

Article original

Qualification expérimentale des contreplaqués en flexion quatre points

F Bos*, D Guitard

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

(Reçu le 21 janvier 1997 ; accepté le 2 septembre 1997)

Summary – Experimental characterization of plywood panels in bending. Owing to their geometry and their mode of manufacture, plywood panels generally constitute orthotropic thin laminated plates. The main objective of this paper is to propose a bending apparatus, called BOGUI test, adapted to the elastic characterisation of plywood panels. A first specificity of this technical device is to allow the anticlastic curvature to be free by using pin supports. The second specificity consists in the presence of a large ball bearing on each support to avoid a coupling effect of bending and torsion. The experimental results obtained are compared with an analytical calculation and normalised tests.

orthotropic thin plates / bending / experimental characterization / pin support

Résumé – Les panneaux contreplaqués constituent, du fait de leur géométrie et leur mode de fabrication, des plaques minces orthotropes stratifiées. On propose ici un dispositif de caractérisation du comportement élastique de flexion des contreplaqués appelé essai Bogui. Une première spécificité de ce dispositif expérimental réside dans l'utilisation d'appuis ponctuels permettant de libérer la courbure anticlastique des éprouvettes. Les éventuels couplages de flexion-torsion sont supprimés grâce à l'utilisation d'un roulement à bille sur chaque appui. Les grandeurs expérimentales obtenues sont confrontées aux résultats d'un calcul prévisionnel ainsi qu'à des essais normalisés.

plaque mince orthotrope / flexion-torsion / caractérisation expérimentale / appui ponctuel

* Correspondance et tirés à part
Tél : (33) 05 57 97 91 00 ; fax : (33) 05 56 68 07 13

INTRODUCTION

Les contreplaqués constituent une classe de matériau bois dont les dimensions d'emploi (2,50/1,22 m² pour une épaisseur de quelques millimètres) les assimilent moins à un matériau au sens général du terme qu'à un produit structural : une plaque mince. En considérant, d'autre part, leur mode de fabrication du type multicouche à plis collés, il est légitime de décrire leur comportement élastique de flexion au moyen des souplesses de flexion-torsion d_{ij} , issues de la théorie des plaques minces stratifiées, Hearmon, 1948, Guitard, 1987.

La détermination expérimentale des souplesses de flexion-torsion d'une plaque mince orthotrope nécessite une attention particulière quant au choix des conditions limites, appliquées à l'éprouvette, au droit des appuis. En effet, une sollicitation de flexion appliquée hors des axes d'orthotropie d'une éprouvette par exemple peut engendrer l'apparition de déformations induites, dues notamment au couplage flexion-torsion, qui rendent plus complexe l'interprétation des résultats.

L'objectif de cet article est de comparer différents moyens expérimentaux de qualification des contreplaqués en flexion. Les tests retenus sont l'essai ASTM référence D 3043 méthode B, ASTM 1994, l'essai défini par le CEN 124 TC 112, CEN 1992, ainsi qu'un essai développé au sein du LRBB nommé essai Bogui. Ces dispositifs, basés sur le principe de la flexion quatre points, différent du point de vue des particularités technologiques mises en œuvre au niveau des appuis. Les résultats expérimentaux obtenus sont analysés en s'appuyant sur un calcul prévisionnel des caractéristiques mécaniques des contreplaqués validé précédemment (Bos et Guitard, 1995; Bos, 1995).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le matériau

Le support expérimental est issu de panneaux d'Okoumé équilibrés, à sept plis iso-épaisseur, croisés selon la séquence 0/90/0/.../0. Les panneaux sont conservés bruts de fabrication. L'épaisseur de déroulage des plis est de 21/10^{es} de millimètre. La colle utilisée est une phénol-formol, dosée à 200 g par mètre carré 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 $\rho = 0,44 \text{ g/cm}^3$, pour un taux d'humidité voisin de $H = 11 \%$.

Efforts et déformations généralisées

Les souplesses de flexion-torsion, d_{ij} , sont évaluées dans le cadre des hypothèses de la théorie des plaques minces stratifiées élastiques.

