérifier l'impact de l'humidité sur les modules d'élasticité, nous avons étudié le comportement des poutres LVL de deux sections : 45 x 100 et 45 x 150 mm² à un essai de vibration. Ces poutres ont été préalablement conditionnées en étuve ou en extérieur à des valeurs de teneurs en eau respectives de W = 9%, 11%, 12%, 13,4%, 14,5% et enfin 17%. Les teneurs en eau moyennes des poutres sont obtenues en raison des variations des saisons, par la pesée des cubes de 2 cm d'arête, prélevés dans la zone centrale d'une poutre conditionnée et appartenant au même lot. Les mesures des caractéristiques mécaniques, le module d'élasticité ont été obtenus par la méthode vibratoire décrite précédemment. Les résultats expérimentaux des modules d'élasticité, à différentes teneurs moyennes en eau de chaque saison, sont présentés dans le tableau 3 pour la petite section.

Tableau 3 : *Modules d'élasticité de bois LVL obtenus à différentes teneurs en eau*

Mois	Section (mm ²)	E (MPa)	E à 5% (MPa)	Nombre d'éprouvettes	CV (%)	W (%)
Mars	45 x 100	12800	12200	30	4	9
Juin		12300	10800	30	7	15
Août		11600	11000	32	3	14
Octobre		13100	12200	32	4	11
Décembre		12800	12100	32	5	12
Février		12400	11300	32	5	17

Les paramètres de trois distributions statistiques ont été identifiés : la loi normale, la loi log-normale et la loi de Weibull. Sur la figure 6, la distribution des points expérimentaux est tracée en fonction des fréquences cumulées superposée de la loi de Weibull à deux paramètres. On peut y noter, avec satisfaction, que les résultats obtenus donnent de bons coefficients de corrélation pour l'ensemble des essais effectués et confirment ceux issus des travaux de plusieurs auteurs [8-10].

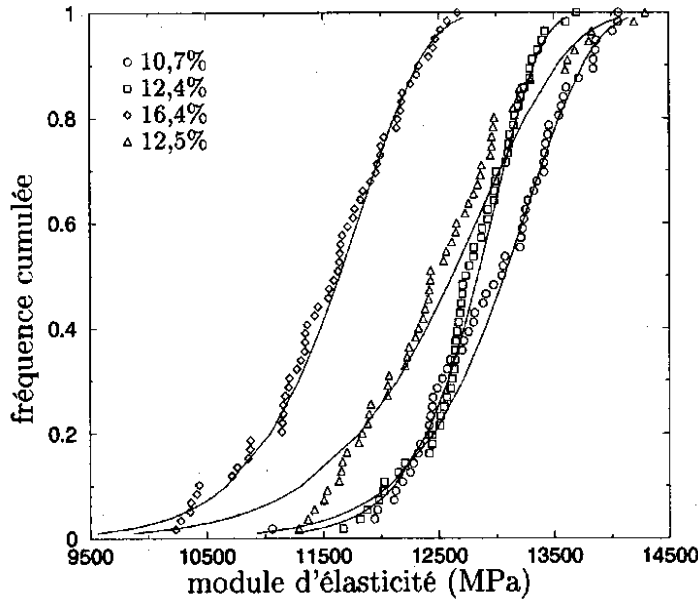


Figure 6 : Distribution en fréquences cumulées des points expérimentaux et selon la loi de Weibull des modules d'élasticité pour différentes teneur en eau du bois obtenue.

Dans le cas où la loi de Weibull est à deux paramètres, alors la probabilité de rupture s'écrit :

$$\Gamma(\sigma) = 1 - \exp \left[-Ac \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m_c} \right] \quad \text{si } \sigma > 0, \quad (20)$$

et $\Gamma(\sigma) = 0$ si $\sigma \leq 0$.

Une observation intéressante, confirmant plusieurs études [9,11-13] dont notamment le projet européen AIR 2 CT94-1057, reste celle qui permet de dire que, le module élastique des poutres LVL n'est pas dépendant des valeurs d'humidité appliquées dans les limites de cette étude: entre 9 et 17%.

