

Vers un matériau technologique: le bois

D. GUITARD et J. M. GENEVAUX (NANCY)

A PARTIR d'une base de données relative aux propriétés élastiques tridimensionnelles, et aux variations dimensionnelles en fonction de l'humidité, et compte tenu des caractéristiques physiques (masse volumique, taux d'humidité, d'un grand nombre d'essences, des modèles prévisionnels de lois de comportement hydroélastiques anisotropes ont été construits pour les feuillus et les résineux. Ces outils sont utilisés dans des logiciels de conception et de dimensionnement de structures composites à base de bois. L'accent est mis sur les contreplaqués. Les spécificités de la matière ligneuse du bois sont ainsi prises en compte dans l'art de l'ingénieur.

Opierając się na danych, dotyczących własności sprężystych oraz rozszerzalności w funkcji wilgotności i mając na uwadze inne własności fizyczne (gęstość, wilgotność) wielu gatunków drewna, skonstruowano modele pozwalające na przewidywanie równań konstytutywnych anizotropowej hygrospężystości dla drzew liściastych i iglastych. Wykorzystano je do stworzenia koncepcji wymiarowania konstrukcji kompozytowych wykonanych na bazie drewna. Położono szczególny akcent na konstrukcję płyt laminowanych.

Исходя из базы данных относительно упругих трехмерных свойств и из изменений размеров в функции влажности, а также имея в виду физические характеристики (плотность, влажность) значительного количества пород деревьев, построены модели позволяющие предсказывать определяющие уравнения анизотропной гидроупругости для лиственных и хвойных деревьев. Они используются для создания концепции размерностей композитных конструкций, изготовленных на основе дерева. Особенное внимание обращено на построение ламинированных плит.

1. Introduction

L'UN DES OBSTACLES majeurs à la promotion du matériau bois et des composites à base de bois, au rang de matériaux nouveaux à hautes performances, est l'absence de modèles prédictifs satisfaisants du comportement mécanique, et hygroscopique de la matière ligneuse. En conséquence le concepteur de structures en bois se trouve particulièrement gêné dans ses choix, démuné dans ses initiatives d'innovation faute de disposer de banques de données représentatives des matériaux à mettre en oeuvre et contraint d'adopter des critères normatifs fixés par les documents techniques unifiés (DTU), souvent trop pénalisant par rapport aux caractéristiques potentielles réelles des bois.

Dans le domaine particulier des sollicitations mécaniques d'amplitude raisonnable, il est maintenant possible de prévoir de façon acceptable le comportement élastique tridimensionnel des bois massifs en prenant en compte certains paramètres physiques, voire anatomiques explicatifs. De même, les contraintes induites lors d'un retrait hygroscopique anisotrope, peuvent être prédites. L'objet essentiel de ce papier est la présentation de tels modèles et d'illustrer le vaste champ des applications technologiques qu'ils ouvrent.

2. Les hypothèses et conditions de validité des modèles

Le matériau bois est considéré ici, du point de vue mécanique, comme un milieu continu, macroscopiquement homogène, fortement anisotrope, à comportement quasi élastique sur une plage suffisante de l'espace des contraintes.

Milieu continu: En effet les volumes élémentaires de matière envisagés ont leur plus petite dimension de l'ordre du centimètre, à priori grande par rapport aux discontinuités locales des arrangements cellulaires qui sont de l'ordre de quelques dizaines de microns.

Milieu macroscopiquement homogène: fort de la remarque précédente, l'hétérogénéité locale intra-cerne est supposée moyennée. En particulier la masse volumique, mesurée à un taux d'humidité fixé, est une valeur intégrale de la microdensité locale. Les variations macroscopiques des propriétés à l'intérieur de l'arbre, entre la patte et le houppier, le coeur et l'aubier peuvent être considérées comme fluctuations macroscopiques de la masse volumique.

Milieu anisotrope: Les très fortes variations des propriétés élastiques constatées en fonction de l'orientation de découpe des échantillons par rapport au référentiel de la grume ne permettent pas de négliger une anisotropie qui est qualifiée d'orthotropie cylindrique. Les axes de symétrie matérielle sont respectivement les directions longitudinale, radiale et tangentielle de la grume prise comme espace de référence.

La même caractérisation anisotrope est nécessaire vis-à-vis des déformations induites par une variation du taux d'humidité.

Notons enfin que les manifestations de comportement différé ne sont pas prises en compte dans l'état actuel des modèles, alors qu'elles sont perceptibles aux faibles niveaux de sollicitations considérés.

C'est dans ce cadre précis que les modèles proposés peuvent être valablement utilisés.

3. Création des modèles élastiques

Deux comités successifs de l'ancienne DGRST ont inclu, dans leurs appels d'offres de recherche en matière de mécanique du matériau bois, le problème de l'identification expérimentale de la matrice des complaisances élastiques.