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

On exprime ainsi linéairement des déplacements généralisés k_i en fonction des efforts linéiques généralisés associés M_j . On notera que cette expression se limite au cas des panneaux équilibrés, pour lesquels le couplage entre états mécaniques de membrane et de flexion-torsion n'existe pas.

k_1 et k_2 représentent respectivement les courbures des lignes de coordonnées x_1 et x_2 , k_6 correspond à la torsion de l'éprouvette (figure 1). M_1 et M_2 sont les moments linéiques de flexion agissant respectivement sur des coupures élémentaires d'orientation \vec{x}_1 et \vec{x}_2 , et M_6 représente le moment linéique de torsion.

Les essais de caractérisation en flexion

Les trois essais de flexion choisis pour illustrer cet article sont basés sur le principe de la flexion quatre points. Les notations ainsi que le schéma de principe des dispositifs sont donnés figure 2.

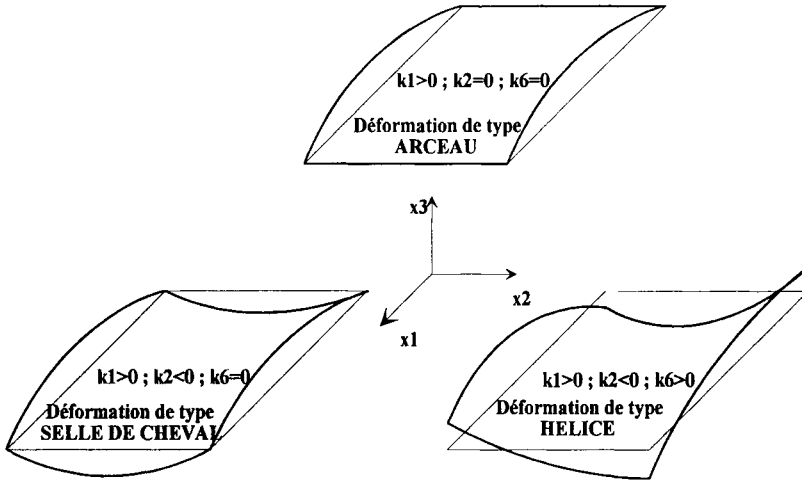


Fig 1. Définitions des courbures k_1 , k_2 et k_6 du plan moyen d'un panneau de contreplaqué et de quelques types de déformations d'un panneau

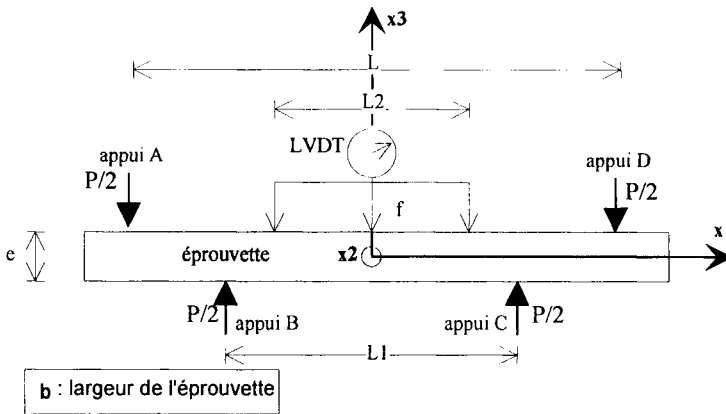


Fig 2. Schéma de principe du dispositif de flexion quatre points et notations utilisées.

Essai CEN TC 112 (CEN 92)

– Particularité de l'essai : les appuis linéiques utilisés sont libres de pivoter autour d'un axe parallèle à l'axe x_2 (cf figure 2).

– Mesures et grandeur déterminée : la mesure de l'évolution de la flèche f , relevée sur la portée

L_2 , sous l'application du chargement P conduit à la détermination du module apparent de flexion longitudinal :

$$E_{Longi} = \frac{3L_2^2(L - L_1)}{8e^3b} \cdot \frac{P}{f} \quad [2]$$

Ce module apparent constitue une évaluation de la grandeur que nous appellerons E_{11} par la suite.

