

## Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux

D. GUITARD, F. EL AMRI

*I.N.P.L., Laboratoire d'Energétique et de Mécanique théorique et appliquée,  
B.P. 850, F 54011 Nancy Cedex*

### Résumé

Une banque de données informatisée, reproduite ici, comprend les propriétés physiques, masse volumique  $\rho$ , et taux d'humidité  $H$ , et les propriétés élastiques tridimensionnelles de 80 bois. Une analyse statistique a permis d'établir des régressions multiples significatives entre ces deux groupes de paramètres ; elle conduit à la proposition de deux modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel l'un pour les bois feuillus et l'autre pour les bois résineux, et permet de prévoir de façon satisfaisante la matrice complète des complaisances élastiques pour un bois dont la masse volumique  $\rho$  est connue à un taux d'humidité voisin de 12 p.100. L'efficacité du modèle bois feuillus est discutée à partir de résultats expérimentaux obtenus sur le bois d'un même hêtre par neuf laboratoires.

*Mots clés : Elasticité, anisotropie, feuillus, résineux, modèles prévisionnels, masse volumique.*

### Introduction

La loi de comportement élastique, *de complexité minimale*, apte à rendre compte de certaines spécificités du comportement mécanique du matériau bois, implique de prendre en considération la forte anisotropie de ce matériau. Ceci a conduit, depuis fort longtemps (HEARMON, 1948) de nombreux chercheurs à développer des moyens expérimentaux variés, complexes et souvent coûteux, en vue d'identifier les nombreuses constantes élastiques (9 au minimum) nécessaires pour rendre compte du comportement élastique tridimensionnel du bois considéré, les expériences étant à renouveler pour les diverses essences.

Les auteurs présentent ici, une banque de données, relative à certaines caractéristiques élastiques et physiques de bois feuillus et de résineux extraites pour une part de sources bibliographiques variées, et pour certaines directement de travaux de notre laboratoire (SEICHPINE, 1980 ; BEN FARHAT, 1985).

Un traitement statistique confirme la masse volume  $\rho$  comme paramètre physique fortement explicatif de la variabilité totale des caractéristiques élastiques inter et intra essences.

Les résultats de recherche de régressions simples ou multiples, conduisent à la proposition de deux modèles prévisionnels pour le comportement mécanique élastique l'un pour les bois « feuillus » et l'autre pour les bois « résineux ». Le présent travail complète l'excellent document publié en 1973 par J. Bodig et J.R. Goodmann, en apportant de nouvelles données bibliographiques, résultats de campagnes expérimentales réalisées en France ces dernières années (PREZIOSA, 1983). Les différences quant à

TABLEAU F1  
Essences feuillues / Hardwood.

Nom scientifique commun	Réf.	H (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_L$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RT}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{TL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S^{-1}_{12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S^{-1}_{23}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S^{-1}_{31}$ (N/mm <sup>2</sup> )
PARKIA NITIDA DODOMISSINGA	1	13,8	0,26	587	263	5720	70	430	590	668	36400	13800
VOCHISIA Sp QURUBA	1	13,3	0,35	914	381	8124	60	440	580	1460	17000	26400
SIMARUBA AMARA MARUPA	1	14,3	0,42	1170	736	7070	70	680	880	1670	30500	16300
TERMINALIA SUPERBA LIMBA	1	12,8	0,55	1670	1170	11000	550	920	1050	2660	25400	28200
XYLOPIA PEGREOU	1	10,8	0,71	2480	1650	14900	460	1220	1470	4220	38200	40400
PELTOGYNE VENOSA AMARANTE	1	11,2	0,80	2740	1930	20100	630	1300	1620	4780	50900	35900
DIPLOTTOPIS FURPUREA COEURS DEHORS	1	9,7	0,85	2720	1920	23300	1350	1500	1660	4650	40300	84900
MANILKARA MABOKEENSIS MONGHINZA	1	12,8	0,98	4040	2190	21300	900	1420	1950	6650	51600	63500
MANILKARA BIDENTALA BALATA ROUGE	1	12,8	1,11	4640	3360	28500	1100	1710	2230	8060	65300	103005
HUMBERTIA MADAGASCA- RIENSIS ENDRANENDRANA	1	9,0	1,28	5630	5110	24000	1840	2800	2980	11200	55000	64400

TABLEAU F2  
Essences feuillues / Hardwood.

Nom scientifique commun	Réf.	H (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_L$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RT}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{TL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{12}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{23}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{31}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )
POPULUS ALBA PEUPLIER	1	13,7	0,40	1190	493	6830	200	900	1000	1350	15200	23200
QUERCUS Sp CHENE	1	13,7	0,63	2220	1320	9400	610	1100	1320	3440	24200	25300
FRAXINUS Sp FRENE	1	12,8	0,80	2240	1429	16300	520	1300	1330	3110	34100	101000
OCHRONA Sp BALSA WOOD	5	9,0	0,20	310	110	6420	30	210	320	457	12500	21100
ACER PSEUDO- ALPINE MAPLE	2-3	9,6	0,58	1550	890	10200	300	1120	1240	2041	21700	20800
BETULA Sp BIRCH	2-3	8,8	0,62	1130	630	16700	190	930	1200	1560	38500	34500
BETULA ALLE- GHANIENSIS YELLOW BIRCH	5	13,0	0,64	1140	730	14600	240	990	1080	1670	31400	29800
FAGUS SILVATICA RED BEECH	2-3-4	10,5	0,74	2280	1160	14000	470	1080	1640	3230	27000	31300
OCHRONA Sp BALSA WOOD	5	9,0	0,10	120	40	2490	10	90	130	168	4650	8070
FRAXINUS Sp ASH	2-3	9,2	0,68	1540	820	16100	280	910	1370	2220	31300	34500
FRAXINUS Sp ASH	6	14,0	0,80	1670	990	15300	250	620	880	2530	23500	28800
KHAYA Sp KHAYA	5	11,0	0,44	1150	520	10400	210	610	920	1960	16200	34700

TABLEAU F3  
Essences feuillus / Hardwood.

Nom scientifique commun	Ref.	H (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_k$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_L$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{KT}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{JL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{12}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{23}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{31}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )
SWIETENIA Sp MAHOAGNY	6	13,0	0,53	990	490	12600	150	480	620	1190	22600	41000
SWIETENIA Sp MAHOAGNY	5	12,0	0,50	1240	740	11600	330	760	1000	2160	21900	37600
CAVANILLESLIA PLATANIFOLIA ) QUIPO	5	10,0	0,10	240	40	1070	40	60	120	395	1460	4990
CAVANILLESLIA PLATANIFOLIA ) QUIPO	5	10,0	0,20	400	150	3360	70	140	220	984	4880	11100
LIQUIDAMBAR STRACIFLUA ) SWEET GUM	5	10,5	0,54	1380	600	11900	280	810	1180	1980	27900	33400
JUGLANS Sp WALNUT	6	11,0	0,59	1210	640	11400	230	710	980	1710	18000	23300
LIRIODENDRON TULIPIPERA ) WHITEWOOD	5	11,0	0,38	910	420	9890	110	680	730	1280	23500	30500
POPULUS TREMULOIDES ) QUAKING ASPEN	8	12,0	0,30	743	264	7850	83	447	601	584	25400	15400
POPULUS TREMULOIDES ) QUAKING ASPEN	8	12,0	0,31	712	281	9540	99	432	674	448	17100	11400
POPULUS TREMULOIDES ) QUAKING ASPEN	8	12,0	0,29	722	252	8900	102	429	647	615	11200	23500
QUERCUS Sp RED OAK	8	12,0	0,57	1180	614	15200	319	686	826	2480	29300	33600

