

Article original

Validation expérimentale d'un outil de conception mécanique des contreplaqués

F Bos, D Guitard

*Laboratoire de rhéologie du bois de Bordeaux (LRBB), domaine de l'Hermitage,
BP 10, 33610 Cestas-Gazinet, France*

(Reçu le 21 octobre 1994 ; accepté le 12 décembre 1994)

Résumé — Le calcul prévisionnel des caractéristiques élastiques des contreplaqués est effectué à partir d'une modélisation basée sur la théorie des plaques minces stratifiées et utilisant la masse volumique ρ du contreplaqué, à une humidité H , comme indicateur simple des caractéristiques du bois constitutif des plis. Les prévisions des modules de flexion-torsion sont vérifiées avec une précision remarquable à propos d'un contreplaqué équilibré tout okoumé testé au moyen de 2 dispositifs d'essais : l'un de flexion et l'autre de torsion. Ces dispositifs sont rendus performants par les particularités technologiques originales, mises en œuvre au niveau des appuis.

calcul prévisionnel / élasticité / contreplaqué / modules de flexion-torsion / appui

Summary — **Plywood mechanical design and experimental validation.** *The analytical calculation of the elastic characteristics of plywood were made from a modelisation based on the thin laminated plates theory, using the plywood density ρ at H% moisture content as a simple indicator of wood characteristics in each ply. The bending-torsion moduli's predictions were confirmed with a notable accuracy by 2 mechanical tests made on balanced okoume plywood: one bending and another torsion. The high achievements of these devices were reached thanks to the original technological features implemented on supports.*

analytical calculation / elasticity / plywood / bending-torsion modulus / support

INTRODUCTION

D'importants progrès ont été réalisés, au cours des dernières années, en matière de rhéologie du comportement du matériau bois (Guitard, 1987), de conception mécanique des matériaux composites (Laroze,

1988) et enfin de qualification expérimentale de tels matériaux (Bos, 1993). En particulier, les contreplaqués constituent une classe de matériaux à base de bois dont la conception, en fonction de performances requises, peut, d'ores et déjà, être réalisée avec une grande précision. Ceci, para-

doxalement en regard de la grande variabilité des propriétés mécaniques du matériau bois couramment avancée dans la littérature (Bodig, 1973).

L'objectif de cet article est de montrer l'excellente concordance existant entre les évaluations expérimentales et les calculs prévisionnels des caractéristiques élastiques de flexion et de torsion de panneaux de contreplaqués.

Les souplesses de flexion-torsion, d_{ij} , sont mesurées à l'aide de 2 dispositifs expérimentaux, l'un de flexion 4 points et l'autre de torsion. Des particularités technologiques originales, concernant les appuis, rendent ces moyens d'essais particulièrement adaptés à la caractérisation d'éprouvettes prélevées dans des plaques anisotropes (Bos, 1993 ; Godet, 1993).

Le logiciel de calcul prévisionnel des caractéristiques élastiques du contreplaqué fonctionne sur une modélisation assez classique (Hearmon, 1948), de plaques multicouches stratifiées, à plis anisotropes élastiques orientés, sous hypothèses de faibles déflexions, du type Love Kirchhoff, en contraintes planes (Guitard, 1987). L'originalité de la modélisation réside, cette fois, dans l'utilisation de la masse volumique ρ et du taux d'humidité H du contreplaqué comme paramètre indicateurs des propriétés élastiques du bois massif constitutif des plis (Guitard-El Amri, 1986).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le matériau : un contreplaqué équilibré sollicité en flexion torsion

Le matériau choisi pour illustrer la démonstration est un contreplaqué tout okoumé. Il s'agit d'un feuillu tropical, traditionnellement mis en œuvre dans la confection de panneaux de contreplaqué. La rectitude du fil, sa faible nodosité, sa grande aptitude au déroulage et les qualités esthétiques des plis sont, parmi d'autres, les caractéristiques

qui justifient son emploi en ce domaine et en font l'une des essences de référence.

Le contreplaqué est équilibré, à 7 plis isoépaisseur, croisés selon la séquence 0/90/0/.../0, brut de fabrication (sans ponçage, ni traitement des faces de parement). Les panneaux ont été élaborés par le centre de recherche de Roi Tech, en dimensions de production 2,50 x 1,20 m².