Essai ASTM D3043 méthode B (ASTM 94)

– *Particularités de l'essai* : dans cette configuration expérimentale les appuis extérieurs du bâti (ie A et D) sont libres de pivoter autour de l'axe x_1 . Ces dispositions expérimentales sont justifiées par une limitation du couplage flexion-torsion lors de la caractérisation d'éprouvettes gauches : le champ de contrainte est alors moins perturbé. Les quatre appuis sont linéiques et conservent un degré de liberté autour de l'axe x_2 . Le détail d'un appui extérieur est donné figure 3.

– *Mesures et grandeur déterminée* : les mesures du chargement appliqué P, et de la flèche f relevée sur la portée L_2 , permettent d'accéder à l'expression d'un module apparent de flexion longitudinal dont l'expression analytique est similaire à celle formulée pour l'essai CEN et donnée par la relation [2].

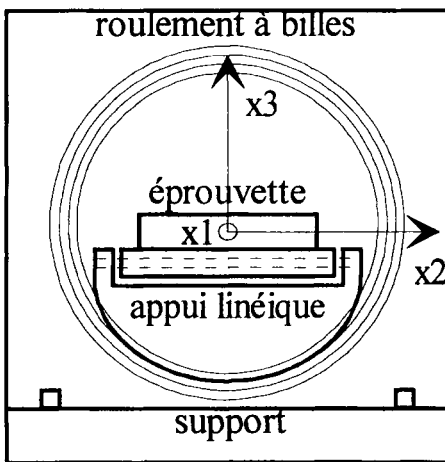


Fig 3. Détail d'un appui extérieur du bâti de flexion ASTM référence D3043 méthode B.

Essai BOGUI (Bos 95)

– *Particularités de l'essai* : cette configuration expérimentale possède deux originalités technologiques concernant les appuis. Les quatre appuis sont réalisés sur le principe des appuis extérieurs du bâti ASTM, ils sont par conséquent libres de pivoter autour des axes x_1 et x_2 . De plus, le contact avec l'éprouvette est assuré par l'intermédiaire de doublets d'appuis ponctuels (cf figure 4). Lors de la réalisation des essais, le risque de poinçonnement de l'éprouvette au niveau des appuis est préservé par interposition de plaquettes d'aluminium.

– *Mesures et grandeurs déterminées* : La démarche expérimentale suivie consiste à évaluer des souplesses élastiques d_{ij} estimées à partir de différentes mesures de courbures sous l'application d'un moment fléchissant de composante M_1 .

Le moment de flexion M_1 est issu de la mesure du chargement d'intensité P. Son expression dans la région centrale de l'éprouvette (ie entre les appuis B et C) est alors la suivante :

$$M_1 = \frac{P(L - L_1)}{4b} \quad [3]$$

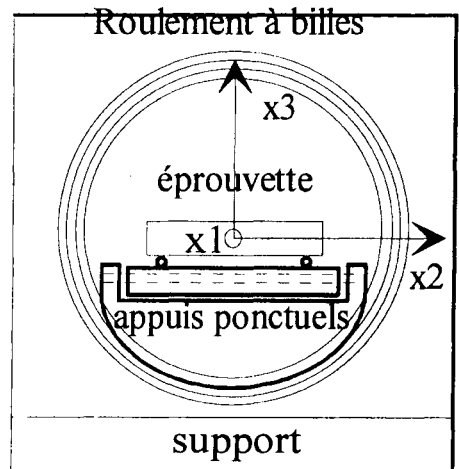


Fig 4. Détail d'un appui du dispositif de flexion quatre points Bogui.

La courbure longitudinale k_1 de l'éprouvette est estimée à partir de la mesure de la flèche f de l'éprouvette, relevée sur la portée L_2 (cf. figure 5). Elle s'écrit alors :

$$k_1 = - \frac{\partial^2 w(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} \cong \frac{8f}{L_2^2} \quad [4]$$

où $w(x_1, x_2)$ représente la flèche de l'éprouvette dirigée suivant l'axe x_3 . Dans les conditions de chargement définies sur la figure 3 la quantité

$$\frac{\partial^2 w(x_1, x_2)}{\partial x_1^2}$$

est négative ; la courbure k_1 est donc positive. À partir d'une base de mesure L_2 de 100 mm l'approximation réalisée en [4] est justifiée pour des valeurs de f n'excédant pas 5 mm.