TABLEAU F4  
*Essences feuillus / Hardwood.*

Nom scientifique commun	Réf.	H (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_L$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RT}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{TL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{12}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{23}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{31}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )
QUERCUS Sp RED OAK	8	12,0	0,60	1500	828	14800	398	695	967	2800	21600	25200
QUERCUS Sp RED OAK	8	12,0	0,58	1290	621	12700	301	767	940	2130	28200	48600
BAGASSA GUIANENSIS BAGASSE	11	12,0	0,68	1980	1450	12300	430	870	1090	3430	20600	60500
LOPHIRA ALATA AZOBE	11	12,0	1,02	4700	2880	19200	960	1400	2000	6970	91400	66700
LIRIODENDRON TULIPIFERA TULIFIER	10	9,7	0,54	1330	752	17000	333	925	1720	1560	43500	43700
FAGUS Sp HETRE	10	9,4	0,63	2040	867	14100	500	980	1850	2810	30400	38600
QUERCUS Sp CHENE	10	9,0	0,73	2090	1150	17500	220	670	1000	3080	25500	49500
CEIBA PENTANDRA FROMAGER	11	12,0	0,34	820	230	3140	180	230	450	1760	7140	13100
DISTEMONANTHUS BENTHAMIANUS MOVINGUI	11	12,0	0,76	2490	1730	16000	550	1230	1410	4100	28000	77000
EPERUA SALICATA MAPA	11	12,0	0,85	2920	1060	18100	570	740	1400	5000	50200	50900

TABLEAU RI  
Essences résineux / Softwood.

Nom scientifique commun	Ref.	H (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_K$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{\eta'}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{T_1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{KT}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{TL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{KL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{12}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{23}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{31}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )
THUJA OCCIDENTALIS ) NORTHERN WHITE CEDAR )	8	11,2	0,26	649	287	3540	53	663	746	1050	10400	10500
ABIES CASIOCARPA ) SUBALPINE FIR )	8	13,1	0,31	816	304	8020	48	461	558	1220	24200	23500
PICEA ENGELMANNII ) ENGELMANN SPRUCE )	8	12,2	0,31	763	374	6890	54	625	645	1330	20400	18700
" )	8	12,0	0,32	780	361	6322	71	788	854	1733	10623	12437
" )	8	12,0	0,33	1300	350	6050	76	873	962	1610	10000	11900
" )	8	12,0	0,32	351	379	5610	55	705	618	1180	5890	7640
THUJA PLICATA ) WESTERN RED CEDAR )	8	11,5	0,28	543	365	6680	35	577	584	1000	22600	17700
PINUS LAMBERTIANA ) SUGAR PINE )	8	11,9	0,36	884	588	6740	96	763	836	1830	19300	18900
PINUS NORTICOLA ) WESTERN WHITE PINE )	8	11,9	0,34	728	352	9270	94	443	478	1320	27000	28200
PICEA SITCHENSIS ) SITKA SPRUCE )	8	12,8	0,36	649	348	10700	41	438	533	1160	26900	31900
PINUS PONDEROSA ) PONDEROSA PINE )	8	12,9	0,41	946	642	7730	117	887	1070	1980	19300	22900
PINUS CONTORTA ) LUXURIFOLIA PINE )	8	12,8	0,34	666	447	6560	32	301	322	1290	10900	20000

TABLEAU R2  
Essences résineux / Softwood.

Nom scientifique commun	Réf.	H (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_R$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_T$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_L$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RT}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{TL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RL}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{12}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{23}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$-S_{31}^{-1}$ (N/mm <sup>2</sup> )
PINUS RESINOSA RED PINE	8	11,9	0,40	867	430	9870	114	800	945	1680	31300	28500
TSUGA HETEROPHYLLA ) WESTERN HEMLOCK )	8	13,2	0,36	598	323	10300	36	331	396	1040	19400	21300
TAXODIUM DISTICHUM ) BALD CYPRESS )	8	13,7	0,43	1040	475	12300	84	658	772	2700	37600	36300
PSEUDOTSUGA MENZIESII ) DOUGLAS FIR )	8	12	0,47	947	932	16700	114	800	747	2580	40000	31600
"	8	12	0,44	846	840	16800	109	854	711	1600	21300	26200
"	8	12	0,38	889	807	12314	114	874	743	1383	15247	41782
PINUS TAEDA LOBLOLLY PINE	8	13,4	0,47	1250	871	11100	142	898	903	2950	38000	33800
LARIX OCCIDENTALIS ) WESTERN LARCH )	8	12,6	0,44	923	759	11700	80	812	737	2260	42500	33000
PINUS SEROTINA POND PINE	8	12,6	0,58	1360	781	19000	173	862	958	2870	52300	68000
PINUS PALUSTRIS ) LONGLEAF PINE )	8	12,5	0,52	1490	805	14600	172	886	1040	2930	40100	44100
PINUS ELLIOTTI SLASH PINE	8	12,5	0,50	1190	725	16000	157	843	883	2200	36000	40800





l'interprétation des données expérimentales correspondant aux termes non diagonaux de la matrice d'élasticité, ont pour conséquence une meilleure cohérence interne des modèles prévisionnels proposés.

### 1. Les constantes élastiques : définitions, notations

Le matériau bois est considéré comme milieu continu, élastique, macroscopiquement homogène à symétrie matérielle orthotrope cylindrique (GUITARD, 1985) d'axes principaux suivant les directions radiale (R), tangentielle (T) et longitudinale (L) auxquelles correspondent les coordonnées spatiales cylindriques ( $r, \theta, z$ ), comptées à partir de l'axe de la grume.

Rappelons, pour des considérations de clarté de notations, que dans ce système d'axes, la loi de comportement élastique permet d'expliciter par exemple, les composantes  $\epsilon_{ij}$  du tenseur des déformations en fonction des composantes  $\sigma_{ij}$  du tenseur des contraintes à l'aide de neuf constantes élastiques linéairement indépendantes.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{rr} \\ \epsilon_{\theta\theta} \\ \gamma_{zz} \\ \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{r\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{bmatrix}$$

La matrice des complaisances élastiques, transcrite ici avec une contraction d'indices conventionnelle (GUITARD, 1987), est une matrice en théorie symétrique. Cette propriété résulte nécessairement de l'hypothèse d'existence d'un potentiel élastique forme quadratique définie positive des composantes des tenseurs des contraintes.

