



FIG. 1. — Vue du microscope avec dispositif d'analyse semi-automatique d'image.

ANISOTROPIE DE RETRAIT ET STRUCTURE DU BOIS :

Recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres

par Christophe MASSERANN et Alain MARIAUX (1)

(1) En 1983, A. MARIAUX, alors chef de la division d'anatomie des bois au Centre Technique Forestier Tropical, avait proposé ce sujet de travail à C. MASSERANN pour son Mémoire de D.E.A. de Sciences du Bois. C. MASSERANN a

réalisé lui-même les préparations, les mesures ainsi que les programmes de l'ordinateur. Son mémoire a été présenté en octobre 1983 à l'Institut Polytechnique de Lorraine. A. MARIAUX a rédigé le présent article. Les photographies sont de A. VITALIS-BRUN.

SHRINKAGE ANISOTROPY AND STRUCTURE OF WOOD : RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE TRANSVERSE MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF FIBRES

Making use of the new possibilities with regard to quantitative anatomy of a semi-automatic image analyser, the microscopic study of 26 samples of linear shrinkage of Terminalia superba provided data on the average characteristics of sections of fibres and also on the proportion of radii. It was found that the variation in anisotropy of transverse shrinkage is predominantly linked with the variation in the radial diameter of the fibres. However, a wood with isodiametric fibres may not present an isotropic transverse shrinkage. The hypothesis is advanced that the tangential wall is much more retractile in both directions than the radial wall.

RESUMEN

ANISOTROPIA DE CONTRACCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA MADERA : INVESTIGACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS CARACTERES MORFOLÓGICOS TRANSVERSALES DE LAS FIBRAS

El estudio microscópico de 26 probetas de contracción lineal de Terminalia superba ha permitido obtener las características de promedio de las secciones de fibras y, asimismo, la proporción de radios, utilizando para ello las nuevas posibilidades de un analizador semiautomático de imágenes, en su aplicación a la anatomía cuantitativa. Se ha encontrado que la variación de la anisotropía de contracción transversal se encuentra vinculada de forma predominante a la variación del diámetro radial de las fibras. No obstante, una madera de fibras isodiamétricas no parece que llegue a presentar una contracción transversal isotropa. El autor se sitúa en la hipótesis que la pared tangencial es mucho más retráctil en ambas direcciones que la pared radial.

Avec 6 années d'écart, ce travail se veut la suite logique de l'« essai d'approche statistique » publié dans la même revue par Mariaux et Narboni en mars 1978.

L'historique des recherches de nombreux auteurs dans ce domaine ne sera donc pas recommencé ; depuis cette date, si quelques publications intéressantes sur le retrait pourraient être citées, elles ne font guère avancer la question de l'anisotropie du retrait, différence toujours dans le même sens entre les retraits transversaux dans les directions tangentielle et radiale des bois. On citera cependant KAWAMURA (1979) qui a renouvelé sur un chêne (*Quercus glaucus*) la preuve d'un rôle clair des rayons dans la restriction du retrait radial : il montre que du tissu fibreux exempt de rayons conserve néanmoins une partie de l'anisotropie de retrait.

Mis à part les cas particuliers de bois à très gros rayons, ou à très grande hétérogénéité entre bois initial et bois final, un large consensus rassemble les spécialistes sur le rôle primordial du tissu fibreux lui-

même, ce qui laisse encore beaucoup d'hypothèses en jeu : dimensions transversales des fibres, différence d'épaisseur des parois, microstructure fibrillaire de ces parois, composition chimique de leurs différentes couches et notamment de la lamelle moyenne.

Les recherches antérieures comme les calculs théoriques montrent que les variations d'inclinaisons des microfibrilles peuvent expliquer, quand elles existent, une petite partie seulement de l'anisotropie.

Dans sa synthèse des travaux sur la question, BOYD (1974) suggère que des données sur la répartition de la lignine et sur les caractères morphologiques des fibres sont peut-être les éléments d'explication qui nous manquent pour parvenir à une bonne prédiction de l'anisotropie. Notre analyse statistique de 1977 met en vedette le diamètre des fibres.

Nous avons donc essayé d'apporter des données nouvelles et significatives sur le rôle des caractères morphologiques transverses des fibres, sans négliger cependant la mesure des rayons.

MÉTHODE D'ÉTUDE

Un exposé assez développé sur la méthode suivie pour cette étude est justifié par la difficulté que l'anatomiste a toujours connue pour effectuer des mesures très nombreuses, et pour travailler sur des

échantillons volumineux. L'introduction d'appareils de mesure plus ou moins automatiques permet maintenant une anatomie quantitative indispensable dans un cas comme le nôtre.

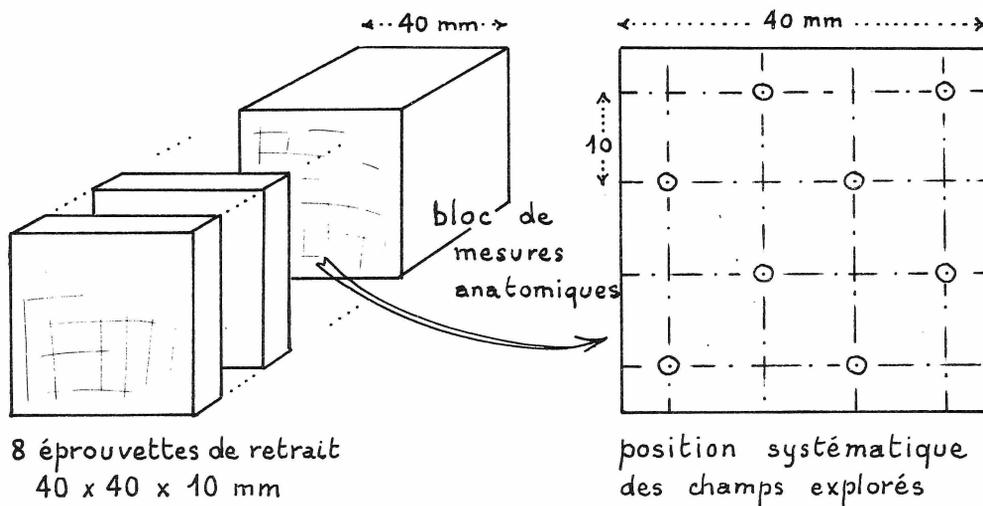


FIG. 2. — Découpe des éprouvettes et champs de mesure.

Comme pour nos études antérieures, l'idée de départ est de travailler sur le stock d'éprouvettes du Laboratoire des essais physiques et mécaniques du Centre Technique Forestier Tropical. En fait il ne s'agit pas des éprouvettes de retrait elles-mêmes, mais d'un tronçon du tasseau dont elles ont été tirées et qui n'a pas subi la dessiccation absolue qu'imposent ces essais. Ce tronçon, qui sera notre éprouvette, a donc la même section de 40×40 mm et la même position dans les cernes, c'est-à-dire la même structure que les éprouvettes de retrait (fig. 2).

Les valeurs du retrait ont été recueillies auprès du laboratoire des essais : retrait tangentiel T , retrait radial R , d'où l'anisotropie T/R ; en complément on a noté la masse volumique ou densité du bois D_{12} à l'humidité de 12 %. Une grande partie de ces caractéristiques ont été publiées par P. SALLENAVE.

PRÉPARATIONS

Pour mesurer transversalement des fibres suivant des orientations connues, la méthode classique est la coupe mince, mais nous voulions observer l'ensemble des sections de 40×40 mm, impossibles à trancher d'une seule pièce. Une fragmentation était certes possible, mais en outre il aurait fallu procéder au ramollissement habituel par l'eau chaude, puis à la coloration et au séchage, ce qui peut altérer chimiquement ou mécaniquement la forme naturelle des fibres.

La technique choisie a donc été l'observation en lumière incidente directement sur le bloc de bois massif. Celui-ci a été finement poli par un ponçage progressif et croisé jusqu'au grain 1200. Bien que l'examen au microscope électronique à balayage, également envisagé (fig. 2 gauche), montre une surface totalement écrasée et inobservable, il ne s'agit en fait que d'une très fine pellicule de membranes désagrégées et feutrées,

transparentes au microscope optique et permettant une bonne observation (fig. 2 droite) sans aucune imprégnation préalable.