Plusieurs laboratoires français se sont attelés à ce travail, mettant en oeuvre des méthodologies variées [1-8]. La diversité des approches et la complexité relative de chacune ont d'ailleurs motivé un contrat DGRST [9] ultérieur, visant à apprécier les mérites respectifs. Cette démarche collective s'est développée à travers une campagne de qualification d'un hêtre, sélectionné et échantillonné par les soins de la station qualité des bois du CRF (INRA) de Champenoux.

Le LEMTA [10] s'est attaché à réunir, en une bibliothèque informatisée, l'ensemble des informations bibliographiques, disponibles à ce jour, dans les conditions de collecte suivantes:

Pour qu'un bois ou une essence soit répertorié, il faut que l'auteur ait fourni les éléments nécessaires au calcul de la matrice complète des complaisances élastiques, ainsi que soient indiqués le taux d'humidité et la masse volumique correspondante des échantillons testés.

Lorsque, selon un usage classique de l'ingénieur, l'auteur donne comme grandeurs techniques les coefficients de Poisson, alors ces constantes élastiques sont traitées de façon à exprimer les composantes non diagonales correspondantes de la matrice d'élasticité, comme suit:

$$S_{ij} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\nu_{ij}}{E_i} + \frac{\nu_{ji}}{E_j} \right] \quad \text{ou} \quad S_{ij} = -\frac{\nu_{ij}}{E_i}$$

L'une ou l'autre des deux formules ci-dessus étant utilisée suivant les informations bibliographiques disponibles.

En l'état, ce sont 45 bois feuillus et 37 résineux qui ont été répertoriés. Les plages de masse volumique observées couvrent les intervalles de 0,1 à 1,28 g/cm³ pour les premiers et 0,26 à 0,59 g/cm³ pour les seconds, ceci mesuré à des taux d'humidité de bois secs au laboratoire, compris entre 8,8 et 14,3%. Une analyse statistique [10, 19] de cette banque de données a permis de dégager les propositions suivantes:

1. Conformément aux travaux de J. BODIG [11], il apparait comme légitime de traiter séparément la modélisation des bois feuillus et des bois résineux.

2. Les paramètres physiques, masse volumique et taux d'humidité, sont explicatifs de la variabilité observée pour les propriétés élastiques inter-espèces. Toutefois la plage utile en taux d'humidité de la banque de données est trop réduite pour que ce paramètre

Tableau 1. Régressions linéaires et puissances, pour les bois feuillus et résineux. Constantes élastiques fonction de la masse volumique.

FEUILLUS | N = 43

	$S_{ij}^{-1} = \bar{S}_{ij}^{-1} + B(p - \bar{p}_0)$ $\bar{p}_0 = 0,65$	R	CVR	$S_{ij}^{-1} = \bar{S}_{ij}^{-1} (p/\bar{p}_0)^B$	R	CVR
E_R	2 020 + 4 340 (p - 0,65)	0,931 ***	26	1 830 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,33}$	0,935 ***	25
E_T	1 240 + 3 270 (p - 0,65)	0,884 ***	44	1 030 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,77}$	0,920 ***	37
E_L	14 200 + 21 100 (p - 0,65)	0,922 ***	18	14 200 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,03}$	0,918 ***	18
$-S_{RT}^{-1}$	3 250 + 7 740 (p - 0,65)	0,907 ***	35	2 780 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,43}$	0,904 ***	35
$-S_{TL}^{-1}$	32 800 + 52 600 (p - 0,65)	0,801 ***	35	31 200 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,14}$	0,800 ***	35
$-S_{LR}^{-1}$	42 100 + 69 300 (p - 0,65)	0,780 ***	39	39 300 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,00}$	0,767 ***	40
G_{TL}	1 070 + 1 680 (p - 0,65)	0,880 ***	24	916 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,25}$	0,895 ***	26
G_{LR}	125 + 2 020 (p - 0,65)	0,907 ***	22	1 220 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,13}$	0,908 ***	22
G_{RT}	471 + 1 220 (p - 0,65)	0,850 ***	51	370 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,74}$	0,864 ***	48

Lorsque, selon un usage classique de l'ingénieur, l'auteur donne comme grandeurs techniques les coefficients de Poisson, alors ces constantes élastiques sont traitées de façon à exprimer les composantes non diagonales correspondantes de la matrice d'élasticité, comme suit:

$$S_{ij} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\nu_{ij}}{E_i} + \frac{\nu_{ji}}{E_j} \right] \quad \text{ou} \quad S_{ij} = -\frac{\nu_{ij}}{E_i}.$$

L'une ou l'autre des deux formules ci-dessus étant utilisée suivant les informations bibliographiques disponibles.