La courbure anticlastique k_2 de l'éprouvette est libérée par les appuis ponctuels. Son estimation est donnée par la mesure la flèche transverse f' suivant la largeur de l'éprouvette (cf figure 6).

L'expression de la courbure anticlastique k_2 est alors la suivante :

$$k_2 = - \frac{\partial^2 w(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} \cong \frac{8f'}{L_3^2} \quad [5]$$

La quantité $\frac{\partial^2 w(x_1, x_2)}{\partial x_1^2}$ étant positive, la courbure anticlastique k_2 est alors négative (cf figure 6). On remarquera que, 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 .

À partir d'une base de mesure de courbure L_3 de 90 mm l'approximation réalisée en [5] est justifiée pour des valeurs de f' n'excédant pas 4,5 mm.

La torsion de l'éprouvette k_6 est estimée à partir de la mesure de la rotation α de l'appui C autour de l'axe x_1 . Lors de la réalisation des essais l'appui intérieur B est bloqué en rotation autour de l'axe x_1 .

Pratiquement, l'angle α est estimé à partir d'une mesure de translation réalisée sur un onglet solidaire de l'appui C du bâti. On a donc

$$\text{conformément à la figure 7, } \alpha = \text{Arctg}\left(\frac{d}{h}\right).$$

La torsion de l'éprouvette est alors issue de la relation suivante :

$$k_6 = -2 \frac{\partial^2 w(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} \cong - \frac{4\alpha}{L_1} \quad [6]$$

– *Calcul des souplesses de flexion-torsion expérimentales* : les souplesses de flexion-torsion, définies ci-dessous, se déduisent directement de la relation [1] sous réserve que la seule sollicitation appliquée dans la zone centrale de l'éprouvette (ie entre appuis intérieurs) soit le moment fléchissant M_1 , c'est à dire : $M_2 = M_6 = 0$.

Souplesse de flexion longitudinale d_{11} : la détermination du moment fléchissant linéique M_1 et de la courbure principale de l'éprouvette k_1

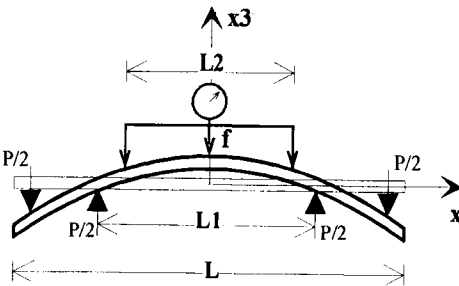


Fig 5. Principe de mesure de la courbure k_1 des éprouvettes.

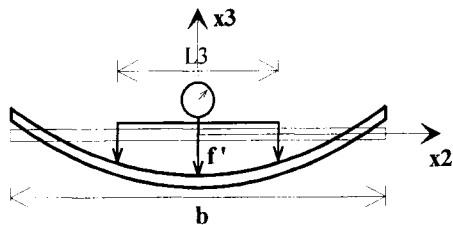


Fig 6. Principe de la mesure de la flèche transverse d'une éprouvette.

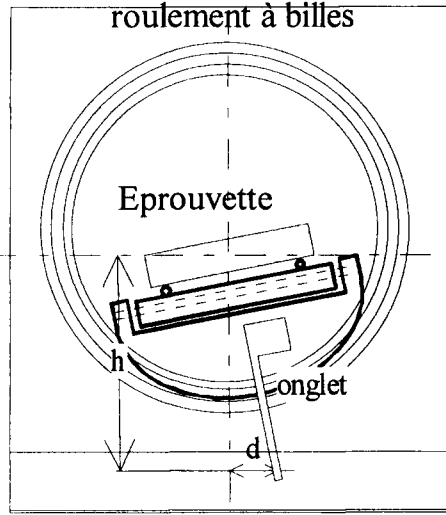


Fig 7. Estimation de l'angle de torsion α

permet d'accéder à l'expression de la souplesse de flexion longitudinale d_{11} :

$$d_{11} = \frac{32b}{L_2^2(L - L_1)} \cdot \frac{f}{P} \quad [7]$$

Souplesse de flexion d_{21} : cette souplesse est déterminée à partir de la mesure de la courbure anticlastique k_2 sous l'application du moment linéique M_1 :