DISPOSITIF D'OBSERVATION

Le microscope était équipé d'un éclairage incident annulaire oblique dans l'objectif et d'un système classique de chambre claire à dessin permettant de superposer à l'image du bois observé celle d'une surface de travail. Sur cette surface était disposée une table à numériser dont le curseur était muni d'un LED, c'est-à-dire d'un point lumineux que l'observateur au microscope peut superposer avec précision aux points de l'image à mesurer. Reliée à un ordinateur, la table à numériser transforme la position du curseur en donnée numérique (x, y) et nous avons composé des programmes répondant précisément à notre projet (2).

Le choix de l'objectif, de l'oculaire de chambre claire, du tirage de celle-ci permet d'obtenir une échelle d'image virtuelle adaptée aux mesures à effectuer. Pratiquement nous avons travaillé avec un déplacement du curseur de 925 fois la grandeur réelle et avec un diamètre de champ de 275 microns.

MESURES SUR LES FIBRES

L'éprouvette est calée sur la platine du microscope et des repères permettent de cadrer successivement sur 8 champs en quinconce (fig. 2), les mêmes pour toutes

(2) Microscope Leitz Ortholux II avec objectif Ultropak $40 \times$ et chambre claire $\times 16$. Dispositif Digipet de Reichert : table à numériser Summagraphics et ordinateur Commodore série 4000.

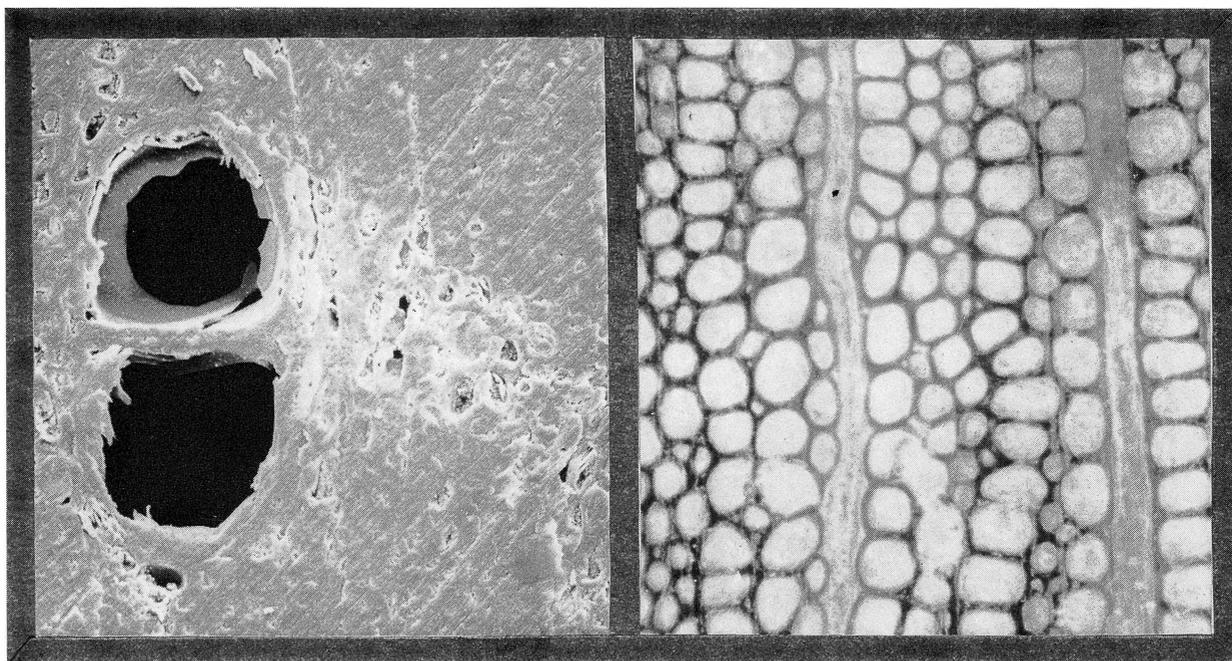
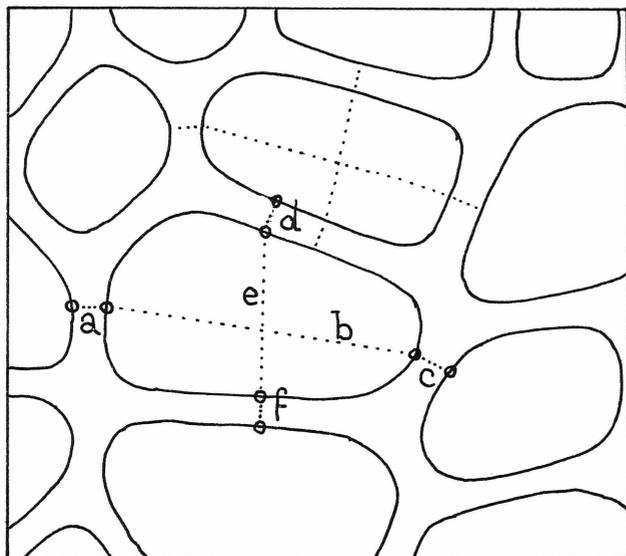


FIG 3. — Section transversale polie par ponçage au grain 1200 :
à gauche, vue au M.E.B. $\times 150$, à droite, vue en lumière incidente $\times 400$.

les éprouvettes. Si un vaisseau ou un amas de parenchyme encombre le champ, on se donne la latitude d'un déplacement de 1 mm vers une plage de fibres. Dans chaque champ on mesure environ 40 fibres, soit au total 320 par éprouvette.

FIG. 4. — Mesure d'une fibre : les 8 points d'impulsion du curseur.



Pour chaque fibre on parcourt deux traversées diamétrales, l'une aussi tangentielle et l'autre aussi radiale que possible (fig. 3). La lamelle mitoyenne étant inégalement perceptible, on a adopté de pointer les bords des cavités des cellules voisines et de la fibre mesurée, prenant donc de chaque côté la double paroi. Avec les 8 positions ainsi pointées l'ordinateur calcule et met en mémoire les 4 grandeurs recherchées :

$$\begin{aligned} \text{paroi radiale } P_r &= (a + c)/2, \\ \text{diamètre tangentiel } D_t &= P_r + b, \\ \text{paroi tangentielle } P_t &= (d + f)/2, \\ \text{diamètre radiale } D_r &= P_t + e. \end{aligned}$$

Ce protocole est critiquable sur plusieurs points :

- sur le choix des fibres mesurées car l'opérateur a tendance à choisir les grandes fibres plus nettes, notamment en séries radiales ;
- sur les fibres en contact avec des cellules de parenchyme à paroi plus mince, qu'il a fallu éviter ;
- sur la forme de la section d'une fibre, parfois loin d'être rectangulaire, ce qui rendait difficile l'interprétation du diamètre tangentiel ;
- sur la précision : le diamètre du LED correspond à environ 0,5 micron à l'échelle de l'objet, ce qui n'est pas négligeable face à une double paroi de 3 microns d'épaisseur et requiert un centrage attentif du LED sur chaque point de mesure ;
- sur l'épuration des histogrammes de fibres, prévue dans le programme pour éliminer des valeurs aberrantes dues à de fausses manœuvres, et qui peut paraître arbitraire.

MESURE DES RAYONS

La surface transversale de l'éprouvette est une section aléatoire dans l'axe longitudinal du bois. Le diamètre tangentiel du champ mesuré est une section aléatoire dans l'axe radial. La largeur cumulée des rayons,

rapportée au diamètre du champ, est représentative de la proportion en volume des rayons dans le bois. 16 champs sont explorés sur chaque éprouvette. L'aspect interprétatif est réduit à l'estimation de la limite entre rayon et fibres, surtout pour les rayons traversés à leur extrémité.