L'épaisseur de déroulage des plis est de 21/10^e de mm. La colle utilisée est un phénol-formol, dosée à 200 g par m² d'interface. La polymérisation à chaud (140°C) réalisée sous pression (1,4 Mpa), conduit à un produit final de 14 mm d'épaisseur, de masse volumique $\rho = 0,44$ g/cm³, pour un taux d'humidité voisin de $H = 11\%$.

La caractérisation mécanique des panneaux est conduite dans le cadre des hypothèses de la théorie classique des plaques minces stratifiées élastiques équilibrées (Guitard, 1987), en se limitant à l'évaluation des souplesses de flexion-torsion, d_{ij} , qui permettent d'exprimer linéairement des déplacements généralisés k_i en fonction des efforts linéiques généralisés associés M_j ,

$$k_i = d_{ij} M_j \quad \text{avec } i, j \in (1, 2, 6)^2 \quad [1]$$

En se limitant aux panneaux équilibrés, il est licite de réduire la loi de comportement à la forme simple [1] ; en effet, les couplages entre états mécaniques de membrane et de flexion-torsion n'existent pas dans ce cas particulier.

Les axes de référence de l'éprouvette sont précisées sur la figure 1.

k_1 et k_2 représentent respectivement les courbures des lignes de coordonnées \vec{x}_1 et \vec{x}_2 , tandis que k_6 correspond à la torsion de l'éprouvette.

M_1 et M_2 sont les moments linéiques de flexion agissant respectivement sur des coupures élémentaires d'orientation x_1 et x_2 , tandis que M_6 représente le moment linéique de torsion.

Les souplesses de flexion-torsion d_{ij} , définies en [1] sont fonction de l'épaisseur du panneau. En vue d'une comparaison des différentes évaluations, les souplesses sont exprimées en termes de grandeurs techniques assimilables à des modules d'élasticité définis par la relation [2] :

$$E_{ij} = \frac{12}{e^3 d_{ij}} \quad [2]$$

Les éprouvettes sont débitées dans 2 panneaux aux dimensions (L*b*e) suivantes : 500*100*14 mm³.

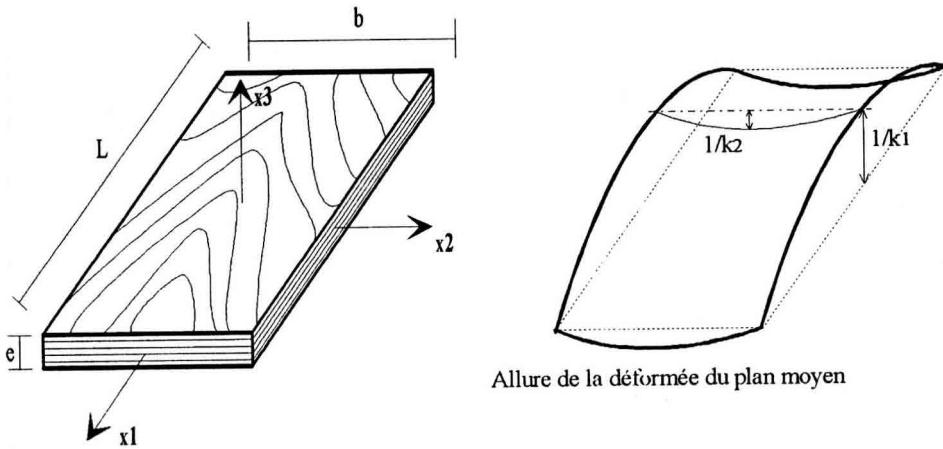


Fig 1. Éprouvette de contreplaqué : définition des axes de référence et des courbures.

L'orientation des éprouvettes dans le panneau est caractérisée par l'angle φ , référencé entre l'axe longitudinal du panneau et le grand axe x_1 de l'éprouvette (cf fig 2). Les 11 angles de prélèvements retenus sont : 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 70, 80, 85 et 90°.

On dispose de 5 éprouvettes pour chaque orientation.

Présentation des moyens expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux de flexion et de torsion utilisés ont été spécialement réalisés en

vue de la qualification de plaques orthotropes. Leurs particularités résident dans la nature des appuis, constitués de doublets ponctuels, et les degrés de liberté de rotation qui leur sont laissés.