Par tradition, l'ingénieur utilise 12 grandeurs techniques pour caractériser le comportement élastique du bois, qui sont liées aux neuf complaisances élastiques par les relations suivantes :

- Trois modules d'Young :

$$E_R = S_{11}^{-1} ; E_T = S_{22}^{-1} ; E_L = S_{33}^{-1}$$

- Trois modules de cisaillement :

$$G_{TL} = S_{44}^{-1} ; G_{LR} = S_{55}^{-1} ; G_{RT} = S_{66}^{-1}$$

- Six coefficients de Poisson :

$$\nu_{RT}, \nu_{TR}, \nu_{TL}, \nu_{LT}, \nu_{LR}, \nu_{RL}$$

qui satisfont aux relations de symétrie suivantes :

$$S_{12} = S_{21} = -\frac{\nu_{RT}}{E_R} = -\frac{\nu_{TR}}{E_T} ; S_{23} = S_{32} = -\frac{\nu_{TL}}{E_T} = -\frac{\nu_{LT}}{E_L} ;$$

$$S_{31} = S_{13} = -\frac{\nu_{LR}}{E_L} = -\frac{\nu_{RL}}{E_R}$$

TABLEAU 1  
 Illustration de la variabilité des paramètres.  
 Parameters variability.

	FEUILLONS N = 43			Coefficient de variation CV %	RESINEUX N = 37			T.E.C. N = 80		
	Mini	Moy	Max		Mini	Moy	Max	Mini	Moy	Max
H (%)	8,8	11,5	14,3		9	12	13,7	8,8	11,8	14,3
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,10	0,581	1,28	45	0,260	0,415	0,590	0,1	0,498	1,28
E <sub>R</sub> MPa	118	1710	5630	70	351	915	1720	118	1313	5630
E <sub>T</sub> MPa	39	1020	5110	94	287	571	1090	39	796	5110
E <sub>L</sub> MPa	1050	12700	28500	47	3540	11700	19000	1050	12200	28500
- S <sub>RT</sub> <sup>-1</sup> MPa	165	2710	11200	81	1000	1880	5780	165	2300	11200
- S <sub>TL</sub> <sup>-1</sup> MPa	1430	29200	91400	58	5890	27200	52300	1430	28200	91400
- S <sub>RL</sub> <sup>-1</sup> MPa	4900	37300	103000	62	7640	30600	68000	4900	34000	103000
G <sub>TL</sub> MPa	59	841	2800	58	301	713	912	59	777	2800
G <sub>RL</sub> MPa	118	1110	2980	55	322	772	1750	118	941	2980
G <sub>RT</sub> MPa	10	385	1840	96	22	76,1	173	10	231	1840

## 2. Matériels : constitution de la banque de données

Les tableaux récapitulatifs reproduits en annexe, contiennent les éléments actuellement pris en compte dans la banque de données informatisée, disponible sur disquette et exploitable sur un système Apple II E.

Les références bibliographiques mentionnées dans ces tableaux ont été exploitées avec un soin particulier qui a permis d'éliminer les redondances possibles dans les publications successives.

Pour chaque individu (bois) répertorié, les paramètres retenus sont :

H : taux d'humidité en % dans les conditions d'essai.

$\rho$  : masse volumique en  $\text{g/cm}^3$  à l'humidité H d'essai.

$S_{ij}$  : neuf complaisances élastiques, correspondant aux définitions ci-dessus.

Remarque : De nombreux auteurs présentent leurs résultats en faisant apparaître les grandeurs techniques élastiques, nous les avons exprimées sous forme de complaisances élastiques :

Les termes non diagonaux de la matrice des complaisances sont alors calculés de la façon suivante :

- Lorsque l'auteur indique les coefficients de Poisson nécessaires :

$$S_{ij} = S_{ji} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\nu_{ij}}{E_i} + \frac{\nu_{ji}}{E_j} \right) \text{ pour } i \neq j$$

- Lorsque l'auteur n'indique que l'un des coefficients de Poisson nécessaires :

$$S_{ij} = S_{ji} = -\frac{\nu_{ij}}{E_i}$$

Cette démarche a pour conséquence de symétriser les matrices d'élasticité prises en compte, alors que les résultats expérimentaux ne vérifient pas nécessairement cette condition théorique.

La bibliothèque comprend, toutes essences confondues, un effectif total  $N = 80$  individus, qualifiés chacun par deux paramètres physiques et neuf caractères élastiques. Cette population totale comprend deux sous populations complémentaires, une population notée « F » de bois feuillus à effectif de 43 individus, et une population notée « R » de bois résineux à effectif de 37 individus. Ces individus appartiennent ou non à des espèces différentes. Un individu peut être la moyenne de certain nombre de points expérimentaux.

## 3. Traitements statistiques

Les traitements statistiques mis en œuvre permettent de rechercher les régressions simples (1 paramètre explicatif X) ou multiples (2 paramètres explicatifs X et Y) de la variable Z, sous forme de lois :

$$\text{linéaires : } Z = A + B_1X + B_2Y$$

$$\text{puissances : } Z = AX^{B_1}Y^{B_2}$$

TABLEAU 2  
 Régressions linéaires multiples « F » Feuillus : effectif N = 43.  
 Multi linear regressions for hardwood (N = 43).

Unités	$S_{ij}^{-1} = A + B_1 O + B_2 H$						$S_{ij}^{-1} = A + B_1 O + B_2 E_L$					
	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R multiple	R <sub>OS<sub>ij</sub><sup>-1</sup>.H partiel</sub>	R <sub>HS<sub>ij</sub><sup>-1</sup>.O partiel</sub>	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R multiple	R <sub>OS<sub>ij</sub><sup>-1</sup>.E<sub>L</sub> partiel</sub>	R <sub>ES<sub>ij</sub><sup>-1</sup>.O partiel</sub>
$S_{11}^{-1} = E_R$	740	4440	-5,87	0,932	0,931	-0,0209	-790	5080	-0,0351	0,935	0,761	-0,183
$S_{22}^{-1} = E_T$	-467	3280	-36,8	0,889	0,886	-0,129	-871	3880	-0,0289	0,889	0,661	-0,148
$S_{33}^{-1} = E_L$	4430	21100	-347	0,928	0,926	-0,238						
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_T E_R}{v_{TR}} = \frac{v_{RT}}{v_{TR}}$	-1140	7750	-56,7	0,910	0,908	-0,0960	-1750	9320	-0,0749	0,912	0,715	-0,185
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L E_T}{v_{LT}} = \frac{v_{TL}}{v_{LT}}$	-2910	52500	134	0,806	0,801	+0,0207	2050	23400	1,38	0,827	0,236	+0,312
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R E_L}{v_{RL}} = \frac{v_{LR}}{v_{RL}}$	-8480	69300	485	0,786	0,780	0,0530	-4070	20600	2,31	0,818	0,152	0,368
$S_{44}^{-1} = G_{TL}$	158	1690	-25,9	0,894	0,891	-0,180	-135	1770	-0,00409	0,891	0,619	0,0416
$S_{55}^{-1} = G_{LR}$	472	2030	-47,3	0,918	0,915	-0,307	71,8	1760	0,0122	0,910	0,591	0,115
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	-22,1	1220	-36,4	0,861	0,857	-0,213	323	1170	0,00219	0,854	0,517	0,0259

La pertinence des régressions simples, est appréciée par le calcul d'un coefficient de corrélation  $R_{zx}$  défini par :

$$R_{zx} = \sqrt{1 - \frac{[\text{variance résiduelle}]}{[\text{variance totale}]}}$$

Dans ces conditions, qu'il s'agisse d'une loi linéaire, ou d'une loi puissance, les coefficients calculés sont une mesure, définie positive, de la dispersion du nuage de points étudiés, autour de la courbe de régression choisie dans une même représentation graphique.