CHOIX DES BOIS ÉTUDIÉS

Nous avons choisi de commencer sur une seule espèce pour limiter les variations de plan ligneux et nous attacher aux seules variations étudiées, section des fibres et proportion des rayons. Nous avons recherché une espèce dont le T/R s'étende sur une grande plage de valeurs et pour lequel nous pourrions disposer d'un grand nombre d'essais. De plus il était souhaitable que son plan ligneux ne soit pas trop complexe.

Le Limba, *Terminalia superba* (Combrétacées), arbre très commun dans l'ouest de l'Afrique, répondait assez bien à ces conditions par un T/R s'étendant de 1 à 2,6 (histogramme fig. 5), par 56 essais sur des arbres différents, et par l'absence de parenchyme dispersé parmi les fibres. Les individus à étudier ont été tirés au sort et retenus dans la limite de 3 essais par classe de T/R (le reste de la classe étant retiré du tirage au sort). 26 éprouvettes ont été retenues. Leur humidité mesurée sur d'autres éprouvettes du stock était de $8\% \pm 0,5\%$.

REMARQUE :

Malgré le soin apporté au traçage des éprouvettes avant les essais physiques, il apparaît après polissage que quelques-unes ne sont pas parfaitement orientées. Cela entraîne une erreur de détermination des valeurs T , R et T/R que nous pouvons évaluer d'après KEYLWERTH avec une approximation raisonnable :

$$\begin{aligned} T \cos^2 \varphi + R \sin^2 \varphi &= T_{\varphi}, \\ T \cos^2 \varphi + R \cos^2 \varphi &= R'_{\varphi}, \end{aligned}$$

φ étant l'angle de l'axe de l'éprouvette avec la direction des rayons, T et R les retraits mesurés. D'où T et R vrais.

La figure 6b montre un cas assez fort de mauvaise orientation. Pour cette éprouvette (n° 18) le calcul a donné les valeurs suivantes, l'angle φ étant estimé à 10° .

	T	R	T/R
valeur mesurée	6,4	3,8	1,68
valeur calculée	6,48	3,71	1,746

Cette éprouvette passerait du 18^e au 19^e rang, mais le déplacement du point dans les nuages de points que nous verrons plus loin, est faible (voir fig. 13).

PRÉSENTATION DES MESURES

Pour les 26 éprouvettes analysées le tableau qui suit récapitule les valeurs moyennes obtenues pour les diamètres, les épaisseurs des parois, les proportions de rayons, ainsi que les données physiques, masse volumique D_{12} , retrait linéaire total tangentiel T et radial R , enfin rapport T/R de ces 2 retraits (anisotropie). Chaque valeur donnée anatomique est la moyenne des 300 mesures faites sur l'éprouvette. Les éprouvettes sont classées dans l'ordre des T/R croissants.

(Rappelons que ce tableau rassemble et synthétise les 4 mesures faites sur chacune des 300 fibres de chacun des 26 bois, plus environ 1.040 rayons, soit plus de 32.000 mesures).

FIG. 5. — Histogramme des valeurs de T/R des essais de limba. En grisé, l'échantillonnage retenu pour l'étude.

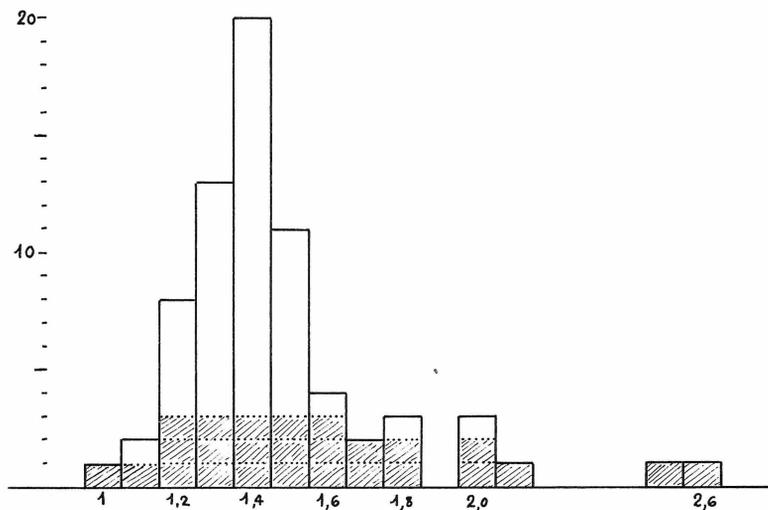
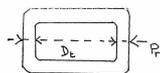


TABLEAU DES DONNÉES

BOIS (numéro d'ordre) N°	FIBRES (µm par éprouvette)				RAYONS Traversée tangente. % RAY	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES				Identif. (numéro d'essai) n°
	Traversée tang. diam. D_t		Traversée rad. diam. D_r			Retraits linéaires			Aniso. T/R	
	diam. D_t	parois P_r	diam. D_r	parois P_t		Masse volum. D_{12}	tang. T	rad. R		
1	15,7	3,6	13,7	3,3	12,6	0,56	6,0	6,1	0,98	1924
2	17,2	4,4	12,4	3,6	11,3	0,60	5,0	4,7	1,06	1924B
3	17,8	5,1	13,3	4,2	10,6	0,68	6,9	5,9	1,17	1877
4	17,4	5,7	14,3	5,2	12,2	0,60	7,0	5,8	1,21	760
5	16,0	3,8	12,4	3,2	8,3	0,52	7,1	5,8	1,22	844
6	19,2	5,2	15,0	4,1	9,9	0,58	6,7	5,3	1,26	1899
7	19,7	4,3	16,2	3,7	8,0	0,53	5,8	4,5	1,29	1057
8	19,8	5,2	15,3	4,3	10,0	0,69	8,3	6,2	1,34	1904
9	19,4	4,9	17,5	4,2	8,4	0,64	8,3	6,1	1,36	790
10	17,7	3,9	15,8	3,3	7,8	0,58	7,3	5,3	1,37	1932
11	19,0	3,8	19,5	3,4	6,5	0,50	8,4	5,8	1,44	846
12	19,3	4,3	14,7	3,7	6,1	0,51	6,8	4,5	1,46	1898
13	18,8	6,6	14,7	5,6	11,6	0,68	9,4	6,4	1,47	1904B
14	18,3	3,6	16,6	2,9	8,7	0,51	6,7	4,4	1,52	1056
15	18,9	3,1	18,3	2,9	7,7	0,49	5,3	3,4	1,56	845
16	16,6	3,3	14,1	2,7	10,0	0,55	5,0	3,2	1,56	1923
17	17,3	4,4	16,9	4,6	8,9	0,60	6,7	4,2	1,60	1919
18	18,2	3,6	20,0	3,6	7,6	0,44	6,4	3,8	1,68	1922
19	18,9	3,8	17,7	3,4	8,5	0,51	6,6	3,9	1,69	1901
20	18,1	3,6	18,9	3,4	9,5	0,52	5,6	3,2	1,75	1921
21	17,9	3,3	18,4	3,3	8,0	0,53	5,7	3,2	1,78	1998
22	19,9	2,8	21,8	2,7	5,3	0,48	5,5	2,8	1,96	2495
23	19,3	2,7	22,3	2,7	6,9	0,43	4,4	2,2	2,00	1773
24	17,2	2,7	20,0	2,8	8,5	0,45	5,0	2,4	2,08	849
25	18,0	2,7	22,7	2,6	7,9	0,40	5,2	2,1	2,48	1769
26	18,8	2,7	23,9	2,9	5,7	0,37	5,2	2,0	2,60	1776
moy.	18,20	3,97	18,15	3,55	8,71	0,54	6,39	4,12	1,57	