$$d_{21} = \frac{32b}{L_3^2(L - L_1)} \cdot \frac{f'}{P} \quad [8]$$

Souplesse de flexion-torsion d_{61} : cette souplesse est déterminée à partir de la mesure de la torsion k_6 sous l'application du moment linéique M_1 :

$$d_{61} = \frac{16b}{L_1(L - L_1)} \cdot \frac{\alpha}{P} \quad [9]$$

À des fins de comparaison des différentes évaluations des grandeurs élastiques présentées, il est pratique d'associer aux souplesses d_{ij} , des grandeurs technologiques, homogènes à des modules d'élasticité intrinsèques au matériau :

$$E_{ij} = \frac{12}{e^3 d_{ij}} \quad [10]$$

CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

La longueur utile des éprouvettes L est de 500 mm pour une largeur b de 100 mm et une épaisseur e de 14 mm. Le prélèvement des éprouvettes est réalisé dans deux panneaux conformément à la figure 8, suivant un angle φ . Les valeurs de φ retenues sont : 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 70, 80, 85 et 90° (les angles 0° et 90° correspondant respectivement aux axes longitudinal et transverse du panneau). Un lot de cinq éprouvettes est prélevé pour chaque orientation.

L'ensemble des essais est réalisé sur un bâti modulable dont la nature des appuis est adaptée à la configuration expérimentale souhaitée (appuis linéiques, ponctuels libres ou non en rotation) en conservant la même rigidité de bâti. Le chargement maximum appliqué aux éprouvettes reste inférieur à 30 % de la charge de rupture afin de préserver le risque d'endommagement des éprouvettes. Chaque lot d'éprouvettes peut être ainsi testé sur les trois configurations expérimentales.

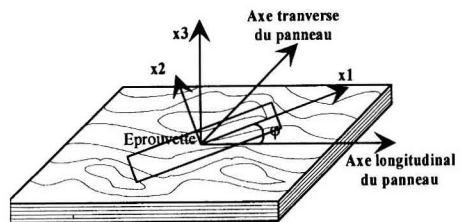


Fig 8. Définition de la direction de prélèvement φ des éprouvettes dans les panneaux.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Pour chaque configuration expérimentale et chaque lot d'éprouvettes d'orientation j , les résultats expérimentaux rapportés sont des valeurs moyennées du module de flexion longitudinal E_{11}^{φ} et l'écart type obtenus sur cinq essais. Afin de comparer les résultats obtenus par les différentes configurations expérimentales nous faisons figurer des valeurs prévisionnelles théoriques issues d'un calcul de multicouches validé par ailleurs, Bos et Guitard, 1995. L'évaluation des propriétés élastiques du bois constitutif des plis est alors réalisée au moyen de modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel formulés pour le bois massif, Guitard et El Amri, 1987. L'ensemble des résultats est porté dans le tableau I.

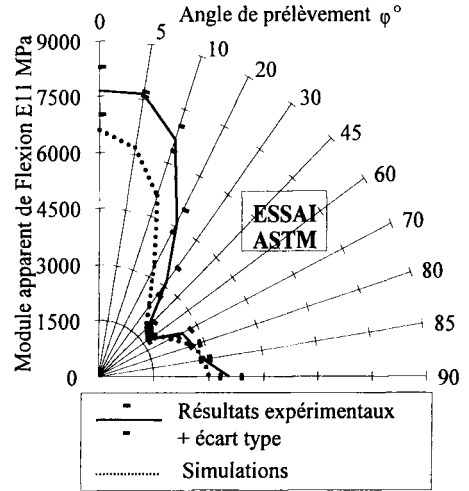
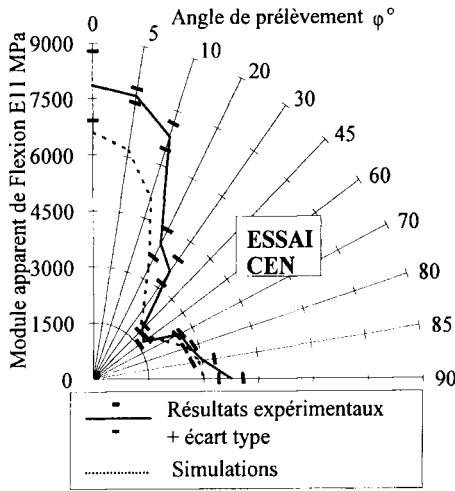
Les courbes expérimentales obtenues à partir des essais CEN et ASTM (figs 9 et 10) sont quasiment superposables et possèdent une allure générale comparable à la