La qualité des régressions linéaires multiples est qualifiée de façon classique (NEPVEU, 1983) par la donnée du coefficient de corrélation multiple  $R_z(x, y)$  et des coefficients de corrélation partiels  $R_{xz \cdot y}$  et  $R_{yz \cdot x}$ . Enfin, la variabilité d'un paramètre X est qualifiée par un coefficient de variation CV exprimé en % :

$$CV \% = \frac{\sqrt{\text{variance totale}}}{\text{valeur moyenne}} \times 100$$

La variabilité résiduelle d'une variable Z, expliquée par un paramètre X, est qualifiée par un coefficient de variation résiduelle noté CVR exprimé en %.

$$CVR \% = \frac{\sqrt{\text{variance résiduelle}}}{\text{valeur moyenne}} \times 100$$

#### 4. Résultats

La recherche des corrélations entre les 11 caractères répertoriés par individu, et la présentation des résultats, résultent d'une démarche guidée par la remarque fondamentale suivante :

*La caractéristique élastique de première nécessité technologique est le module d'Young  $E_L$ , mesuré suivant la direction du fil d'un bois de masse volumique  $\rho$ , au taux d'humidité  $H$ .*

Le tableau 1 illustre la variabilité des caractéristiques des bois en précisant pour chacun des paramètres : les valeurs minimale, moyenne et maximale, ainsi que les coefficients de variation CV %.

Il est fondamental de noter que les bornes maxi et mini, observées pour la population « T.E.C. toutes essences confondues », sont strictement celles de la sous population « F » des feuillus, laquelle couvre la plus large plage de masses volumiques  $\rho$  (0,10 à 1,28 g/cm<sup>3</sup>).

Pour les données disponibles, la variabilité totale des propriétés physiques et mécaniques des résineux, population « R », est incluse dans celle des « F » et considérablement plus réduite (masses volumiques comprises entre 0,26 et 0,59 g/cm<sup>3</sup>).

En conséquence, les commentaires porteront dans la suite de cet article sur les deux sous-populations « R » et « F », une analyse plus complète sera présentée dans un mémoire de thèse (EL AMRI, à paraître).