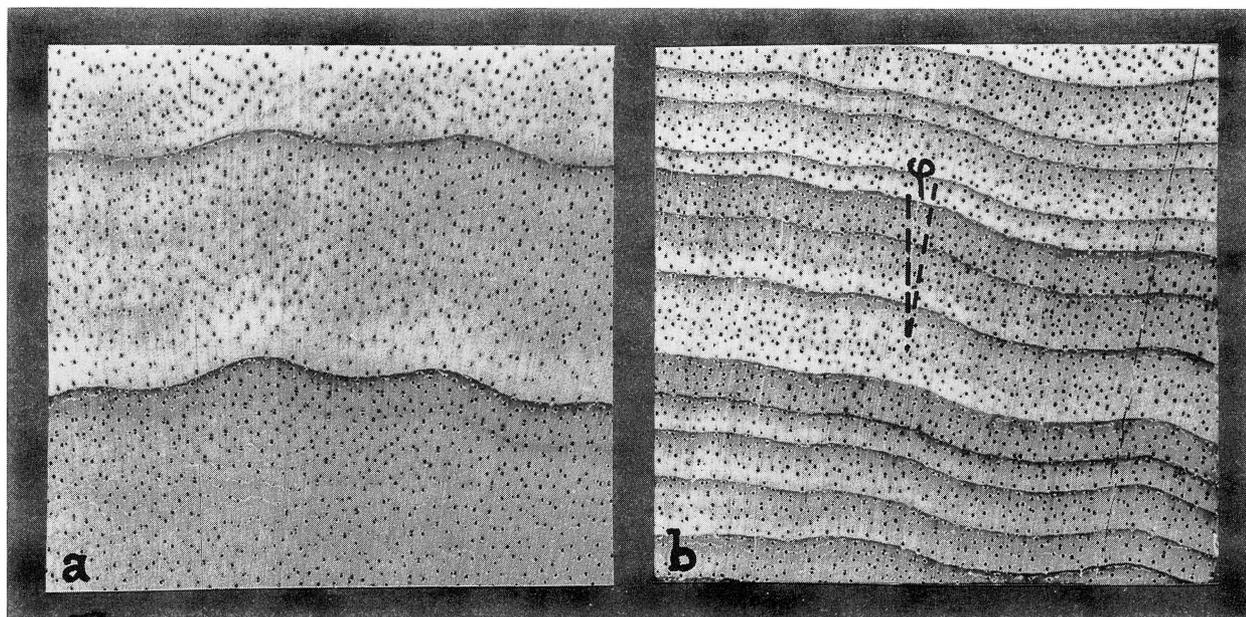
La traversée *tangentielle* détermine le diamètre *tangentiel* D_t et l'épaisseur des parois *radiales* P_r .



COMPARAISON DES FIBRES D'UNE MÊME ÉPROUVETTE

Avant de mettre en relation les valeurs moyennes

FIG. 6. — *Eprouvettes de Limba polies* ($\times 2$). a) à gauche, cernes très larges. b) à droite, cernes étroits et orientation imparfaite de l'éprouvette (voir remarque dans le texte).



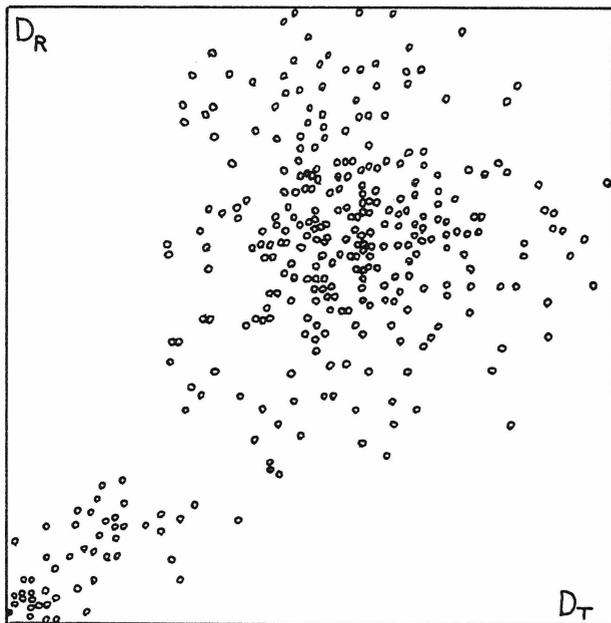


FIG. 7. — Relation diamètre tangentiel — diamètre radial pour 334 fibres d'une même éprouvette, Limba n° 17.

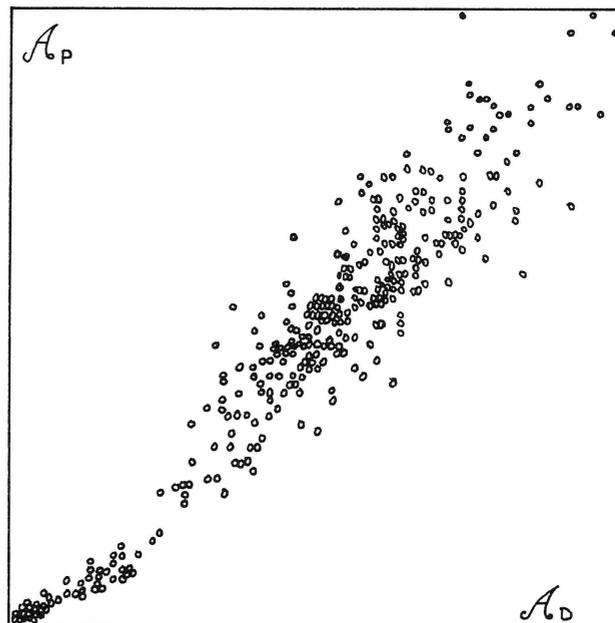


FIG. 8. — Relation aire des fibres — aire des parois dans une même éprouvette.

ainsi rassemblées, nous avons examiné si certaines lois de proportion semblaient exister entre les sections de fibres d'une même éprouvette. Nous avons construit de nombreux nuages de points reliant 2 à 2 les grandeurs mesurées sur 300 fibres. A ce niveau de l'individu éprouvette, peu de liens apparaissent nettement.

Quand un des diamètres est pris comme variable, on trouve un partage en 2 nuages dont l'explication tient au profil longitudinal des fibres assez brusquement rétréci près de chaque extrémité ; d'où un effet de petites fibres pour les mesures faites à ce niveau (fig. 7). Si on ne tient pas compte de ces petites fibres, le nuage principal montre peu de lien entre les deux diamètres,

ce qui indique une forme de section de fibre très variable. Il n'apparaît pas non plus de liaison entre les épaisseurs des parois tangentielles et radiales, contrairement à ce que nous trouverons entre moyennes d'arbres.

Enfin nous avons essayé de prendre une certaine idée simplifiée de l'aire des fibres et de leurs parois en les supposant rectangulaires. On trouve un nuage de points presque linéaire liant l'aire des fibres et l'aire des parois (fig. 8). La proportion de paroi serait donc assez régulière dans une même éprouvette. Ceci n'est évidemment pas généralisable mais montre bien l'homogénéité de texture du Limba dont les cernes ont un bois final réduit à quelques cellules.

ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

Entre les diverses grandeurs physiques (recueillies) et morphologiques (mesurées), on a établi la matrice des corrélations simples. Aux grandeurs directement mesurées on a ajouté quelques valeurs calculées intéressantes par leurs relations possibles avec T/R : le rapport des diamètres de fibres D_t/D_r , et celui des épaisseurs de parois P_r/P_t (on notera le sens de ce dernier rapport : traversée tangentielle/traversée radiale, comme pour les diamètres) ; la quantité cumulée de matière traversée dans chaque sens sur une distance égale : $Q_t = 100 P_r/D_t$ et $Q_r = 100 P_t/D_r$; enfin le rapport Q_t/Q_r .

Les coefficients de corrélation significatifs au seuil de 1% ont été portés en caractères gras dans le tableau et les plus élevés, au moins 0,85, ont été soulignés.

Un contrôle par les nuages de points a permis de vérifier qu'il n'y avait pas de points aberrants, ou 2 sous-nuages distincts comme précédemment, donnant à ρ une valeur anormalement élevée.

Quelques-uns de ces nuages sont présentés ici. Tracés au carré par ordinateur, ils donnent toujours la même dimension graphique à l'étendue des abscisses et à celle des ordonnées.