simulation réalisée. Les résultats obtenus confirment de façon significative un minimum de rigidité à la flexion pour des orientations voisines de 45° . On distingue cependant deux tendances. Lorsque l'angle de prélèvement des éprouvettes j est compris entre 0° et 30° les valeurs expérimentales du module apparent de flexion E_{11}^{φ} donnent systématiquement pour l'essai CEN et ASTM une estimation par excès des grandeurs prévisionnelles. En revanche, lorsque φ est compris entre 45° et 90° , les valeurs expérimentales sont réparties de façon aléatoire de part et d'autre de la simulation avec un écart réduit.

Les modules de flexion expérimentaux E_{11}^{φ} obtenus à partir de l'essai Bogui (cf fig 11) sont répartis, quel que soit l'angle de prélèvement φ considéré, de façon aléatoire de part et d'autre des grandeurs simulées. Le minimum de rigidité à la flexion, observé pour les résultats précédant et concernant les angles de prélèvement voisins de 45° , est retrouvé. On notera, d'autre part,

Table I. Détails des valeurs expérimentales et des simulations.

Angle φ°	0	5	10	20	30	45	60	70	80	85	90
CEN											
E11 Mpa	7 850	7 650	6 800	4 040	3 550	1 880	1 690	2 610	2 740	3 030	3 750
Écart type	934	195	362	406	387	107	137	67	129	309	329
ASTM											
E11 Mpa	7 650	7 640	6 680	4 650	3 120	1 930	1 700	2 540	2 690	2 880	3 550
Écart type	634	60	354	335	448	119	87	186	117	135	286
BOGUI											
E11 Mpa	7 250	6 470	6 350	2 900	2 2290	1 750	1 540	2 310	2 500	2 660	3 300
Écart type	687	300	495	255	252	126	70	159	146	282	165
E21 Mpa	93 654	45 689	19 542	6 092	3 812	2 572	3 408	6 596	21 687	42 687	90 894
Écart type	12 894	3 564	2 812	91	370	250	322	175	681	4 184	8 978
E61 Mpa	non	6 623	4 263	1 969	2 287	7 648	4 796	3 479	4 411	10 134	non
Écart type	mesuré	522	499	104	181	1 307	118	169	374	2 484	mesuré
SIM											
E11 Mpa	6 600	6 200	5 100	3 300	2 300	1 800	1 900	2 200	2 700	2 900	3 000
E21 Mpa	82 892	42 181	17 471	5 827	3 317	2 515	3 317	5 827	17 471	42 181	82 892
E61 Mpa	infini	6 164	3 356	2 180	2 290	9 166	4 173	3 115	4 756	8 868	infini



Figs 9 et 10. Évolution du module de flexion longitudinal déterminé à partir des essais de flexion 4 points CEN TC112 et ASTM, en fonction de l'angle de prélèvement φ d'une éprouvette dans un panneau de contreplaqué. Confrontation aux simulations.

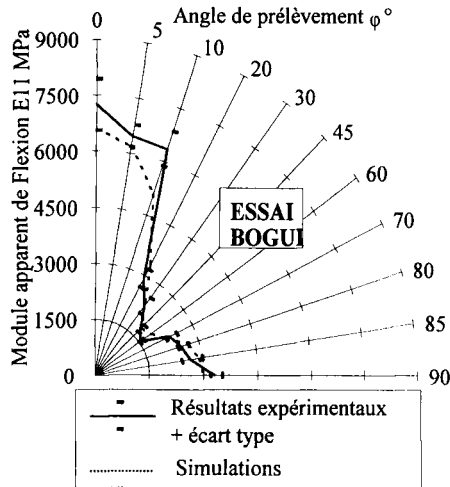


Fig 11. Évolution du module de flexion longitudinal déterminé à partir de l'essai de flexion quatre points Bogui et d'une simulation, en fonction de l'angle de prélèvement φ d'une éprouvette dans un panneau de contreplaqué. Confrontation aux simulations.

que l'écart observable entre expérimentation et simulation est globalement plus réduit que celui noté pour les configurations expérimentales CEN et ASTM.