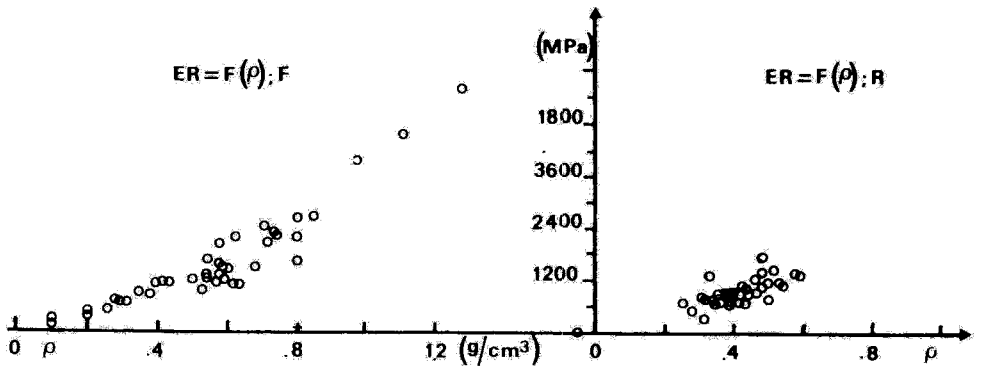


FIG. 1

FIG. 10

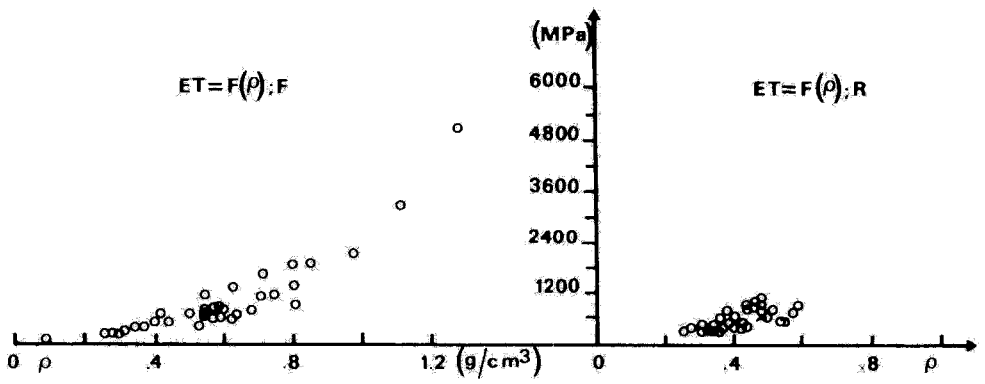


FIG. 2

FIG. 11

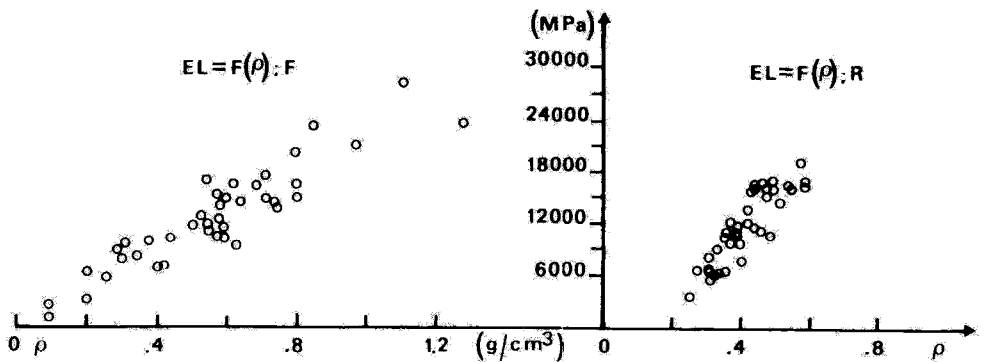


FIG. 3

FIG. 12

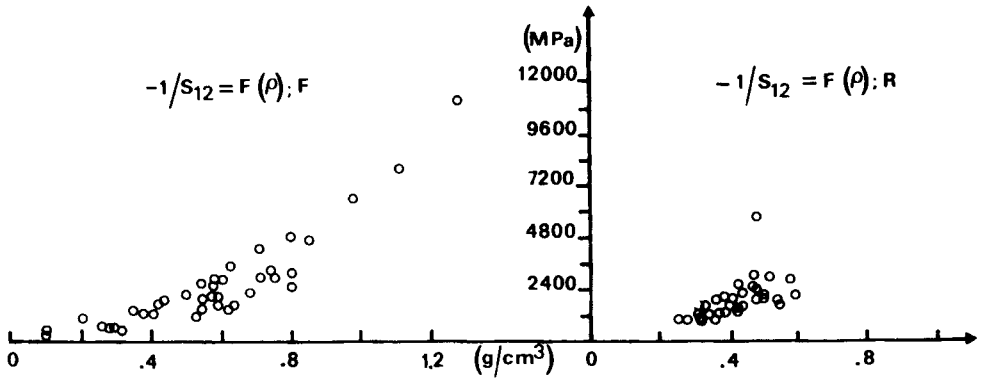


FIG. 4

FIG. 13

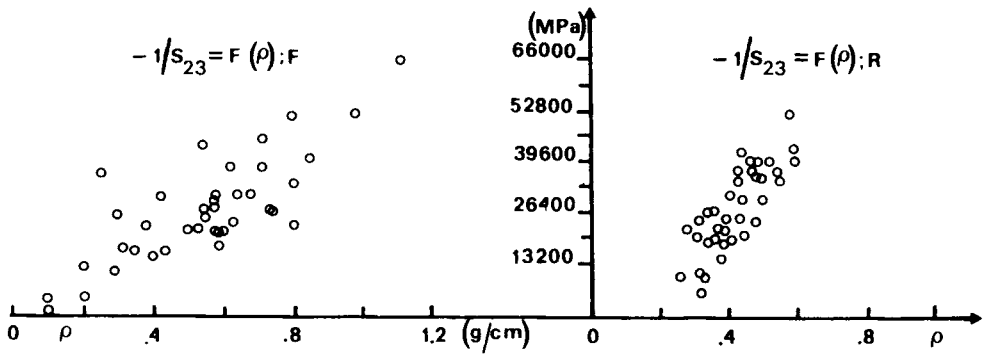


FIG. 5

FIG. 14

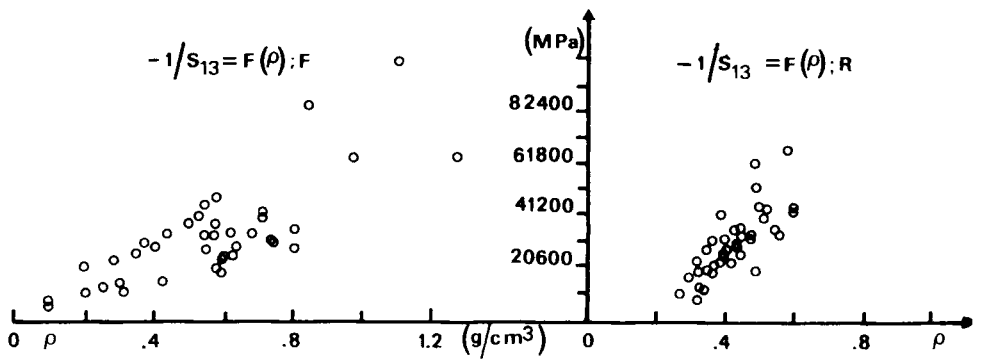


FIG. 6

FIG. 15

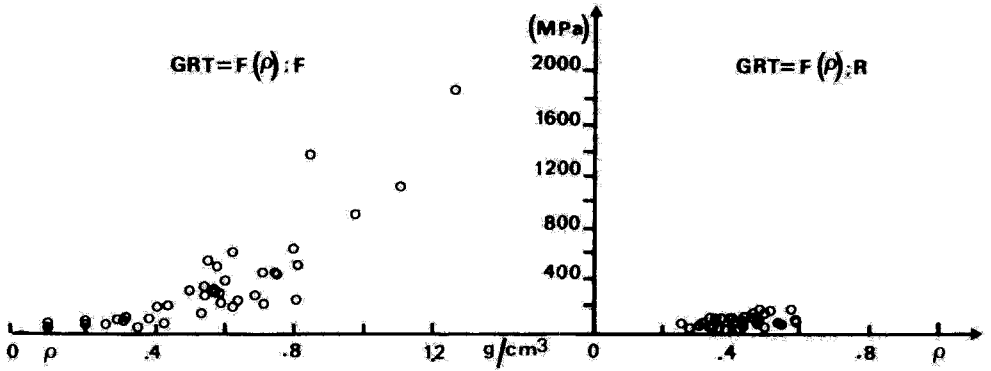


FIG. 7

FIG. 16

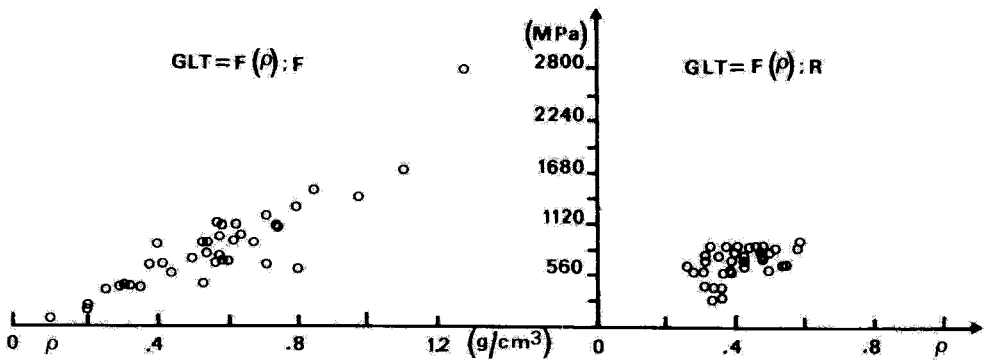


FIG. 8

FIG. 17

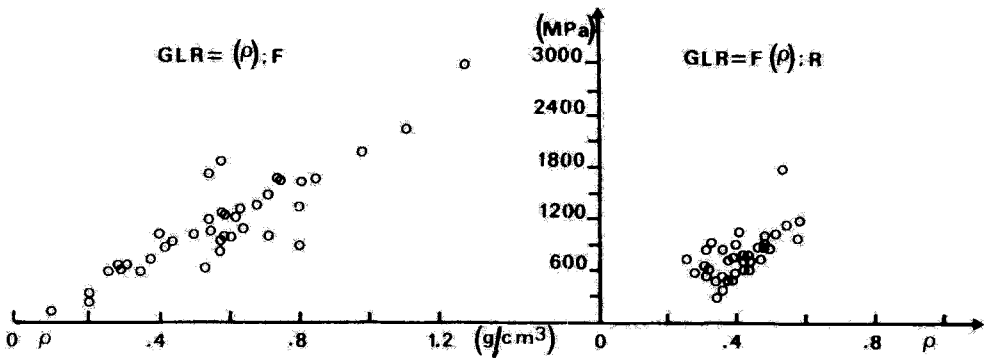


FIG. 9

FIG. 18



4.1. *Un modèle prévisionnel de comportement élastique tridimensionnel pour les « bois feuillus »*

Le tableau 2 donne les caractéristiques élastiques de bois feuillus sous forme de régressions linéaires multiples à deux paramètres explicatifs, soit, les couples ( $\rho$ , H), et ( $\rho$ ,  $E_L$ ).

Dans les deux cas, les coefficients de corrélations multiples sont très significatifs, supérieurs à  $R = 0,4843$  valeur limite au seuil de 1 % pour un nombre de degrés de liberté ici égal à  $N - 2 = 41$ .