MATRICE DES CORRÉLATIONS SIMPLES

	D_t	P_r	D_r	P_t	D_t/D_r	P_r/P_t	% RAY	D_{12}	T	R	T/R
T/R	+ 0,23	- 0,64	+ 0,89	- 0,51	- 0,84	- 0,69	- 0,66	- 0,74	- 0,48	- 0,86	1
R	- 0,09	+ 0,81	- 0,75	+ 0,70	+ 0,75	+ 0,66	+ 0,60	+ 0,81	+ 0,82	1	
T	+ 0,20	+ 0,76	- 0,39	+ 0,72	+ 0,44	+ 0,48	+ 0,24	+ 0,64	1		
D_{12}	- 0,05	+ 0,85	- 0,75	+ 0,77	+ 0,77	+ 0,62	+ 0,65	1			
% RAY	- 0,60	+ 0,59	- 0,82	+ 0,53	+ 0,68	+ 0,43	1				
P_r/P_t	+ 0,11	+ 0,57	- 0,72	+ 0,30	- 0,83	1					
D_t/D_r	- 0,07	+ 0,75	- 0,93	- 0,57	1						
P_t	+ 0,08	+ 0,95	- 0,51	1							
D_r	+ 0,40	- 0,65	1								
P_r	+ 0,12	1									
D_t	1										
									T	R	T/R
								Q_T	+ 0,68	+ 0,84	- 0,72
								Q_R	+ 0,62	+ 0,81	- 0,74
								Q_T/Q_R	- 0,36	- 0,65	+ 0,74

RELATIONS ENTRE CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES

Les diamètres des fibres n'ont pas les mêmes liaisons : le diamètre tangentiel D_t n'est pas significativement lié aux autres caractères, même pas au diamètre radial (fig. 9). Il est négativement corrélé avec la proportion de rayons. Curieusement il y a une liaison négative entre diamètre radial des fibres et teneur en rayons encore plus forte.

S'il n'y a pas de lien fort entre les 2 diamètres, il y en a un très fort entre les 2 parois, qui sont donc en première approximation fines ensemble ou épaisses ensemble (fig. 10) contrairement à ce que nous venons de voir au sein d'une même éprouvette. Chacune des 2 parois

est liée un peu au diamètre radial, surtout la paroi radiale toujours négativement, et pas du tout au diamètre tangentiel.

En ce qui concerne les rapports de forme des fibres, la forme de la section D_t/D_r dépend uniquement du diamètre radial (fig. 11) ; le rapport des épaisseurs de paroi est aussi très lié au diamètre radial — et au rapport des diamètres (fig. 12), ce qui est cohérent.

DISCUSSION

Le tableau de la p. 40 montre en dernière ligne les valeurs moyennes pour l'ensemble des 26 individus : 18,2 en diamètre tangentiel, 18,15 en diamètre radial. En moyenne la section des fibres est isodiamétrale.

FIG. 9. — Relation diamètre tangentiel (moyen) — diamètre radial (moyen) pour les 26 éprouvettes.

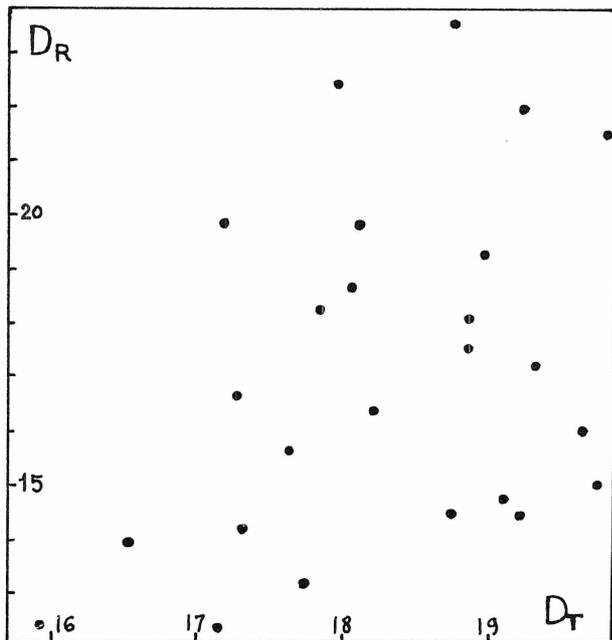
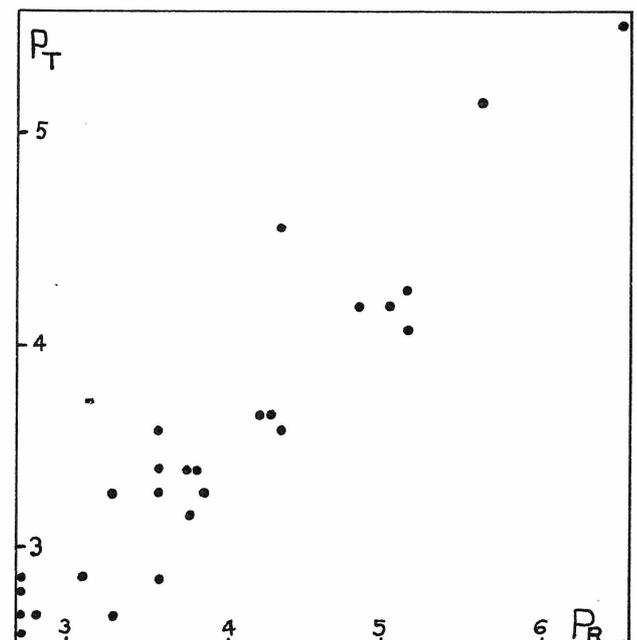


FIG. 10. — Relation épaisseur de parois radiales — épaisseur de parois tangentielles.



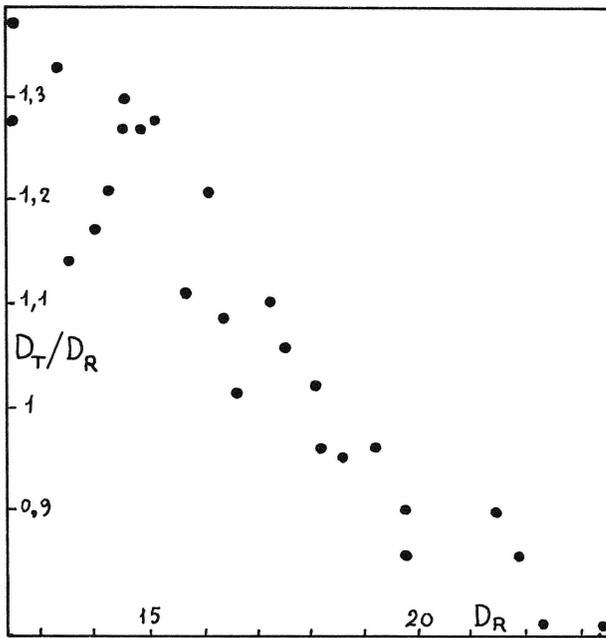


FIG. 11. — Relation diamètre radial — rapport de forme (D_T/D_R).

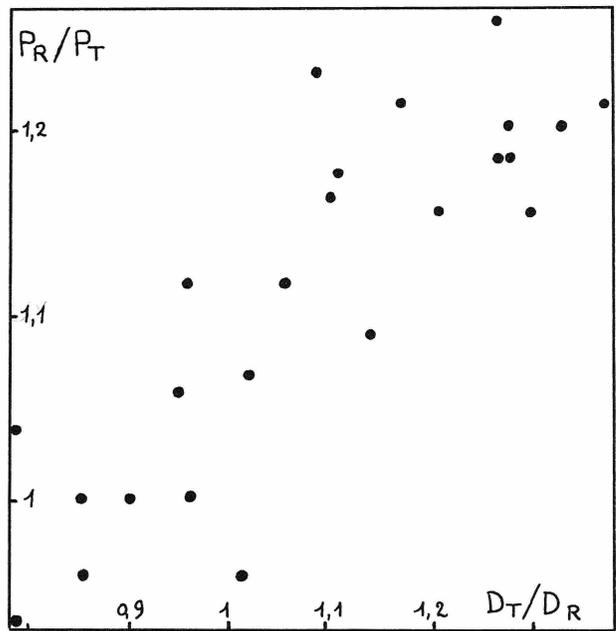


FIG. 12. — Relation rapport de forme — rapport d'épaisseurs des parois.