Essai de flexion (BOGUI)

Le bâti de flexion possède 4 appuis, libres en rotation autour du grand axe x_1 de l'éprouvette. Ce degré de liberté des appuis, semblable à celui des appuis définis dans l'ASTM D 3043 méthode B, ASTM 1993, permet de libérer un éventuel couplage de torsion parasite, k_6 , induit lors de la sollicitation en flexion d'éprouvettes hors axes. Aux appuis linéiques, prescrits dans l'ASTM, ont

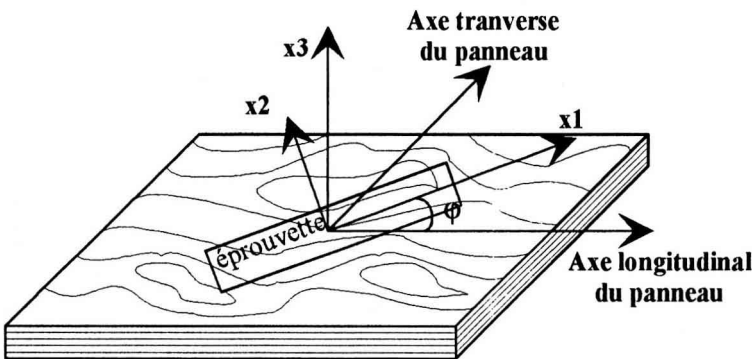


Fig 2. Définition de la direction de prélèvement φ des éprouvettes dans les panneaux.

été substitués des doublets d'appuis ponctuels laissant s'exprimer librement la courbure anticlastique k_2 . Ces dispositions expérimentales permettent d'appliquer, dans la zone centrale de l'éprouvette, une sollicitation de flexion pure (ie $M_2 = M_6 = 0$), correspondant au moment fléchissant M_1 . Les mesures effectuées concernent les courbures principale k_1 et anticlastique k_2 , ainsi que la torsion k_6 . Pour une éprouvette, prélevée suivant un angle j , sont alors calculées les souplesses d_{i1}^0 définies en [3] et déduites de [1]

$$d_{i1}^0 = k_i / M_1 \text{ avec } i = 1, 2, 6 \quad [3]$$

Dans de telles conditions de mise en charge, l'effet Poisson engendre une courbure anticlastique k_2 , toujours de signe opposé à la courbure principale k_1 . En conséquence, la souplesse d_{21} est une grandeur négative qui représente une mesure de la courbure anticlastique k_2 résultant de l'application d'un moment fléchissant M_1 de valeur unité. On prendra garde au fait que les résultats figurant dans la suite du document sont exprimés en valeurs absolues.

Essai de torsion (GOBOGUI)

Le dispositif de torsion utilisé possède également des appuis ponctuels. Il permet d'appliquer un moment de torsion pure M_6 . De la mesure de la torsion résultante k_6 , on déduit la souplesse de torsion d_{66}^0 définie en [4].

$$d_{66}^0 = k_6 / M_6 \quad [4]$$

Présentation de l'outil de calcul des multicouches

Calcul des caractéristiques élastiques du bois constitutif des plis

La loi de comportement élastique des plis est évaluée à partir de modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnels formulés pour le bois massif. Ces modèles reprennent l'idée de Bodig (1973) visant à donner une prévision des constantes élastiques du bois en fonction de sa masse volumique. Le choix du modèle utilisé dépend de la nature de l'essence retenue (feuillus ou résineux) (Guitard-Fournier (1994). Les complaisances élastiques du feuillu standard, S_{ij} , correspondent à un bois de masse

volumique $\rho = 0,65 \text{ g/cm}^3$ à 12% de taux d'humidité.

L'adaptation du modèle à une essence donnée est assurée par une correction en loi puissance de la masse volumique ρ , applicable sur une large plage de densité (de 0,1 à 1,28 g/cm³) dont la formulation, en termes de caractéristiques élastiques, est donnée en [5].

$$S_{ij}^{-1} = \bar{S}_{ij}^{-1} \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^k \text{ avec } i, j \in (1, 2, 3, 4, 5, 6)^2 \quad [5]$$

On réalise d'autre part, un ajustement linéaire, de coefficient a_{ij} , des caractéristiques élastiques pour un taux d'humidité voisin de 12% (ie, compris entre 6 et 20%) qui s'écrit sous la forme [6].

$$S_{ijH}^{-1} = S_{ij12}^{-1} [1 - a_{ij}(H - 12)] \quad [6]$$

avec $i \in (1, 2, 3, 4, 5, 6)$

L'ensemble des corrections est explicité dans le tableau I.