ANALYSE STATISTIQUE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pour chaque type d'essai réalisé, les résultats expérimentaux sont confrontés aux simulations à partir d'un test de comparaison de moyennes par paires, Nepveu (1983), réalisé sur la totalité des angles de prélèvement φ . Pour tester l'égalité des moyennes, on considère la population des différences et l'on vérifie la nullité de la moyenne de ces différences. La principale condition d'application de ce test est la normalité des populations des différences, ce qui constitue une condition moins restrictive que celle de normalité des deux populations. La formulation du test est la suivante :

$$t_{observé} = \frac{|\bar{d}|}{\hat{\sigma}_d/\sqrt{n}} \quad [13]$$

Dans cette expression \bar{d} représente la différence moyenne obtenue entre résultats expérimentaux et simulations, et $\hat{\sigma}_d$ l'écart type associé. L'écart global entre résultats expérimentaux et simulation est considéré non significatif lorsque le facteur $t_{observé}$ est inférieur ou égal à un $t_{1-\alpha/2}$ lu dans les tables de Student. Les résultats du test, obtenus pour un risque α de 5 %, sont portés dans le tableau II.

Ce test confirme les tendances relevées sur les figures 9, 10 et 11. D'un point de vue global, si l'on considère l'ensemble des directions étudiées (ie $\varphi \in [0^\circ, 90^\circ]$), seuls les résultats expérimentaux obtenus à partir du dispositif Bogui sont comparables aux simulations. Une analyse plus fine montre que les trois configurations expérimentales donnent des résultats non significativement différents de la simulation dans l'intervalle $[45^\circ, 90^\circ]$. En revanche, si l'angle de prélèvement j appartient à l'intervalle $[0^\circ, 30^\circ]$ les estimations expérimentales du module de flexion issues des configurations CEN et ASTM sont significativement différentes des simulations et constituent une estimation par excès des grandeurs prévisionnelles.

On peut alors supposer que cette rigidification des éprouvettes est liée à la nature

des conditions limites appliquées au droit des appuis en utilisant les dispositifs normalisés. Il paraît en effet légitime de penser que les couplages flexion-torsion ne sont pas libérés dans la partie centrale de l'éprouvette et induisent la rigidification observée. Cette proposition peut être vérifiée à partir du tracé de l'évolution des modules E_{61}^φ et E_{21}^φ mesurables à partir du dispositif Bogui et des calculs prévisionnels (cf. figs 12 et 13).

On constate que le couplage flexion-torsion observé est maximum lorsque l'angle de prélèvement des éprouvettes φ est voisin de 20° (fig 12). On notera d'autre part que lorsque l'angle φ vaut 0° ou 90° la simulation prédit un découplage flexion-torsion (ie des valeurs de E_{61}^φ infinies). Ces résultats sont confirmés par l'expérimentation puisque aucune torsion induite k_6 n'est mesurée.

La figure 13, traduisant l'évolution du module E_{21}^φ en fonction de l'angle de prélèvement des éprouvettes φ , permet de mettre en évidence, aussi bien par l'expérimentation que par la simulation, qu'une éprouvette sollicitée en flexion est soumise à une courbure anticlastique k_2 non nulle et ceci quel que soit l'angle de prélèvement φ considéré.

Les appuis utilisés par les tests normalisés CEN et ASTM ne permettent pas de libérer la torsion et la courbure anticlastique

Table II. Test de comparaison des moyennes par paires réalisé, pour chaque configuration expérimentale, dans différents intervalles de l'angle de prélèvement des éprouvettes φ .