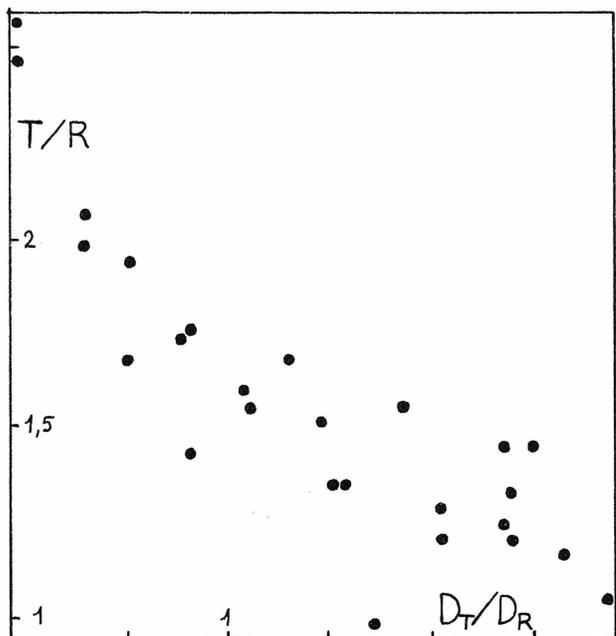
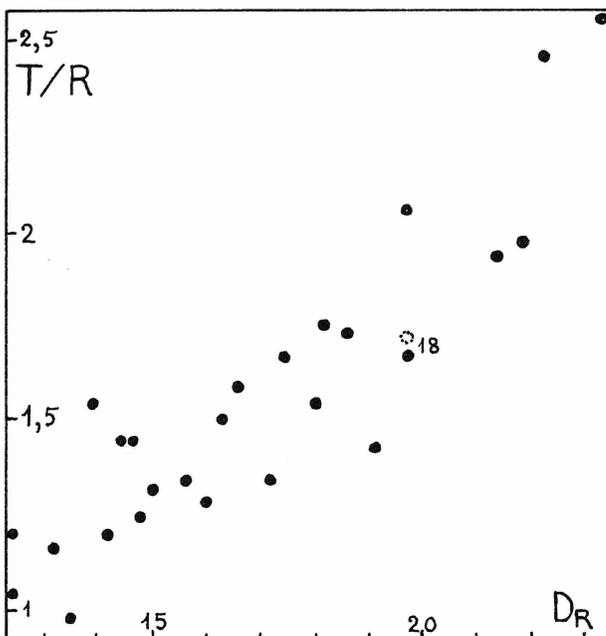
D_t est assez constant avec une étendue de valeurs de 23 % autour de sa moyenne générale, tandis que D_r montre une amplitude de 67 % de sorte que les fibres de l'individu « maximum » sont presque du double de celles de l'individu « minimum ». On peut dire que D_t est une meilleure constante de l'espèce (*Terminalia superba*), le D_r variant probablement avec la vitesse de

croissance diamétrale de l'arbre. C'est pourquoi la forme des fibres dépend si fortement du diamètre radial.

On trouve aussi des liens logiques entre les 2 épaisseurs de parois et la densité D_{12} du bois, qui dépend aussi du diamètre radial : parois moins nombreuses et plus fines donnent moins de masse ligneuse. Cependant

FIG. 13. — Relation diamètre radial — anisotropie de retrait.

FIG. 14. — Relation rapport de forme — anisotropie de retrait.



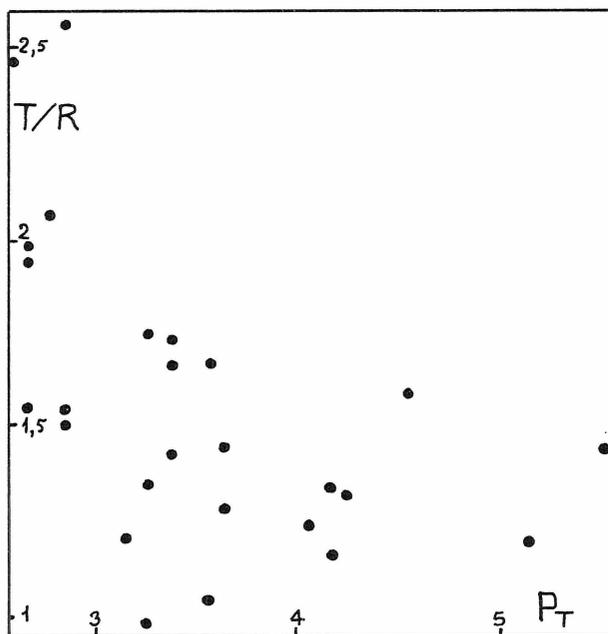


FIG. 15. — Relation épaisseur des parois tangentielles — anisotropie de retrait.

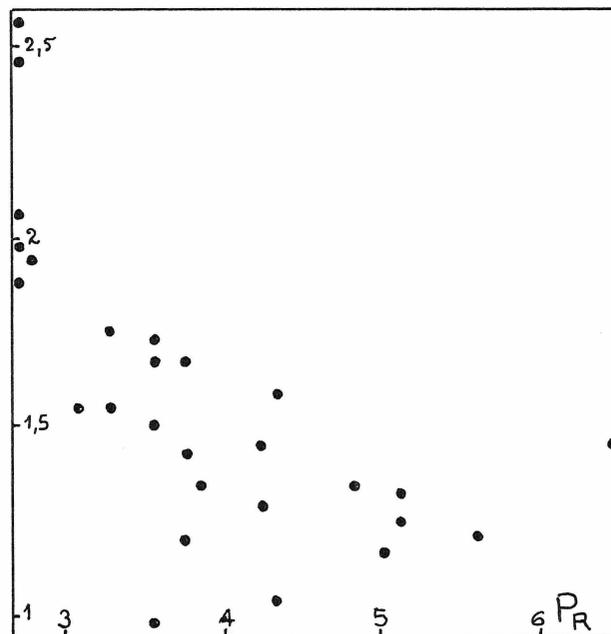


FIG. 16. — Relation épaisseur des parois radiales — anisotropie de retrait.

si P_r et P_t varient ensemble, P_r s'amincit plus que P_t quand D_r est plus grand et la liaison est très forte entre D_t/D_r et P_r/P_t : $\rho = + 0,83$.

Quant aux rayons, on comprend que plus ils prennent de place moins ils en laissent aux fibres. Mais plus précisément leur liaison négative avec D_t exprime que la proportion de fibres — complémentaire de celle des rayons — varierait plutôt par la largeur D_t de ces fibres, que par le nombre moyen de séries de fibres entre 2 rayons. Par contre nous ne voyons pas d'explication simple de la liaison négative très forte entre Ray % et D_r .

LES RETRAITS ET LEUR ANISOTROPIE

En reprenant les 4 premières lignes de la matrice des corrélations, on peut d'abord retrouver des lois bien connues : les 2 retraits T et R sont corrélés fortement et positivement entre eux et avec la densité du bois. L'anisotropie T/R est corrélée négativement avec les grandeurs précédentes, et le plus fortement avec le retrait radial R : plus les retraits sont forts moins il y a de différence entre eux, R augmentant plus vite que T . Ceci est en accord avec les acquis antérieurs pour les bois de la zone tempérée.

RELATIONS MORPHOLOGIE ET RETRAIT

Les fibres : Si nous regardons maintenant quelles sont les plus fortes liaisons de T/R avec des grandeurs anatomi-

ques, nous trouvons par ordre décroissant le diamètre radial D_r ($\rho = + 0,89$) et le rapport des diamètres D_t/D_r ($\rho = - 0,84$), négatif puisque nous avons mis D_r en dénominateur ; puis P_r/P_t ($\rho = - 0,69$), l'épaisseur de paroi radiale P_r (0,64) et la proportion de rayons Ray % ($- 0,66$) ; le rôle de l'épaisseur de paroi tangentielle est moins net ($- 0,51$) et celui du diamètre tangentiel D_t encore moins (fig. 13 à 18).