L'estimation des propriétés élastiques du bois constitutif des plis est réalisée à partir de 2 évaluations de la masse volumique de l'okoumé utilisé.

Une première approximation consiste à retenir pour masse volumique du bois, celle du matériau élaboré : $\rho = 0,44 \text{ g/cm}^3$ (mesurée à 11% d'humidité).

Une seconde approche consiste à corriger la masse volumique du contreplaqué en tenant compte de la colle. Cette correction est réalisée à partir des données du centre de recherche Rol Tech, qui estime la quantité de matière sèche apportée par la colle à 33 kg/m³. On obtient ainsi $\rho_c = 0,41 \text{ g/cm}^3$.

On notera que les 2 estimations de la masse volumique considérées ci-dessus sont supérieures à la moyenne avancée dans la littérature $\rho_{lit} = 0,33 \text{ g/cm}^3$ (Wood Handbook, 1987). Une part de cet écart est imputable à la densification du matériau, résultant du processus de fabrication (pressage à chaud), qui entraîne une rigidification du matériau. Celle-ci est de fait prise en compte dans les simulations puisque l'indicateur des propriétés élastiques retenu est une masse volumique apparemment majorée.

Les caractéristiques élastiques, obtenues pour l'okoumé massif à partir du modèle feuillu standard, corrigées en masse volumique et en humi-

Tableau I. Modèles prévisionnels du comportement tridimensionnel élastique d'un feuillu standard.

	«Feuillu» standard H = 12% $\rho = 0,44 \text{ g/cm}^3$ MPa	Correction en masse volumique $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Correction en humidité H (%)
$S_{11}^{-1} = E_R$	1 810	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,30}$	$\times (1 - 0,03(H - 12))$
$S_{22}^{-1} = E_T$	1 030	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,74}$	$\times (1 - 0,03(H - 12))$
$S_{33}^{-1} = E_L$	14 400	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,03}$	$\times (1 - 0,01(H - 12))$
$S_{12}^{-1} = \frac{E_T}{\nu_{TR}} = \frac{E_R}{\nu_{TR}}$	2 680	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,41}$	$\times (1 - 0,03(H - 12))$
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}}$	31 200	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,09}$	$\times (1 - 0,012(H - 12))$
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R}{\nu_{RL}} = \frac{E_L}{\nu_{LR}}$	37 300	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{0,913}$	$\times 1$
$S_{44}^{-1} = G_{LT}$	971	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{0,65}$	$\times (1 - 0,02)(H - 12)$
$S_{55}^{-1} = G_{LR}$	1 260	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,14}$	$\times (1 - 0,02)(H - 12)$
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	366	$\times \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,74}$	$\times (1 - 0,02)(H - 12)$

dité conformément à [5] et [6] sont portées dans le tableau II.

Assemblage du multicouche

La loi de comportement du multicouche est assemblée sur les bases de la théorie des

plaques minces stratifiées en considérant les plis parfaitement collés entre eux, ce qui implique des conditions cinématiques de continuité des déplacements entre 2 plis adjacents.

Les souplesses élastiques de flexion-torsion, d_{ij}^{ϕ} , sont obtenues par inversion du tenseur des rigidités D_{ij}^{ϕ} dont chaque terme est évalué conformément à la relation [7].

Tableau II. Prévisions du comportement tridimensionnel élastique d'un okoumé massif en fonction de sa masse volumique ρ , estimée à une humidité $H = 11\%$, à partir du modèle feuillu standard.