5. Conclusion

Les résultats des mesures de modules montrent que la moyenne des modules dynamiques obtenus par le modèle de Bernoulli est sous-estimée par rapport à celle des modules obtenus par la méthode standard de flexion. En revanche, la moyenne des modules dynamiques obtenus par la formulation de Timoshenko est sensiblement surestimée de 5% par rapport à celle des modules statiques des poutres LVL. L'obtention des modules dynamiques, par la procédure du modèle de Timoshenko, tient compte du cisaillement supposé négligeable dans l'application de la méthode standard de flexion quatre points. On peut aussi dire que la surestimation de ce modèle vient du fait de la prise en compte des harmoniques du second rang de la fréquence propre. Dans les deux cas, les modules dynamiques sont moins dispersés (coefficient de variation plus faible) que ceux fournis par la méthode statique. La valeur du coefficient de corrélation entre les deux

grandeurs mesurées est de $R^2=0,68$, une valeur bien meilleure à celle rencontrée dans les travaux similaires sur le même matériau LVL par la méthode statique attestant ainsi de la bonne convenance de la méthode développée.

Références

- [1] - Meite M., Laanaa A., Famiri A., Yeznasni A., Chergui M., El Ghorba M., Ziani M., Etude de l'influence des propriétés physiques sur le comportement mécanique des bois de pin maritime et de pin d'Alep en vue de l'application à l'énergie éolienne. *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda*, (2007) pp: 61– 65
- [2] - Toussaint P., 2011, Application et modélisation du principe de la précontrainte sur des assemblages de structure bois. Thèse de doctorat, Université Henry Poincaré, Nancy 1.
- [3] - Molimard J., Vautrin A., Béraud J.M., Henrat P., 2007. Contribution à la conception d'une structure en matériaux composites en milieu industriel. 18^e Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Août 2007.
- [4] - Assoudo A, 2001, Comportement différé des poutres composites en bois en dimensions structurales. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.
- [5] - M. Kharoubi , El Mahi, Assarar M., Fatmi L., El Guerjouma, Analyse vibratoire de composites stratifiés endommagés. JNC 16, Toulouse (2009)
- [6] - Brancheriau L., 2011. Sarrebruck: Ed. Universitaires européennes, 240 p.
- [7] - Dill-Langer G., Aicher S. 1997, Damage modeling of glulam in tension perpendicular to the grain in variable environment, *CIB W18 A Meeting, Vancouver*.
- [8] - Ranta-Maunus A, Hanhijärvi A, 1996, Computational analysis of the effect of transverse anisotropy and annual ring pattern in cross sections of curved glulam beams on the size effect of strength. European Workshop on Application of statistics and probabilities in Wood Mechanics, Bordeaux.
- [9] - Bazant Z.P, 1985, Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature, *Wood and science technology*, vol19, p159-177.
- [10] - Madsen B., 1992, Structural behavior of timber (Chapter 6: Duration Of Load). *Timber Engineering LTD, Canada*.
- [11] - Le Govic C., 1992, Panorama des travaux scientifiques mondiaux sur le fluage du bois sans défauts (Effet de la température et de l'humidité), CBTA Paris
- [12] - Moutee Mohssine, 2006, Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage. Thèse de Doctorat (PhD) de l'Université de Laval QUEBEC
- [13] - Lebatteux, M. 1997, Durée de vie de poutres en bois reconstitué soumises à un environnement climatique naturel. *Thèse de l'Université Bordeaux I*.
- [14] - Casagrande S., 1998, Evaluation non destructive par une analyse vibratoire des performances mécaniques des bois reconstitués. Thèse de l'Université de Bordeaux I
- [15] - Wood I. W., 1951, Relation of strength of wood to duration of load Rep. 1919, USAD, Forest service, Forest products Lab, Madison, Wisconsin.
- [16] - Hoffmeyer P., 1990, Failure of wood as influenced by moisture and load duration 1989-1990 CEC contract MAIB-0042-DK – Department of Civil Engineering – The Technical University of Denmark
- [17] - Jourdain C., Valentin G. 1997, Fracture mechanisms of a wooden notched beam during long term tests in natural climate, *COST Action E8 Workshop on Wood Water Relations, Copenhagen*
- [18] - Project AIR26CT94-1057, 1997, Duration of load effect on different sized timber beams, *Consolidated Progress Report and Final Report - LRBB*