	Intervalles					
	$[0^\circ, 30^\circ]$ (n = 5)		$[45^\circ, 90^\circ]$ (n = 6)		$[0^\circ, 90^\circ]$ (n = 11)	
	t_{obs}	$t_{0,975}$	t_{obs}	$t_{0,975}$	t_{obs}	$t_{0,975}$
Cen	8,1	2,8	1,5	2,6	3,5	2,2
Astm	9,1	2,8	1,2	2,6	3,3	2,2
Bogui	1,3	2,8	0,7	2,6	0,8	2,2

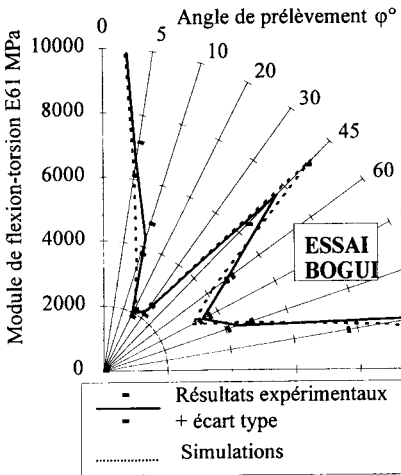


Fig 12. Évolution du module de flexion-torsion déterminé à partir du dispositif Bogui et d'une simulation, en fonction de l'angle de prélèvement φ d'une éprouvette dans un panneau de contreplaqué. Confrontation aux simulations.

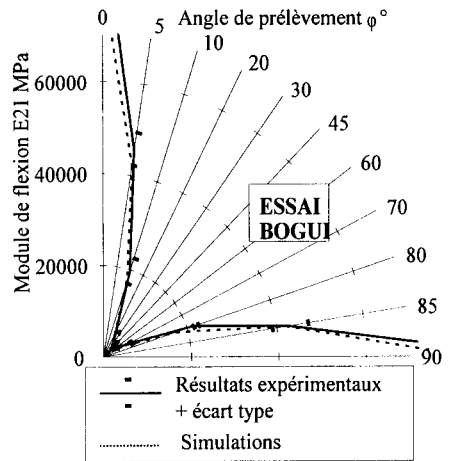


Fig 13. Évolution du module de flexion déterminé à partir du dispositif Bogui et d'une simulation, en fonction de l'angle de prélèvement φ d'une éprouvette dans un panneau de contreplaqué. Confrontation aux simulations.

induites au cours d'un essai de flexion. L'éprouvette est alors soumise à une combinaison de sollicitations (M_2 et $M_6 \neq 0$) qui rend complexe l'interprétation des résultats expérimentaux. Ces sollicitations parasites entraînent une rigidification de l'éprouvette qui explique les différences notées entre expérimentation et simulation lorsque les éprouvettes sont prélevées au voisinage de 20° .

L'essai de flexion Bogui permet donc, de part la nature des appuis utilisés, d'estimer le module de flexion longitudinal E_{11} avec précision quel que soit l'angle de prélèvement des éprouvettes retenu tout en renseignant l'expérimentateur sur les valeurs des modules E_{21} et E_{61} du matériau avec une bonne précision. Cet essai devient alors très efficace lorsqu'il s'agit de caractériser le matériau hors axe ou lorsqu'il présente naturellement un fort déséquilibre.

REFERENCES

- ASTM (1994) Annual Book of ASTM Standards. 4. Construction, Vol 04.09 Wood: Plywood in flexure Designation D 3043 Method B, 579-592
- Bos F (1995) Influence des conditions limites sur la caractérisation mécanique élastique et différée des contreplaqués en flexion. Doctorat de l'université de Bordeaux-I
- Bos F, Guitard D (1995) Validation expérimentale d'un outil de conception des contreplaqués. *Ann Sci For* 52, 423-431
- CEN / TC 112 / WG 4 (1992). 'Woods based panels' - Co-ordination of test methods
- Guitard D (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadus Éditions, Collection Nabla
- Guitard D, El Amri F (1987) Modèles prévisionnels du comportement élastique des bois massifs, feuillus et résineux. *Ann Sci For* 44, 335-358
- Hearmon RFS (1948) *The Elasticity of Wood and Plywood*. Department of Scientific and Industrial Research. Forest Product Research Special report n°7. Her Majesty's Stationery Office, Londres
- Nepveu G (1983) *Éléments de statistiques*. Centre national de recherches forestières, station de recherche sur la qualité des bois, Inra, document à distribution limitée