	E_R	E_T	E_L	$\frac{E_T}{\nu_{TR}} = \frac{E_R}{\nu_{RT}}$	$\frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_R}{\nu_{TL}}$	$\frac{E_R}{\nu_{RL}} = \frac{E_L}{\nu_{LR}}$	G_{LT}	G_{LR}	G_{RT}
Okoumé $\rho = 0,44 \text{ g/cm}^3$	1 090	520	9 630	1 550	20 400	26 100	590	810	190
Okoumé $\rho_f = 0,41 \text{ g/cm}^3$	990	460	8 960	1 400	18 900	24 500	540	750	160

$$D_{ij}^\varphi = \sum_{p=1}^n Q_{ijp}^\varphi (z_p^2 e_p + \frac{e_p^3}{12}) \quad [7]$$

avec $i, j \in (1, 2, 6)^2$

Dans cette expression, pour chaque pli de rang, Q_{ijp}^φ représentent les modules d'élasticité sous l'hypothèse de contraintes planes, e_p l'épaisseur du pli et z_p la côte du plan moyen du pli comptée par rapport au plan moyen du panneau.

RÉSULTATS

Les résultats expérimentaux rapportés, pour chaque lot d'éprouvettes d'orientation φ , sont des valeurs moyennées et l'écart type obtenus sur 5 essais.

L'évaluation des valeurs expérimentales du module E_{11}^φ , portées en fonction de l'angle de prélèvement φ , est semblable à celle relative aux estimations prévisionnelles (fig 3). Un minimum de rigidité à la flexion est observé de façon significative pour des orientations φ voisines de 45° . La simulation réalisée à partir de la masse volumique $\rho = 0,44 \text{ g/cm}^3$ donne, pour une majorité de points, une estimation légèrement par excès du module expérimental. En revanche, les valeurs expérimentales sont réparties de façon aléatoire de part et d'autre des estimations obtenues à partir de la masse volumique corrigée $\rho_c = 0,41 \text{ g/cm}^3$.

Les évaluations prévisionnelles du module de flexion E_{21}^φ sont incluses dans les intervalles d'incertitudes expérimentales, et ceci, quel que soit l'angle de prélèvement

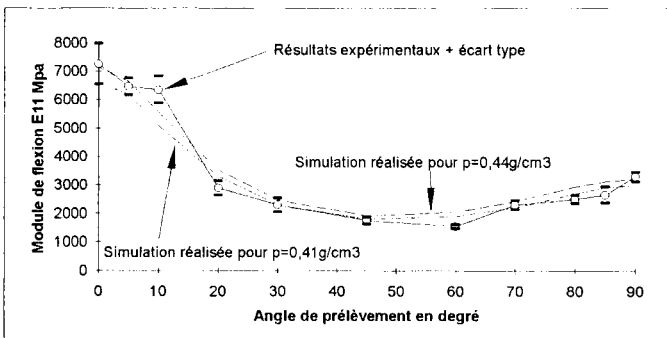


Fig 3. Évolution du module de flexion longitudinal E_{11}^φ , expérimental et simulé, d'une éprouvette de contre-plaqué d'angle de prélèvement φ .

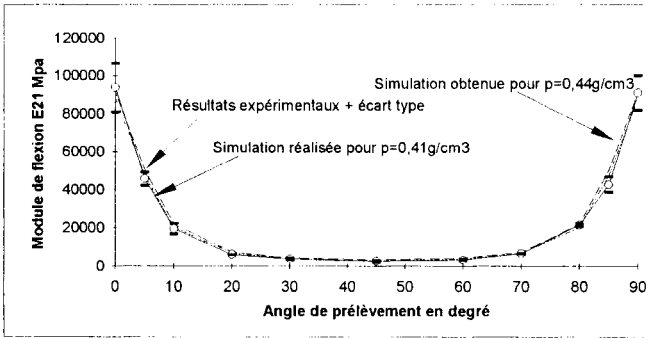


Fig 4. Évolution du module de flexion E_{21}^0 , expérimental et simulé, d'une éprouvette de contreplaqué d'angle de prélèvement φ .

φ considéré (fig 4). L'évolution du module de flexion E_{21}^0 fait apparaître une symétrie d'angle $\varphi = 45^\circ$, valeur de j pour laquelle E_{21}^0 est minimum. La courbure anticlastique est en conséquence minimale, pour les angles de prélèvement voisins de $\varphi = 0^\circ$ et $\varphi = 90^\circ$, la mesure est alors incertaine et conduit à des écarts types importants.

Le tracé expérimental du module de couplage flexion-torsion E_{61}^0 possède une allure comparable aux simulations réalisées (fig 5).