En l'état, ce sont 45 bois feuillus et 37 résineux qui ont été répertoriés. Les plages de masse volumique observées couvrent les intervalles de 0,1 à 1,28 g/cm³ pour les premiers et 0,26 à 0,59 g/cm³ pour les seconds, ceci mesuré à des taux d'humidité de bois secs au laboratoire, compris entre 8,8 et 14,3%. Une analyse statistique [10, 19] de cette banque de données a permis de dégager les propositions suivantes:

1. Conformément aux travaux de J. BODIG [11], il apparaît comme légitime de traiter séparément la modélisation des bois feuillus et des bois résineux.

2. Les paramètres physiques, masse volumique et taux d'humidité, sont explicatifs de la variabilité observée pour les propriétés élastiques inter-espèces. Toutefois la plage utile en taux d'humidité de la banque de données est trop réduite pour que ce paramètre

Tableau 1. Régressions linéaires et puissances, pour les bois feuillus et résineux. Constantes élastiques fonction de la masse volumique.

FEUILLUS | N = 43

	$S_{ij}^{-1} = \bar{S}_{ij}^{-1} + B(p - \bar{p}_0)$ $\bar{p}_0 = 0,65$	R	CVR	$S_{ij}^{-1} = \bar{S}_{ij}^{-1} (p/\bar{p}_0)^B$	R	CVR
E_R	2 020 + 4 340 (p - 0,65)	0,931 ***	26	1 830 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,33}$	0,935 ***	25
E_T	1 240 + 3 270 (p - 0,65)	0,884 ***	44	1 030 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,77}$	0,920 ***	37
E_L	14 200 + 21 100 (p - 0,65)	0,922 ***	18	14 200 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,03}$	0,918 ***	18
$-S_{RT}^{-1}$	3 250 + 7 740 (p - 0,65)	0,907 ***	35	2 780 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,43}$	0,904 ***	35
$-S_{TL}^{-1}$	32 800 + 52 600 (p - 0,65)	0,801 ***	35	31 200 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,14}$	0,800 ***	35
$-S_{LR}^{-1}$	42 100 + 69 300 (p - 0,65)	0,780 ***	39	39 300 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,00}$	0,767 ***	40
G_{TL}	1 070 + 1 680 (p - 0,65)	0,880 ***	24	916 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,25}$	0,895 ***	26
G_{LR}	125 + 2 020 (p - 0,65)	0,907 ***	22	1 220 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,13}$	0,908 ***	22
G_{RT}	471 + 1 220 (p - 0,65)	0,850 ***	51	370 $\left(\frac{p}{0,65}\right)^{1,74}$	0,864 ***	48

appréciables des caractéristiques élastiques. Des corrections fonctions linéaires du taux d'humidité peuvent être valablement introduites dans les modèles proposés, permettant de traduire les conséquences de fluctuations d'humidité autour de l'état sec à l'air, voisin de 12%.

La *masse volumique* traduit, au premier ordre, la quantité de matière ligneuse contenue dans un volume donné de bois. Il apparaît normal qu'un accroissement de ce paramètre physique, inter ou intra-espèces, entraîne globalement, d'un bois à l'autre, une rigidification mécanique du matériau.

Une étape ultérieure de la démarche de modélisation serait de rechercher les paramètres pertinents susceptibles d'expliquer, par exemple pour des bois de même masse volumique à taux d'humidité comparables, les variabilités d'anisotropie constatées, laquelle anisotropie peut être qualifiée par les rapports:

$$E_L/E_T \quad \text{ou} \quad E_R/E_T.$$

Si certains auteurs [13] envisagent la prise en compte de *l'angle des microfibrilles*, il convient avec d'autres [14] de ne pas négliger les proportions très variables de la *fraction volumique en rayons ligneux* intra et inter-espèces, paramètre qui semblerait a priori plus représentatif de la variabilité de l'anisotropie; les évolutions de l'angle des microfibrilles entrant plutôt dans la différenciation entre bois juvénile et bois adulte.

Il apparaît clairement que la mise en place de lois *prévisionnelles* du comportement élastique tridimensionnel des bois implique une démarche fondamentalement pluridisciplinaire, entraînant la collaboration de spécialistes en anatomie, physique, chimie et mécanique du bois.

4. Contraintes dues au retrait

Du fait de l'hygroscopicité du matériau, un volume élémentaire de matière libre au contour, soumis à une variation d'humidité ΔH , subit des déformations induites:

$$(4.1) \quad \varepsilon_{ij}^* = \alpha_{ij} \Delta H(r, t, l)$$

avec:

$$(4.2) \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_r & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_t & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_l \end{bmatrix}.$$

L'anisotropie du tenseur des coefficients de retrait en terme de déformation α , est schématisé Figure 1.