Il apparaît donc que le facteur dominant de l'anisotropie de retrait du Limba — parmi les données étudiées ici — est très clairement le diamètre radial des fibres (fig. 13). La liaison avec le rapport des épaisseurs de parois n'est pas négligeable et c'est surtout la variation de la paroi radiale P_r qui est concernée en même temps que la densité (fig. 19).

Regardant les caractères combinés sous le nom de quantité de matière Q , nous constatons aussi de très bonnes liaisons de Q_t et de Q_r avec le retrait radial plus qu'avec le retrait tangentiel, mais la corrélation de T/R avec Q_t/Q_r (fig. 20) est moins forte qu'avec D_t/D_r : $\rho = - 0,74$ au lieu de $- 0,84$. Or

$$Q_t/Q_r = \frac{P_r}{P_t} \times \frac{1}{\frac{D_t}{D_r}}$$

C'est-à-dire que le rapport des diamètres, ou le rapport inverse des nombres de parois traversées, rend mieux compte de T/R que l'enrichissement de ce rapport par celui des épaisseurs de parois.

Les rayons : Leur action paraît aussi très discutable. Quand certains auteurs leur ont trouvé un effet significatif, cet effet était toujours de diminuer R . Or ici nous obtenons un lien positif ($+ 0,60$) entre Ray % et R .

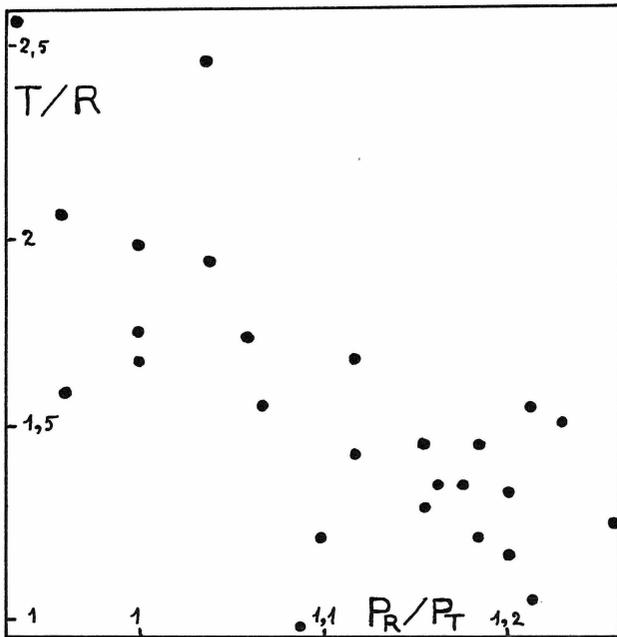


FIG. 17. — Relation rapport des épaisseurs de parois — anisotropie de retrait.

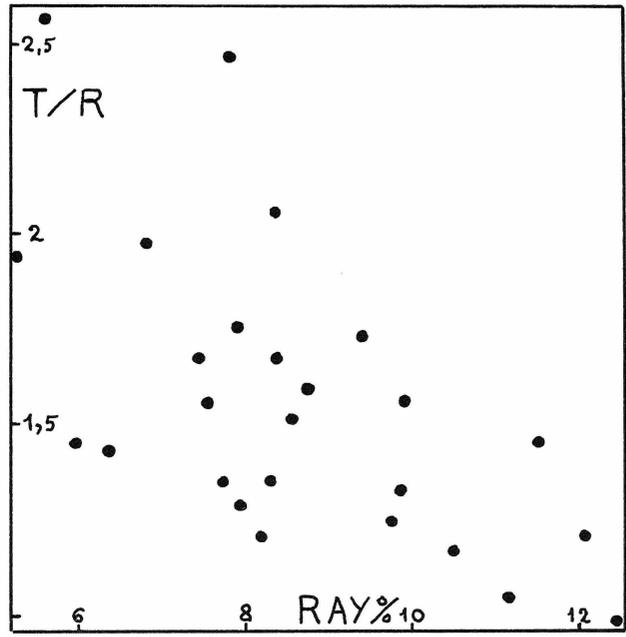


FIG. 18. — Relation proportion de rayons — anisotropie de retrait.

Faute d'explication vraisemblable, nous admettons qu'il ne s'agit pas d'un facteur indépendant et que la liaison entre Ray % et le diamètre D_r ($-0,82$) étonnante sur le plan anatomique mais très forte, explique indirectement ce résultat.

AUTRES CAS OBSERVÉS

Ces résultats sont à rapprocher d'un travail similaire quoique plus modeste réalisé dans les années 1960 sur des coupes de bois, toujours en liaison avec les mesures

FIG. 19. — Relation masse volumique D_{12} — anisotropie de retrait.

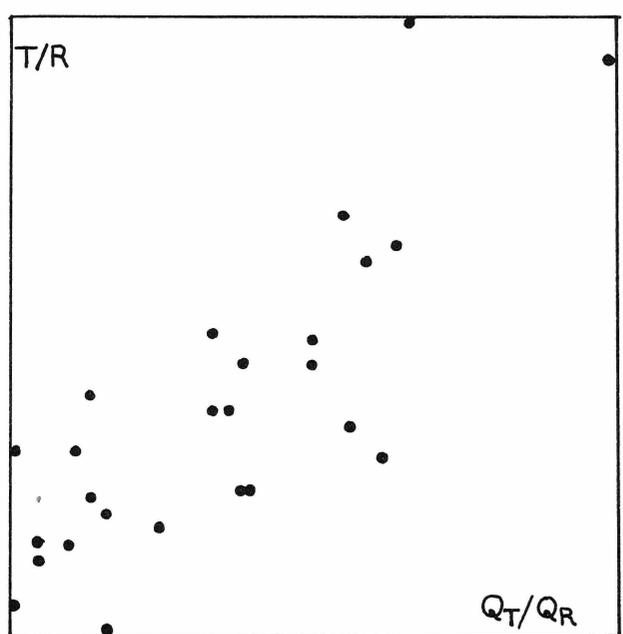
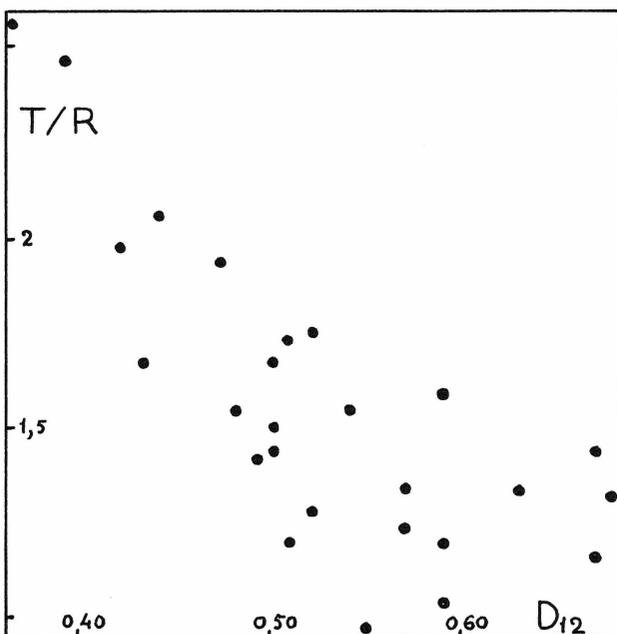


FIG. 20. — Relation entre le rapport des quantités de parois rencontrées en traversées tangentielle et radiales, et l'anisotropie de retrait.