Simulation et expérimentation mettent en évidence un couplage flexion-torsion maximal pour les angles $\varphi = 25^\circ$ et $\varphi = 65^\circ$, un minimum est observé pour $\varphi = 45^\circ$.

Lorsque les éprouvettes sont prélevées selon les axes d'orthotropie du panneau (*ie*

$\varphi = 0^\circ$ ou 90°) les simulations prédisent un découplage de la flexion et de la torsion, c'est-à-dire des valeurs de E_{61}^0 infinies. Ce résultat est confirmé par les valeurs expérimentales puisque aucune torsion induite, par la flexion imposée, n'a pu être mesurée.

On notera, d'autre part, que les simulations, réalisées à partir de 2 masses volumiques retenues, conduisent dans tous les cas à une légère surestimation du module de flexion-torsion expérimental.

Pour l'ensemble des angles de prélèvement φ étudiés, on observe une évolution du module de torsion E_{66}^0 expérimental symétrique par rapport à l'angle $\varphi = 45^\circ$ (fig 6). Les modules expérimentaux sont répartis de façon aléatoire, avec une faible dispersion, autour des valeurs données par

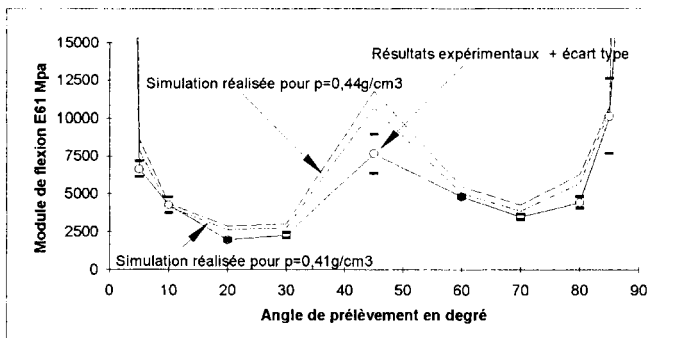


Fig 5. Évolution du module de flexion-torsion E_{61}^0 , expérimental et simulé, d'une éprouvette de contreplaqué d'angle de prélèvement φ .

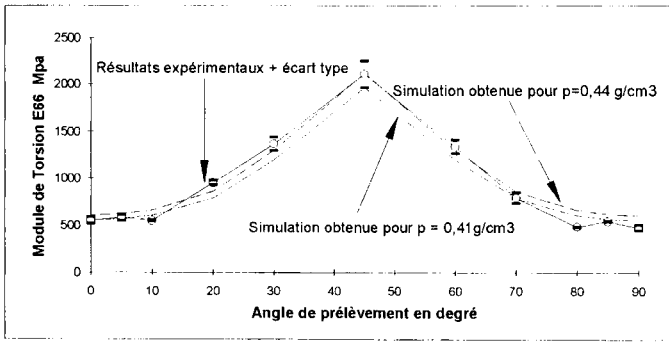


Fig 6. Évolution du module de torsion E_{66}^{ϕ} , expérimental et simulé, d'une éprouvette de contreplaqué d'angle de prélèvement ϕ .

les 2 simulations. La valeur du module de torsion est maximale pour l'angle $\phi = 45^\circ$ et 4 fois supérieure à la valeur d' E_{66}^{ϕ} observées pour $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 90^\circ$.

Remarquons que, en ce qui concerne le choix de la masse volumique à retenir lors de la réalisation des calculs prévisionnels, l'ensemble des résultats présentés montre que l'utilisation de la masse volumique du contreplaqué ($\rho = 0,44 \text{ g/cm}^3$), prise comme indicateur des propriétés élastiques des plis, conduit, pour la majorité des modules déterminés, à une surestimation des valeurs expérimentales. Le choix d'une masse volumique $\rho_f = 0,41 \text{ g/cm}^3$, donnée par le centre de recherche Rol-Tech et calculée en

tenant compte de la quantité de matière sèche contenue dans la colle, est un meilleur indicateur ; en effet, les résultats expérimentaux se répartissent de façon aléatoire et avec une faible dispersion autour des simulations.