Si les déformations ε^* , sont gênées, et donc non cinématiquement admissibles, celles-ci sont complétées par des déformations complémentaires ε^c , telles que les déformations totales soient cinématiquement admissibles (C.A.):

$$(4.3) \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^* + \varepsilon_{ij}^c \quad (\varepsilon_{ij} \text{ C.A.}).$$

Sous l'hypothèse que ε^c reste dans les limites élastiques (17), les contraintes induites sont du type:

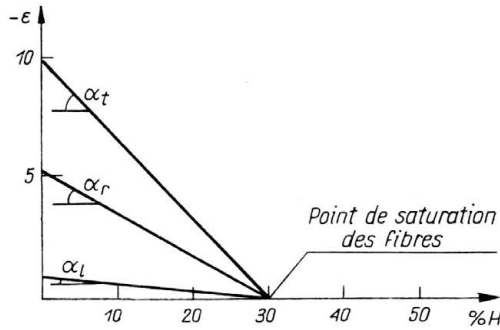


FIG. 1. Représentation schématique des déformations induites par une variation du taux d'humidité, en dessous du point de saturation des fibres.

$$(4.4) \quad \begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^c, \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - C_{ijkl} (\alpha_{kl} \Delta H), \end{aligned}$$

$$(4.5) \quad \begin{aligned} \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \beta_{ij} \Delta H; \\ \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}^* - \beta_{ij} \Delta H. \end{aligned}$$

β est appelé *tenseur des coefficients de retrait en terme de contrainte*.

Le problème mécanique

$$(4.6) \quad \begin{aligned} \sigma_{i,j,j} + f_{i,j} &= 0, \\ \sigma_{ij} n_j &= F_i, \end{aligned}$$

Tableau 2. Masse spécifique et constantes élastiques pour plusieurs espèces.

Species (unity)	ρ [gr/cm ³]	10^9 MPa = 10^9 Pa								
		C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{12}	C_{23}	C_{31}	C_{44}	C_{55}	C_{66}
Dodomissenga	0,26	0,93	0,41	5,93	0,37	0,22	0,44	0,43	0,59	0,07
Quaruba	0,35	1,12	0,47	8,42	0,30	0,32	0,49	0,44	0,58	0,06
Poplar	0,40	1,82	0,76	7,22	0,69	0,50	0,73	0,90	1,00	0,20
Marupa	0,42	1,81	1,11	7,63	0,82	0,61	0,98	0,68	0,88	0,07
Spruce	0,46	1,12	0,61	14,3	0,35	0,48	0,70	0,51	0,73	0,03
Douglas fir	0,48	1,19	0,95	16,4	0,42	0,55	0,55	0,90	0,90	0,09
Douglas	0,48	2,07	1,41	17,6	0,99	1,62	1,54	1,85	3,40	0,67
Pine	0,52	1,43	0,73	17,2	0,46	0,54	0,87	0,68	1,78	0,07
Walnut	0,55	1,79	1,94	12,6	0,72	0,95	1,34	0,71	0,98	0,23
Limba	0,55	2,49	1,74	12,1	1,16	1,21	1,48	0,92	1,05	0,55
Beech	0,58	2,78	1,17	15,0	0,90	0,87	1,43	1,96	3,70	1,00
Oak	0,63	3,23	1,90	10,5	1,34	1,24	1,72	1,10	1,32	0,61
Oak	0,70	2,96	1,63	19,2	1,16	1,46	1,97	0,67	1,00	0,22
Pegreou	0,71	3,41	2,25	16,0	1,41	1,39	1,80	1,22	1,47	0,46
Beech	0,72	3,36	1,69	15,7	1,30	1,46	2,18	1,07	1,63	0,46
Amarante	0,80	3,92	2,68	22,4	1,69	2,00	2,86	1,30	1,62	0,63
Ash	0,80	3,46	2,24	17,1	1,65	1,34	1,35	1,30	1,33	0,52
Coeur dehors	0,85	3,73	2,68	24,9	1,63	1,99	1,96	1,50	1,66	1,35
Monghinza	0,98	5,32	2,87	22,9	1,86	1,81	2,55	1,42	1,95	0,90
Balata rouge	1,11	6,40	4,67	30,5	2,82	2,82	3,00	1,71	2,23	1,10
Endranendrana	1,28	8,17	7,47	27,9	4,19	4,82	4,87	2,80	2,97	1,84

s'écrit donc:

$$(4.7) \quad \begin{aligned} \sigma_{ij}^* - (\beta_{ij} \Delta H)_{,j} + f_{,i} &= 0, \\ \sigma_{ij}^* n_j &= F_i + \Delta H \beta_{ij} n_j. \end{aligned}$$

Le tenseur des coefficients de retrait en terme de contrainte, est la résultante des propriétés élastiques et des coefficients de retrait dimensionnels du matériau:

Tableau 3. Coefficients de retrait en déformation et en contrainte.