L'examen des régressions linéaires multiples donnant les caractéristiques élastiques en fonction des deux paramètres physiques, masse volumique  $\rho$  et taux d'humidité H, conduit aux commentaires suivants :

La masse volumique  $\rho$  est la variable physique explicative majeure de la variabilité totale des constantes élastiques. Les pourcentages de la variance totale expliquée par  $\rho$  pour les différentes constantes élastiques sont les suivantes :

Complaisances <sup>-1</sup>	$S_{11}^{-1}$	$S_{22}^{-1}$	$S_{33}^{-1}$	$-S_{12}^{-1}$	$-S_{23}^{-1}$	$-S_{31}^{-1}$	$S_{44}^{-1}$	$S_{55}^{-1}$	$S_{66}^{-1}$
$R_{ZX}^2 \times 100$ .....	87	78	86	82	64	61	79	71	73

Le taux d'humidité H donne des coefficients de corrélation partiels qui révèlent les tendances globales dans le sens prévisible (GERHARDS, 1982), à savoir, une diminution des rigidités avec accroissement du taux d'humidité. Toutefois les coefficients sont non significatifs. La banque de données ne fait en effet intervenir que des mesures effectuées sur des bois stabilisés à des taux d'humidité, compris dans une fourchette étroite (9 à 14 p. 100) et le plus souvent voisins de 11,5 p. 100. L'influence de ce paramètre H ne sera plus discutée dans ce qui suit.

La seconde partie du tableau 2 permet d'examiner la pertinence de la donnée d'une caractéristique physique  $\rho$  et d'une caractéristique élastique  $E_L$  pour prévoir les autres caractéristiques élastiques.

La forte corrélation de  $E_L$  à  $\rho$  observée ci-dessus, est bien évidemment confirmée ici,  $\rho$  reste en effet la variable explicative majeure, exception faite pour les deux composantes non diagonales  $S_{23}$  et  $S_{31}$  qui sont mieux expliquées par le couple ( $\rho$ ,  $E_L$ ).

Sur les figures 1 à 9, les points représentatifs de chaque caractéristique élastique sont portés en fonction de la masse volumique. L'examen de ces nuages de points, suggère de discuter l'utilisation de lois de régressions en puissance de  $\rho$ . Dans ce but, le tableau 3 indique les régressions simples, linéaire et puissance de  $\rho$  correspondant à chaque constante élastique, exprimées en prenant comme masse volumique de référence  $\bar{\rho} = 0,65 \text{ g/cm}^3$ , valeur acceptable pour les bois feuillus employés industriellement.

La discrimination entre la loi linéaire et la loi puissance ne peut se dégager simplement d'une comparaison des coefficients de corrélations qui restent très voisins dans tous les cas.

TABLEAU 3  
*Régressions simples, linéaires et puissances pour des « Feuillus »*  
*Constantes élastiques, fonctions de la masse volumique  $\rho$ .*  
*Linear and power regressions for hardwood.*  
*Elastic parameters versus specific gravity relationships.*

Unités	Lois linéaires "P" $S_{11}^{-1} = S_{11}^{-1} + B(\rho - \bar{\rho})$ 10 <sup>6</sup> Pa	$R_{S_{11}^{-1}}$	CVR %	Lois puissances "P" $S_{11}^{-1} = S_{11}^{-1} \left(\frac{\rho}{\bar{\rho}}\right)^B$ 10 <sup>6</sup> Pa	R	CVR %
$S_{11}^{-1} = E_R$	2020 + 4340 ( $\rho = 0,65$ )	0,931	26	1810 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,33}$	0,935	25
$S_{22}^{-1} = E_T$	1240 + 3270 ( $\rho = 0,65$ )	0,884	44	1030 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,77}$	0,920	37
$S_{33}^{-1} = E_L$	14200 + 21100 ( $\rho = 0,65$ )	0,922	18	14200 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,03}$	0,918	18
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_R E_T}{\nu_{TR} \nu_{RT}}$	3250 + 7740 ( $\rho = 0,65$ )	0,907	35	2780 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,43}$	0,904	35
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L E_T}{\nu_{LT} \nu_{TL}}$	32800 + 52600 ( $\rho = 0,65$ )	0,801	35	31200 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,14}$	0,800	35
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R E_L}{\nu_{RL} \nu_{LR}}$	42100 + 69400 ( $\rho = 0,65$ )	0,780	39	39300 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,003}$	0,767	40
$S_{44}^{-1} = G_{TL}$	1070 + 1680 ( $\rho = 0,65$ )	0,888	24	916 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,25}$	0,895	26
$S_{55}^{-1} = G_{LR}$	125 + 2020 ( $\rho = 0,65$ )	0,907	22	1220 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,13}$	0,908	22
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	471 + 1220 ( $\rho = 0,65$ )	0,850	51	370 · $\left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,74}$	0,864	48

(1)  $\nu = N - 2 = 38$  Degrés de liberté.

\*\* Test significatif au seuil de 1 % A = 0,4026.

\*\*\* Test significatif au seuil de 1 % A = 0,5007.

Les régressions linéaires sont biaisées, elles conduisent en effet à des prévisions de rigidités négatives, pour des valeurs faibles, mais interpolées de  $\rho$ . En conséquence, le modèle prévisionnel de comportement élastique retenu est donné par les lois puissances du tableau 3. Toutes les grandeurs dans ce tableau sont indiquées par des nombres arrondis à 3 chiffres significatifs.

#### 4.2. *Un modèle prévisionnel de comportement élastique tridimensionnel pour les bois résineux*

La population « R » bois résineux est caractérisée par une plage de masse volumique sensiblement réduite (0,26 à 0,59 g/cm<sup>3</sup>) en regard de celle concernant les feuillus. Il apparaît sur le tableau 1 que le coefficient de variation de  $\rho$  passe de 45 p. 100 pour les feuillus à 20 p. 100 dans le cas des résineux, cette très sensible diminution du coefficient de variation est observable pour toutes les caractéristiques élastiques répertoriées.

Les conclusions et commentaires, pour cette population « R », quant à l'influence des paramètres physiques  $\rho$  et  $H$ , à travers des régressions linéaires multiples sont similaires à ceux formulés à propos de la population « F » et ne seront pas repris.

Les points représentatifs de chaque caractéristique élastique sont portés en fonction de  $\rho$  sur les figures n° 10-18 et le tableau 4 indique les régressions simples, linéaires et puissances de  $\rho$ , exprimées en prenant une masse volumique  $\bar{\rho} = 0,45$  g/cm<sup>3</sup>, valeur de référence acceptable pour les résineux employés industriellement.

Les qualités des régressions sont significatives au seuil de 1 %, à l'exception du module de cisaillement  $G_{RT}$  pour lequel les coefficients de corrélation indiquent des tests significatifs au seuil de 1 p. 100.

Les coefficients de corrélation relatifs aux lois linéaires sont, systématiquement, légèrement supérieurs à ceux obtenus pour les lois en puissances. De plus, l'étalement des masses volumiques représentatives des bois résineux, étant relativement étroit, l'utilisation de lois puissances n'est pas justifiée.