Il apparaît d'autre part que le rôle essentiel de la colle est de compenser l'endommagement transverse résultant d'une microfissuration des plis liée au déroulage et d'assurer une adhérence parfaite de l'ensemble. En effet, la faible épaisseur des joints de colle, associée à une rigidité propre, comparable aux rigidités transverses du bois, permet légitimement de négliger la

Tableau III. Caractéristiques élastiques de flexion-torsion d'un contreplaqué équilibré tout okoumé à 11% d'humidité. Valeurs expérimentales et calculs prévisionnels.

	Souplesse de flexion-torsion $10^{-6} \text{ (mN)}^{-1}$				Modules élastiques équivalents Mpa			
	d_{11}	d_{22}	d_{21}	d_{66}	E_{11}	E_{22}	E_{21}	E_{66}
Valeurs expérimentales	603	1 330	46,7	7 950	7 250	3 300	93 700	550
Simulations $\rho = 0,44 \text{ g/cm}^3$	605	1 700	47,9	7 170	7 130	2 570	91 200	610
Simulations $\rho_f = 0,41 \text{ g/cm}^3$	663	1 360	49,6	7 670	6 600	3 210	88 200	570

contribution de la colle dans le comportement global du panneau.

Les essais réalisés et les calculs prévisionnels nous permettent de donner une estimation des caractéristiques mécaniques élastiques du contreplaqué utilisé, selon ses axes de symétrie matérielle (tableau III). Les souplesses de couplage flexion-torsion d61 (et par conséquent le module associé E61) ne figurent pas parmi les résultats puisque elles sont nulles.

CONCLUSIONS

L'outil de conception des contreplaqués est un logiciel qui utilise la masse volumique ρ à une humidité H donnée comme indicateur des propriétés élastiques du bois massif constitutif des plis. Des estimations des caractéristiques du panneau et en particulier les souplesses de flexion-torsion sont calculées à partir de la conformation du panneau (nombre, épaisseur et orientation des plis) dans le cadre de la théorie des plaques minces stratifiées.

La validation expérimentale de ces prévisions est réalisée sur un contreplaqué équilibré, tout okoumé, composé de 7 plis. Les résultats présentés confirment la pertinence de la modélisation développée.

La mesure des souplesses élastiques de flexion-torsion, d'éprouvettes débitées éventuellement en dehors des axes de symétrie matérielle de panneaux orthotropes, a nécessité la mise au point de dispositifs expérimentaux adaptés. Dans le cas de la flexion 4 points, essai BOGUI, des doublets ponctuels sont substitués aux appuis

linéiques préconisés dans les essais normalisés. Ils permettent de libérer la flèche anticlastique. De plus, le degré de liberté de rotation des appuis autour de l'axe longitudinal autorise les possibles torsions induites dans la zone centrale de l'éprouvette. Dans le cas de la torsion, essai GOBOGUI, pour des raisons analogues les appuis ponctuels sont utilisés.

RÉFÉRENCES

- ASTM (1994) *Annual book of ASTM standards*. 4. Construction. Vol 04.09 Wood: Plywood in flexure designation D3043 method B, 579-592
- Bodig J (1973) Prediction of elastic parameters for wood. *Wood Sci Technol* 5, 249-264
- Bos F (1993) Rapport de contrat MRT N°92 G0628. Caractérisation des plaques orthotropes sollicitées en flexion et en torsion
- Godet V (1993) Mémoire de projet de fin d'étude de l'ENI de Tarbes. Calcul prévisionnel et qualification expérimentale des propriétés élastiques des composites multicouches à base de bois
- Guitard D (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*. Collection Nabla, Cepadus Editions
- Guitard D, El Amri F (1987) Modèles prévisionnels du comportement élastique des bois massifs, feuillus et résineux. *Ann Sci For* 44, 335-358
- Guitard D, Fournier M (1994) Le bois matériau d'ingénierie. Chapitre III. Comportement mécanique du bois. ARBOLOR
- Hearmon RFS (1948) *The elasticity of wood and plywood*. Department of scientific and industrial research, Forest product research, Special report N° 7, His Majesty's Stationery Office, London, UK
- Laroze J (1988) *Mécanique des structures*, Tome 4, *Calcul des structures en matériau composites*. Eyrolles, Masson, Paris
- Rol Tech, Centre de recherche Rol Tech 79000 Niort
- Wood as an engineering material (1987) *In: Wood Handbook*, US Department of Agriculture, Washington, DC, États-Unis