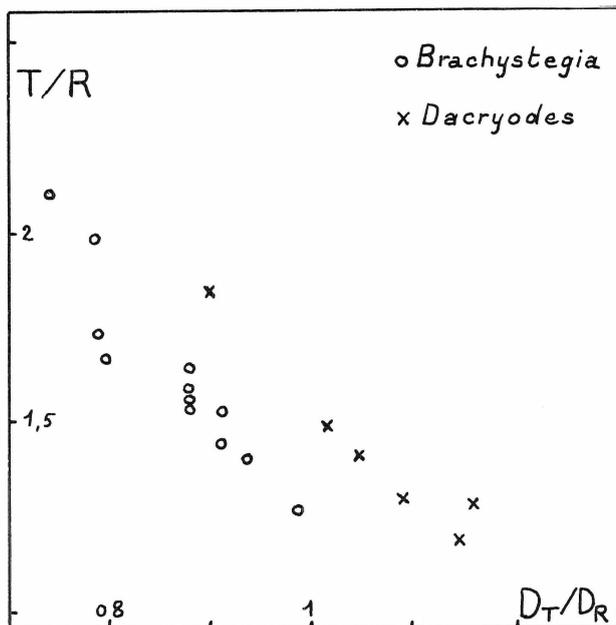


FIG. 21. — Relation forme des fibres — anisotropie de retrait, pour 12 *Brachystegia* spp. et 6 *Dacryodes* spp.

de retrait linéaire. Pour 6 échantillons du genre *Dacryodes* (Burséracées) puis 12 échantillons du genre *Brachystegia* (Césalpiniacées), nous avons compté les fibres sur des traversées cumulées de 5 mm de tissu fibreux dans chaque sens, tangentiel et radial, et fait le rapport des nombres trouvés, soit N_t/N_r . Ce rapport est une estimation globale de l'inverse du rapport D_t/D_r , sans mesure individuelle des diamètres. La figure 21 montre une liaison remarquable entre la forme des cellules et T/R , comme celle (fig. 14) que nous obtenons sur les Limba. Elles ne sont pas superposables mais forment des nuages de points parallèles.

DISCUSSION

Nous croyons qu'il n'est apparu qu'un seul facteur de variation de l'anisotropie : le diamètre radial. Mais il varie (en fonction de la vitesse de croissance ou simplement des périodes de végétation) en même temps que la densité du bois, c'est-à-dire en même temps que l'épaisseur des parois ; il se trouve que les parois radiales épaisissent plus que les tangentielles quand D_r diminue.

Un grand nombre de calculs de corrélations multiples entre T/R et plusieurs des facteurs ont montré l'effacement du rôle individuel des parois en l'absence de variation du diamètre D_r .

Si nous retenons des résultats précédents que l'anisotropie résulte surtout de l'extension radiale de la section de fibre, nous pourrions vite conclure qu'un bois iso-

trope en retrait devrait avoir des cellules isodiamétriques ($D_t = D_r$).

Il n'en est rien. Par les moyennes du tableau des données comme par les graphiques, nous pouvons constater que des fibres isodiamétriques correspondent à un T/R de 1,6 pour le Limba,

1,5 pour les *Dacryodes*,

1,2 pour les *Brachystegia*.

Pour en rester au Limba, on ne s'approche de l'égalité des retraits que dans le cas de fibres aplaties radialement : pour les premières éprouvettes du tableau, D_t est fortement supérieur à D_r .

On est ainsi conduit, par élimination d'autres hypothèses, à constater l'anisotropie intrinsèque d'un tissu fibreux homogène formé de fibres à section isodiamétrique. Quelle est donc la cause de cette anisotropie de base ?

Essai d'interprétation

Posons le modèle suivant : la paroi radiale, fortement incrustée de lignine, a une structure fermée qui la rend inerte vis-à-vis de l'humidité (Kato et Nakato).

La paroi tangentielle est plus hygroscopique. Elle est en outre isotrope dans sa masse, dans le plan transversal.

Alors le retrait de l'éprouvette est principalement dû aux parois tangentielles : le retrait tangentiel est dû au retrait des parois tangentielles dans leur largeur (environ D_t) et le retrait radial au retrait des parois tangentielles dans leur épaisseur. Chaque fois qu'il y a une cavité, c'est un manque de matière qui concerne le retrait radial ; tangentiellement la continuité de la matière rétractible est assurée, de sorte que le diamètre tangentiel n'intervient pas. L'anisotropie dépend ainsi directement du diamètre radial.

Bien sûr ce modèle est trop schématisé, la paroi radiale a un certain retrait en épaisseur puisque cette épaisseur P_r est bien corrélée avec le retrait tangentiel. Néanmoins il correspond mieux à nos observations que l'hypothèse attribuant l'anisotropie aux épaisseurs cumulées des lamelles moyennes dans les deux directions (Frey-Wissling) ; ou l'hypothèse qui fait intervenir la somme des épaisseurs de parois dans chaque direction (Nakato).

Mais rien ne nous permet d'affirmer que la paroi radiale est beaucoup plus inerte que la paroi tangentielle. Nous ne pouvons pas plus dire que les parois sont isotropes dans leur masse.

Perspectives

Il semble que nous sortions des capacités explicatives de la morphologie cellulaire. Néanmoins les mesures de dimensions, à l'échelle des cellules et des épaisseurs de parois, auraient encore un rôle à jouer dans ces recherches si elles pouvaient être menées avec précision, sur éprouvettes épaisses, successivement à l'état humide puis à l'état sec. En effet, nous avons comparé des bois à T/R variés, mais toujours dans le même état sec, sans

« voir ce qui bouge » au séchage. Quelques auteurs s'y sont essayé et rapportent tantôt un rétrécissement tantôt un élargissement des cavités des fibres. La difficulté réside dans les faibles différences à observer, qui néces-

sitent de très forts grossissements : 8 % de retrait tangentiel pour une fibre moyenne de Limba représentent moins de 2 microns de changement de diamètre. Que dire du changement d'épaisseur d'une paroi !

CONCLUSION

Tenant compte des observations antérieures de divers auteurs, la présente étude conduit à considérer la dimension radiale des fibres comme un facteur dominant des variations de l'anisotropie de retrait. Ceci ne peut s'expliquer qu'en confirmant l'hypothèse d'une différence chimique entre les parois tangentielles et radiales. Cette différence expliquerait aussi le fait que des fibres isodiamétriques ne constituent pas un tissu isotrope dans le plan transversal.

Des conclusions précédentes, nous ne voudrions pas tirer une loi empirique sans l'avoir vérifiée sur un plus vaste éventail d'essences.

Enfin, sur le plan des méthodes, on a montré la possibilité de réaliser une étude microscopique vraiment quantitative par une préparation relativement simple des bois et l'emploi d'un analyseur semi-automatique d'images bien adapté à ces préparations.

RÉFÉRENCES

- KEYLWERTH, 1948, cité dans KOLLMANN et COTE, 1968. — Principles of Wood Science and Technology, I. Solid Wood. Springer Verlag.
- MARIAUX (A.), NORMAND (D.), 1954. — Anisotropie de retrait transversal du bois, aperçu des explications proposées. Comptes rendus du 8^e Congrès International de Botanique, Paris.
- SALLENAVE (P.), 1955, 1964, 1971. — Propriétés physiques et mécaniques des bois tropicaux, tomes 1, 2 et 3. Edition C.T.F.T.
- KELSEY (K. E.), 1963. — A critical review of the relationship between the shrinkage and structure of wood. C.S.I.R.O., D.F.P. Techn. Paper n° 28.
- BOYD (J. D.), 1974. — Anisotropic shrinkage of wood : Identification of the dominant determinants. Mokuzai Gakkaishi vol. 20, n° 10.
- KELLER (R.), THIERCELIN (F.), 1975. — Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de hêtre. Annales des Sciences Forestières, 32 (2).
- TRENARD (Y.), GUÉNEAU (P.), 1977. — Relation entre la structure anatomique et l'amplitude du retrait du bois. *Holzforschung* vol. 31, n° 6.
- MARIAUX (A.), GUÉNEAU (P.), SERRA (J.), 1977. — Essai d'anatomie quantitative de quelques bois à l'analyseur de texture. *Bois et Forêts des Tropiques* n° 171.
- MARIAUX (A.), NARBONI (Ph.), 1978. — Anisotropie de retrait et structure du bois, essai d'approche statistique. *Bois et Forêts des Tropiques* n° 178.
- KAWAMURA (Y.), 1979. — Influence of rays on anisotropic shrinkage of wood. *Mokuzai Gakkaishi* vol. 25 n° 7.
- MASSERANN (Ch.), 1983. — Recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres sur l'anisotropie transverse de retrait. Mémoire pour le Diplôme d'Etudes Approfondies en sciences du bois, Institut Polytechnique de Lorraine.