Species (unity)	α_R	α_T	α_L	β_R	β_T	β_L	β^*	$K\beta \cdot \rho^2$	$\Delta\beta/\beta 100$	$K\beta$
	—10—3def/%H—			—————MPa/%H—————					%	21,5
Dodomissenga	0,70	2,70	0,10	1,7	1,4	1,5	1,55	1,45	9,7	22,8
Quaruba	1,30	4,10	0,07	2,7	2,3	2,5	2,52	2,63	8,3	20,5
Poplar	1,36	4,40	0,25	5,7	4,4	5,0	5,04	3,44	13,0	31,5
Marupa	1,08	2,64	0,18	4,3	3,9	4,1	4,11	3,79	4,8	23,3
Spruce	1,90	3,70	0,00	3,4	2,9	3,2	3,17	4,55	8,5	15,0
Douglas fir	1,90	3,30	0,06	3,7	3,9	3,8	3,81	4,95	3,7	16,5
Douglas	2,07	3,30	0,00	7,1	6,4	6,7	6,73	4,95	5,0	29,2
Pine	1,90	3,20	0,02	4,2	3,2	3,7	3,72	5,81	13,2	13,7
Walnut	2,00	3,00	0,00	5,7	4,2	4,9	4,94	6,50	14,7	16,3
Limba	2,10	2,70	0,12	8,5	7,3	7,9	7,91	8,1	26,1	6,50
Beech	2,20	3,80	0,10	9,7	6,5	8,0	8,07	7,23	20,2	24,0
Oak	1,80	4,30	0,28	11,3	10,8	11,3	11,3	8,53	5,3	28,7
Oak	1,90	3,20	0,00	9,3	7,4	8,3	8,36	10,5	11,6	17,0
Pegreou	1,80	3,20	0,17	10,9	10,0	10,4	10,4	10,8	4,2	20,7
Beech	2,20	3,80	0,02	12,3	9,3	10,7	10,8	11,1	13,9	20,8
Amarante	2,10	2,60	0,10	12,5	10,5	11,5	11,5	13,7	8,7	18,0
Frêne	1,50	2,40	0,20	9,4	8,1	8,8	8,78	13,7	7,4	17,9
Coeur dehors	1,90	3,10	0,08	12,3	11,5	11,9	11,9	15,5	3,4	16,5
Monghinza	2,30	4,40	0,22	21,0	17,3	19,0	19,1	20,6	9,9	19,9
Balata rouge	2,80	4,90	0,32	32,7	31,7	32,2	32,2	26,5	1,5	31,7
Endranendrana	2,80	4,50	43,4	43,4	47,0	45,2	45,2	35,2	4,0	27,6

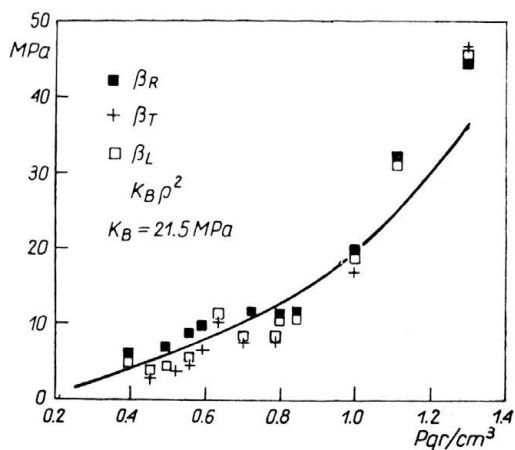


FIG. 2. Coefficient de retrait en terme de contrainte, relatifs à 21 essences.

$$(4.8) \quad \begin{aligned} \beta_{rr} = \beta_R &= C_{rrrr} \alpha_r + C_{rrtt} \alpha_t + C_{rrLL} \alpha_L, \\ \beta_{tt} = \beta_T &= C_{rrtt} \alpha_r + C_{tttt} \alpha_t + C_{ttLL} \alpha_L, \\ \beta_{LL} = \beta_L &= C_{rrLL} \alpha_r + C_{ttLL} \alpha_t + C_{LLLL} \alpha_L. \end{aligned}$$

Les données relatives à une vingtaine d'essences (Tableau 2,3) montrent que pour une même essence, l'anisotropie sur β en regard de celle observable en α , peut être négligée comme illustré sur la Figure 2.

De plus, on peut corréler de façon satisfaisante β , à la masse volumique (18). Le tenseur β peut donc être considéré comme sphérique:

$$(4.9) \quad \beta_{ij} = (21,5 \cdot 10^6 \rho^2) \delta_{ij}$$

avec ρ : densité du bois sec à l'air.

5. Champ d'application des modèles

Le développement et le perfectionnement de tels modèles prévisionnels du comportement mécanique des bois ouvrent des perspectives intéressantes d'innovation dans des domaines variés des sciences visant à la promotion de ce matériau.