Les modèles de régressions linéaires seront retenus pour les résineux.

### 5. Discussion et conclusion

L'esprit du travail présenté ici s'inscrit dans la démarche générale suivie par J. BODIG et J.R. GOODMAN (1973), qui est de rechercher des modèles prévisionnels de lois de comportement élastique tridimensionnel pour les matériaux bois, à travers des corrélations interespèces. Il convient de souligner les compléments et différences qui distinguent les deux approches. En premier lieu, la prise en compte de travaux français récents a permis de compléter la banque de données. Pour les feuillus, l'effectif a été porté de 22 à 43, tandis que pour les résineux, l'effectif est passé de 33 à 37. Un second point est que les données bibliographiques sont, ici, exploitées en termes des neuf complaisances élastiques  $S_{ij}$  comme indiqué au paragraphe 2, de préférence à

TABLEAU 4  
*Régressions simples, linéaires et puissances pour les « Résineux »*  
*Constantes élastiques, fonctions de la masse volumique  $\rho$ .*  
*Linear and power regressions for softwood.*  
*Elastic parameters versus specific gravity relationships.*

Unités	Lois linéaires "R" $S_{ij}^{-1} = S_{ij}^{-1} + B(\rho - \bar{\rho})$ 10 <sup>6</sup> Pa	$\rho$ en gr/cm <sup>3</sup>	$R_{S_{ij}^{-1}}$	CVR %	Lois puissances "R" $S_{ij}^{-1} = S_{ij}^{-1} \left(\frac{\rho}{\bar{\rho}}\right)^b$ 10 <sup>6</sup> Pa	$R_{S_{ij}^{-1}}$	CVR %
$S_{11}^{-1} = E_R$	998 + 2360 ( $\rho - 0,45$ )		0,672	23	$972 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{1,04}$	0,667	23
$S_{22}^{-1} = E_T$	641 + 2020 ( $\rho - 0,45$ )		0,755	25	$618 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{1,50}$	0,747	26
$S_{33}^{-1} = E_L$	13100 + 43500 ( $\rho - 0,45$ )		0,880	17	$12900 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{1,75}$	0,860	18
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_R E_T}{\nu_{TR}}$	2090 + 5950 ( $\rho - 0,45$ )		0,576	37	$2000 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{1,29}$	0,566	37
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L E_T}{\nu_{LT}}$	30700 + 104000 ( $\rho - 0,45$ )		0,811	23	$29500 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{1,75}$	0,807	23
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R E_L}{\nu_{RL}}$	35000 + 132000 ( $\rho - 0,45$ )		0,805	26	$33300 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{1,91}$	0,803	26
$S_{44}^{-1} = G_{TL}$	748 + 1030 ( $\rho - 0,45$ )		0,529	19	$737 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{0,658}$	0,518	19
$S_{55}^{-1} = G_{LR}$	836 + 1850 ( $\rho - 0,45$ )		0,594	27	$802 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{0,886}$	0,576	27
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	84,5 + 247 ( $\rho - 0,45$ )		0,461	51	$72,1 \cdot \left(\frac{\rho}{0,45}\right)^{1,16}$	0,381	53

(1)  $\nu = N - 2 = 38$  Degrés de liberté.

\*\* Test significatif au seuil de 1 %  $R = 0,4128$ .

\*\*\* Test significatif au seuil de 1 %  $R = 0,5126$ .

l'utilisation des douze grandeurs techniques qui ne sont, théoriquement, pas indépendantes. En effet, le choix d'un modèle de loi de comportement mécanique élastique linéaire, conduit à l'hypothèse d'existence d'une densité volumique de potentiel élastique, forme quadratique définie positive des composantes par exemple du tenseur des contraintes. Ceci implique la symétrie de la matrice des complaisances élastiques,  $S_{ij} = S_{ji}$ .

Dans ces conditions, les mesures, par exemple, des deux modules d'Young  $E_R$  et  $E_T$  et des deux coefficients de Poisson  $\nu_{RT}$  et  $\nu_{TR}$ , donnent quatre informations chiffrées pour déterminer trois grandeurs théoriques indépendantes. Le mode d'exploitation des données, précisé au paragraphe n° 2, est ainsi parfaitement justifié. Il a pour conséquence majeure de fournir des régressions significatives entre les complaisances non diagonales et la masse volumique. Ce qui n'est pas le cas lors du traitement direct des coefficients de Poisson, en particulier pour les résineux (BODIG, 1973).

Les deux modèles prévisionnels de loi de comportement élastique proposés pour les bois feuillus sur le tableau 3 (lois puissances) et pour les résineux sur le tableau 4 (lois linéaires) permettent de calculer l'ensemble des termes de la matrice des complaisances élastiques pour un bois dont on connaît la masse volumique  $\rho$  mesurée à un taux d'humidité stabilisé au voisinage de 12 p. 100. Sur ces tableaux, un coefficient de variation résiduelle CVR p. 100 pour chaque caractéristique élastique, illustre la part de variabilité du paramètre non expliquée par la masse volumique. L'examen de ces CVR doit être fait en gardant présent à l'esprit que les résultats expérimentaux collectés sont intéressants, obtenus au moyen de méthodes expérimentales variées, par différents expérimentateurs. Les prévisions proposées sont particulièrement satisfaisantes. Elles conduisent à des incertitudes du même ordre que celles qui découleraient d'une campagne expérimentale.

En effet, dans le cadre du contrat D.G.R.S.T. n° 81-G-1058 (PLUVINAGE G., 1985), neuf laboratoires ont été associés à une campagne expérimentale visant à comparer leur méthodologie de mesure de la matrice des complaisances élastiques en travaillant chacun sur plusieurs éprouvettes découpées dans une même grume de hêtre. Les différents lots d'éprouvettes prélevées sur une même grume, échantillonnés par les soins de la Station de Recherches sur la Qualité des Bois du Centre de Recherches forestières de l'INRA (Champenoux), de telle sorte que l'on puisse raisonnablement considérer que l'échantillon moyen était identique pour tous les laboratoires.

Les résultats des essais exécutés par le L.E.M.T.A. (méthode du cube unique), reportés sur le tableau 5, concernent les valeurs moyennes des constantes élastiques mesurées sur 25 cubes de masse volumique moyenne  $\rho = 0,676 \text{ g/cm}^3$  (CV = 2,3 p. 100). Les coefficients de variation observés pour chaque caractéristique sont indiqués. Sur le même tableau 5 sont portées les valeurs prévues par le modèle bois feuillus (lois puissances tableau 3) pour la masse volumique considérée, ainsi que les coefficients de variations résiduelles correspondants.

Certaines rigidités élastiques, particulièrement suivant les directions transverses au fil du bois sont par défaut en regard du modèle. Ceci s'explique en partie du fait que la méthode L.E.M.T.A. suppose actuellement la stabilisation d'un fluage primaire avant l'enregistrement des élongations (quelques dizaines de secondes). Les élongations mesurées sont donc majorées par rapport à une méthode à vitesse de chargement constant, en conséquence les rigidités apparentes sont plus faibles.