Dans le secteur de la *sélection génétique*, il est particulièrement précieux pour le sylviculteur de savoir que la mesure de paramètres physiques, tels que la masse volumique accessibles à partir de prélèvements non destructifs, selon par exemple la méthode des carottes de sondage largement pratiquée au CRF, permettent d'apprécier de façon significative les aptitudes technologiques des bois sur des arbres en cours de croissance.

5.1. Lamellé-collé

En ce qui concerne la conception et le calcul des charpentes, les lois de comportement prévisionnelles ont permis de mettre au point des petits logiciels de dimensionnement de poutres en *lamellé-collé*, qu'il s'agisse de poutres droites ou courbes, à section droites

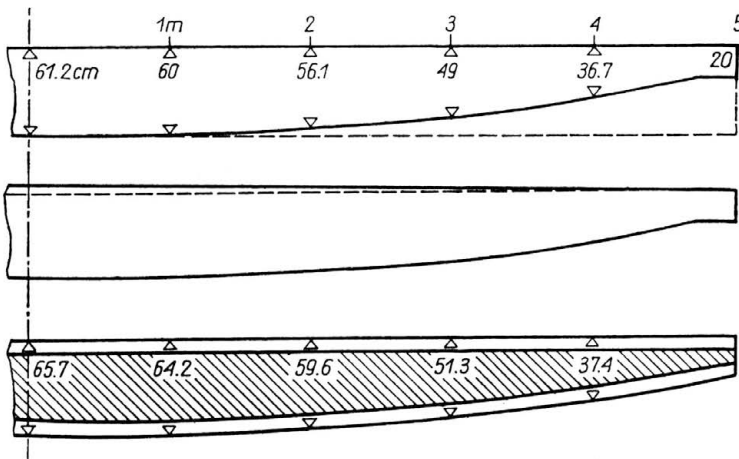


FIG. 3. Poutres en lamellé-collé, isocontraintes, homogènes ou en mélange d'essences.

constantes ou variables longitudinalement (profils isocontraintes), homogènes d'une même essence ou *en mélange* de plusieurs *essences*. Ces moyens de conception mécanique, mis à la disposition de l'ingénieur, doivent permettre une utilisation optimale du matériau en facilitant une évaluation serrée des volumes réellement utiles de la matière première. Cette démarche est illustrée sur la Figure 3 à propos du dimensionnement d'une poutre en lamellé-collé reposant sur appuis simples et soumise à un chargement linéique uniforme. Le Tableau 4 indique les caractéristiques des différentes options de conception.

Tableau 4. Diverses conceptions de poutre en bois lamellé-collé

Les poutres proposées répondent aux conditions suivants:

- * Poutres reposant sur deux appuis simples; distance entre appuis fixée à $L = 10$ m
- * soumises à un chargement linéique uniforme; $A = 10\,000$ N/m.
- * Constituées d'une seule essence, ou en mélange de deux essences:
 - Un Douglas de masse volumique sec à l'air $\rho = 0,55$ g/cm³
 - Un Peuplier de masse volumique sec à l'air $\rho = 0,37$ g/cm³
- * de largeur constante $l = 0,1$ m
- * A sections droites constantes le long de la poutre, ou à profil variable isocontrainte.

Le critère d'optimisation retenu pour le calcul des profils est celui d'une contrainte maximale admissible à la compression $\sigma_a = 20$ N/mm² à ne pas dépasser.

Type de poutre	hauteur max en m	volume total en m ³	volume de Douglas en m ³	volume de peuplier en m ³	pourcentage rapport à (1)
(1) Homogène section constante Douglas	0,612	0,612	0,612	---	100
(2) Mélange section constante Douglas, peuplier	0,657	0,657	0,200 ---	---	32 75
(3) Homogène isocontrainte Douglas	0,612	0,490	0,490	---	80
(4) Mélange isocontrainte Douglas, peuplier	0,657	0,487	0,200 ---	---	32 47

lecteur notera que certaines de ces options ne font pas à notre connaissance l'objet d'applications industrielles actuelles, il s'agit là, pour le moins, d'innovations technologiques théoriques qui ne demandent qu'à être exploitées (21).

5.2. Contreplaqué

Avec quelques précautions, les modèles élastiques précédemment décrits, ont été introduits dans un logiciel de calcul des stratifiés multicouches qui autorise le dimensionnement de structures en *contreplaqués*.

Le problème est de déterminer le comportement élastique d'un composite multicouches constitué de n plis. Dans l'exemple de la Figure 4, il s'agit d'un cinq plis, muni d'un référentiel de structure x_1, x_2, x_3 centré dans le plan médian de la plaque composite.