TABLEAU 5

*Mesures et prévisions des caractéristiques élastiques d'un hêtre.  
Experimental and predicting elastic parameters of beech.*

	$S_{11}^I$	$S_{22}^I$	$S_{33}^I$	$-S_{12}^I$	$-S_{23}^I$	$-S_{31}^I$	$-S_{44}^I$	$-S_{55}^I$	$-S_{66}^I$
Hêtre									
Valeurs moyennes sur 25 cubes L.E.M.T.A. MPa . . . . .	1 550	660	14 900	1 530	22 600	19 700	959	1 490	363
CV % . . . . .	7	7	6	11	18	25	9	16	13
Hêtre									
Modèle feuillus. Prévisions $\rho = 0,676 \text{ g/cm}^3$ MPa . . . . .	1 900	1 100	15 000	2 830	32 500	38 700	1 020	1 320	391
CVR % . . . . .	25	37	18	35	35	40	26	31	48
Hêtre									
Moyennes sur 8 laboratoires MPa . . . . .	1 903	890	15 241	2 576	39 419	42 796	1 043	1 400	389
CV % . . . . .	22	23	12	41	56	42	20	29	23

Enfin, les dernières lignes du tableau 5 indiquent les valeurs moyennes et les coefficients de variation de chaque constante élastique du même bois de hêtre, calculées sur un effectif de  $N = 8$ , correspondants aux résultats affichés par les huit équipes sur dix qui ont, en définitive, transmis des conclusions expérimentales dans le cadre du contrat ci-dessus mentionné. Une lecture comparative de l'ensemble du tableau montre, d'une part que le modèle prévisionnel proposé ici pour les bois feuillus, fournit une loi de comportement élastique tridimensionnelle pour le bois de hêtre étudié, tout à fait satisfaisante ; d'autre part, que la multiplication des démarches expérimentales (ici à effectif de 8) n'a pas réduit de façon significative l'intervalle d'incertitude prévu par le modèle.

Il convient de noter que les résultats du contrat relatifs au bois de hêtre ne sont pas inclus dans la banque de données ayant servi à créer les modèles prévisionnels.

En conclusion, le traitement statistique d'une banque de données mécanophysiques, relatives à 43 bois feuillus et 37 bois résineux, permet de proposer deux modèles prévisionnels de loi de comportement élastique en fonction de la masse volumique  $\rho$  du bois considéré à un taux d'humidité  $H$  voisin de 12 p. 100.

L'introduction d'un paramètre supplémentaire, tel que le module longitudinal  $E_L$ , n'améliore pas de façon significative les régressions multiples.

Les difficultés de mise en œuvre d'une méthode expérimentale pour l'identification de la matrice des complaisances élastiques sont telles que les incertitudes sur les résultats obtenus sont du même ordre que celles inhérentes aux modèles proposés. La voie expérimentale ne devrait être choisie que si l'utilisation ultérieure de la matrice complète des complaisances élastiques est pleinement justifiée.

Dans la majorité des cas, l'ensemble des caractéristiques du comportement élastique tridimensionnel d'un bois ne sera nécessaire que comme données matérielles, dans un problème de mécanique, généralement résolu par une méthode informatisée, type méthode aux éléments finis. L'ingénieur pourra valablement utiliser l'un des modèles élastiques de bois standards proposés et prendre en compte les corrections en masse volumique.

*Reçu le 16 juin 1986.*

*Accepté le 24 décembre 1987.*

### Remerciements

- Une part de la collecte et de l'informatisation de la banque de donnée a été assurée grâce à la contribution de Monsieur SOTOMAYOR et de Monsieur FALLOU durant leur stage au L.E.M.T.A.
- Cette recherche relevant de la Rhéologie du Bois a été exécutée et a reçu un support financier dans le cadre des activités du G.S. Rhéologie du Bois n° 410082 du C.N.R.S., et n'a pu se développer qu'en étroite collaboration scientifique avec le C.N.R.F., le C.T.B.A. et le C.T.F.T.

### Summary

#### *Tridimensional elastic behaviour predicting models for hardwood and softwood*

Computed data, including physical properties such as specific gravity  $\rho$ , moisture content  $H$ , and anisotropic elastic properties are available, here for 80 different wood species. Statistical analyses showed significant multiregressions within these parameters. This leads to the proposal of two predicting models for the triaxial elastic behaviour for hardwood and softwood. It is then possible to predict the complete elastic compliance matrix for a certain wood whose specific gravity is known, at a nearly 12 p. 100 moisture content. The efficiency of the hardwood elastic model is discussed through experimental results given for the same Beech by eight laboratories.

*Key words : Elasticity, anisotropy, hardwood, softwood, predicting models, specific gravity.*

### Références bibliographiques

- HEARMON R.F.S., 1948. The elasticity of Wood and Plywood. Department of Scientific and Industrial Research. Forest Products Research, Special Report n° 7, London.
- SEICHEPINE J.L., 1980. *Mise au point d'une méthode expérimentale destinée à l'identification de la matrice des complaisances élastiques de solides anisotropes : Application aux matériaux bois.* Doctorat d'Ingénieur, I.N.P. de Lorraine, Nancy.
- BEN FARHAT M., 1985. *Contribution à la mesure des constantes rhéologiques du bois par compression d'échantillons cubiques.* Doctorat de 3e cycle, I.N.P. de Lorraine, Nancy.
- BODIG J., GOODMAN J.R., 1973. Prediction of elastic parameters for wood. *Wood Science*, **5** (4), 249-264.

- GUITARD D., 1985. *Comportement Mécanique du Bois. Dans le matériau bois : propriétés - technologie - mise en œuvre.* Ecole d'Hiver sur le Bois à Albe (68), Ed. Arbolor, Nancy, B<sup>1</sup>29-B<sup>1</sup>116.
- GUITARD D., 1987. *Mécanique du matériau bois et composites.* Collection nabla. C.E.P.A.D.U.E.S. Editions, Toulouse, 220 pages.
- NEPVEU G., 1983. *Eléments de statistique,* INRA-C.N.R.F. Champenoux : Station de Recherches sur la Qualité des Bois.
- EL AMRI F. Rhéologie du bois (1987). Contribution à la modélisation élastique anisotrope dans le matériau bois-feuillu et résineux. Thèse de Doctorat, I.N.P.L., Nancy.
- GERHARDS C.C., 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of Wood : An Analysis of immediate effects. *Wood and Fiber*, January, **14** (1).
- PLUVINAGE G., 1985. Rapport Contrat D.G.R.S.T. 81 G 1058. *Etude critique de la détermination expérimentale des constantes élastiques dans le bois.*
- PREZIOSA C., 1982. *Méthode de détermination des constantes élastiques du matériau bois par utilisation des ultrasons.* Thèse de Docteur Ingénieur, Université d'Orléans.
- STAMER J., SIEGLERSCHMIDT H., 1933. V.D.I. page 503. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, bd 77, Berlin, Nr 19.
- KOLLMANN F.F.P., COTE W.A. *Principales of Wood Science and Technology.* Volume I. *Solid Wood*, 294-296. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- LAUNAY J. E.S.E.M. Orléans, Communication personnelle.