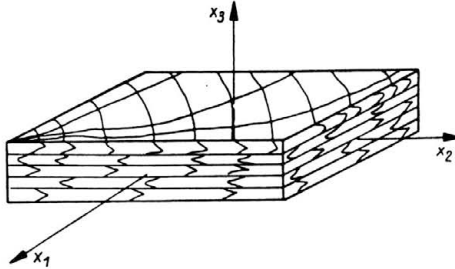


FIG. 4. Contreplaqué cinq plis.

Les hypothèses cinématiques retenues ici sont celles, classiques, de Love-Kirchhoff. Le champ de déplacement (u, v, w) est développé au premier ordre suivant la cote z perpendiculaire à la plaque. Compte tenu de (4.1), l'état de déformation complémentaire est caractérisé par les composantes locales suivantes :

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^e(x_1, x_2, z) &= \varepsilon_1^0 + zk_1 - \alpha_1 \Delta H = \delta u_0 / \delta x_1 - z \delta^2 w / \delta x_1^2 - \alpha_1 \Delta H, \\ \varepsilon_2^e(x_1, x_2, z) &= \varepsilon_2^0 + zk_2 - \alpha_2 \Delta H = \delta u_0 / \delta x_2 - z \delta^2 w / \delta x_1^2 - \alpha_2 \Delta H, \\ 2\varepsilon_6^e(x_1, x_2, z) &= 2\varepsilon_6^0 + zk_6 - \alpha_{12} \Delta H \\ &= \delta u_0 / \delta x_2 + \delta v_0 / \delta x_1 - 2\delta^2 w / \delta x_1 \delta x_2 - \alpha_{12} \Delta H, \end{aligned}$$

où : ε_1^0 , ε_2^0 et ε_6^0 sont les déformations de membrane, k_1^0 , k_2^0 et k_6^0 sont les courbures et la torsion de plaque.

Pour chaque pli de rang p , le tenseur des complaisances élastiques S et le tenseur β sont estimés par les modèles prévisionnels présentés ci-dessus § 3 et 4, en précisant :

- la nature feuillue ou résineuse de l'essence,
- la masse volumique $\rho(p)$ du bois mis en oeuvre,
- la variation de taux d'humidité ΔH , supposée constante dans toute l'épaisseur de la plaque.

Le tenseur des rigidités C est obtenu par inversion de S .

L'orientation du pli de rang p , définie par l'angle $\varphi(p)$ de la direction des fibres par rapport à la direction x_1 de la plaque, permet d'exprimer par une rotation, les composantes des tenseurs matériels dans le référentiel de structure. Dans le cas des feuillet de bois déroulés, les caractéristiques orthotropes utiles sont celles relatives au plan (L, T) .

A partir de l'état de déformation local, l'état de contrainte est calculé dans chaque pli.

Les efforts linéiques généralisés dans une plaque, notés N_i et M_i (pour i prenant les valeurs 1, 2, 6) correspondent respectivement aux contraintes de membrane, exprimées en Newton par millimètre (N/mm) et aux moments de flexion-torsion, exprimés en Newton (N). Ils sont reliés aux déformations généralisées ε_j^0 , k_j et à ΔH :

$$\begin{aligned} N_i &= A_{ij} \varepsilon_j^0 + B_{ij} k_j - E_i \Delta H, \\ M_i &= B_{ij} \varepsilon_j^0 + D_{ij} k_j - F_i \Delta H \quad \text{pour } i, j \in (1, 2, 6)^2, \end{aligned}$$

où : A_{ij} correspondent aux rigidités de membrane. (N/mm), D_{ij} correspondent aux rigidités de flexion-torsion (mmN), B_{ij} correspondent aux termes de couplage entre comportement de membrane et de flexion qui existent lorsque le contreplaqué est non équilibré,

E_i (N/mm/%) et F_i (N/%) sont respectivement les coefficients de contrainte et de moment, liés à une variation ΔH du taux d'humidité global.

Ces caractéristiques de plaque se calculent par intégration suivant l'épaisseur de la plaque des contraintes locales (20).

Par ce moyen, l'ingénieur peut évaluer l'incidence sur la qualité de sa production, d'aléas de fabrication tels qu'une surépaisseur accidentelle, un écart de l'orientation de l'un des plis, ou une reprise d'humidité. Là encore, la démarche suivie a un caractère d'innovation, en effet la notion fondamentale de rigidité de couplage entre les effets de membrane et les effets de flexion-torsion, connue dans le monde des concepteurs de matériaux composites, est apparemment absente de la littérature technique des professionnels du contreplaqué.

Un développement en cours de ce logiciel inclut la possibilité d'adjoindre des plis supplémentaires de matériaux très variés tels que feuilles métalliques, monocouches de polymères ou de composites renforcés par fibres diverses (verre, carbone, kevlar, bore, etc.). Ceci est susceptible de promouvoir l'utilisation du matériau bois dans la conception de certains composites à hautes performances mécaniques et de grande diffusion. Les auteurs ont conscience d'évoquer des innovations technologiques qui, bien qu'absentes en France, font parfois l'objet d'importantes applications dans des pays voisins.

6. Conclusions

Les auteurs ont tenté de montrer que le matériau bois, comme tous les autres matériaux mis en oeuvre en construction mécanique, peut et doit être caractérisé sur le plan mécanique par des lois de comportement, dans le cas présent élastiques, utilisables par l'ingénieur dans la conception et la fabrication de produits nouveaux. Ces lois de comportement doivent prendre en compte les complexités minimales nécessaires pour rendre compte des spécificités de ce matériau.

Plus généralement, la grande variabilité des propriétés mécano-physiques des bois, observée et largement étudiée par différents laboratoires, est considérée par les auteurs, non comme une fatalité dont il convient d'établir les catalogues, mais plutôt comme l'évidence de l'interférence de multiples facteurs qu'il est nécessaire de hiérarchiser et de progressivement prendre en compte dans des modélisations pragmatiques.

La mise au point de tels modèles implique le renforcement de recherches concertées à caractères fondamentalement pluridisciplinaires, alliant des spécialistes de disciplines scientifiques variées tels que sylviculture, anatomie, physique, chimie, mécanique etc.

Bibliographie

Laboratoires concernés par l'étude D.G.R.S.T évoquée ci dessus:

1. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (C.T.B.A), Equipe de Rhéologie, Paris.
2. Centre Technique Forestier Tropical (C.T.F.T.): Division Mécanique Physique et Usinage, Nogey sur Marne.
3. Centre Technique du Papier (C.T.P), Equipe de Mécanique, Grenoble.

4. Centre National de la Recherche Forestière (C.N.R.F): Station Qualité des Bois, Champenoux.
5. Ecole Supérieure d'Électricité et de Mécanique (E.S.E.M.): Laboratoire de Physique, Orléans.
6. Ecole Polytechnique: Laboratoire de Mécanique des Solides (L.M.S.), Palaiseau.
7. Institut National Polytechnique de Lorraine (I.N.P.L.): Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (L.E.M.T.A.), Nancy.
8. Université de Metz: Laboratoire de Fiabilité Mécanique, Metz.
9. G. PLUVINAGE, *Etude critique de la détermination expérimentale des constantes élastiques dans le bois*, Rapport Contract D.G.R.S.T. 81G 1058, Novembre 1985.
10. D. GUITARD et F. EL AMRI, *Modèles prévisionnels du comportement élastique des bois massifs, feuillus et résineux*, Le bois dans la construction Coll. Sci. Int ARBORA, pp. 38-49, 2-3 octobre, Bordeaux 1986.
11. J. BODIG and B. A. JAYNE, *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1982.
12. C. C. GERHARDS, *Effect of moisture content and temperature on mechanical properties of wood an analysis of immediate effects*, Wood and Fiber, 14, 1, pp. 4-36, 1982.
13. J. D. BARRETT, *Theoretical models of wood shrinkage and elasticity*, Ph. D. University of California, Berkeley 1973.
14. W. W. BARKAS, *The influence of ray cells on the shrinkage of wood*, In: Wood Water Relationships VI Trans. Faraday Soc., 37, 535, 1941.
15. C. BREMOND et D. GUITARD, *Apparition des contraintes internes dans les matériaux à symétrie matérielle orthotrope cylindrique cas des contraintes internes dans le bois*, Actes du Colloque Sciences et Industries du Bois, Editeur Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris, 20-22 septembre 1982.
16. D. GUITARD, T. AUGRE et C. BREMOND, *Contribution à l'analyse des contraintes internes dans le bois, résultant d'un gradient d'humidité*, Annales de la Faculté des Sciences, University of Yaounde, Cameroun 1984.
17. N. TAHANI, D. GUITARD, *Etude des contraintes internes dans un billon soumis à un séchage radial*, Actes du Seminaire Interne du GS Rheologie du Bois, Bordeaux 1986.
18. D. GUITARD, C. SALES, M. PREZIOSA, *Contraintes internes de séchage dans le matériaux bois: le tenseur des coefficients de séchage comme caractéristique isotrope de la matière ligneuse*, Cahiers Scientifiques du CTFT, 8, Paris 1986.
19. F. ELAMRI, *Contribution à la modélisation élastique anisotrope du matériau bois*, Feuillus et Résineux, Doctorat de l'I.N.P.L. Nancy 1987.
20. A. VAUTRIN, *Lois de comportement: Thermoélasticité des plaques minces stratifiées*, Introduction aux matériaux composites, Editions du CNRS, Paris.
21. D. GUITARD, *La mécanique du matériau bois et composite*, Cepadees-Edition, Toulouse 1985.

LABORATOIRE D'ENERGETIQUE ET DE MECANIQUE THEORIQUE ET APPLIQUEE
NANCY, FRANCE.

Received April 5, 1988.