

Photo Bollier.

Au C. T. F. T., mesure de la rétractibilité du bois.

ANISOTROPIE DE RETRAIT ET STRUCTURE DU BOIS ESSAI D'APPROCHE STATISTIQUE

par A. MARIAUX (1), Ph. NARBONI (2)

(1) *Division d'Anatomie*, (2) *Division de Biométrie*
du Centre Technique Forestier Tropical

SUMMARY

SHRINKAGE ANISOTROPY AND STRUCTURE : AN ATTEMPT AT A STATISTICAL APPROACH

A statistical analysis is made of the C. T. F. T.'s stock of anatomical and technological data to seek, by the method of segmentation, the anatomical characteristics which best explain shrinkage anisotropy. The factors which successively emerge are the width of fibres, the size of the rays, and other significant factors. These results are critically examined.

**ANISOTROPIA DE RETRACCION Y ESTRUCTURA DE MADERAS.
ENSAYO DE PLANTEAMIENTO ESTADISTICO**

Se procede estadísticamente al análisis del stock de datos anatómicos y tecnológicos en posesión del C. T. F. T. para investigar, por el método de segmentación, las características anatómicas que permiten « explicar » del mejor modo posible la anisotropía de la retracción. Aparecen sucesivamente la anchura de las fibras, la dimensión de los radios y, asimismo, otros factores poco significativos. Se procede, finalmente, a una crítica de los resultados.

INTRODUCTION

Outre les nombreux articles publiés sur les causes de l'anisotropie du retrait transversal des bois, quelques essais de synthèse ont été tentés au cours des 25 dernières années. Citons entre autres, MARIAX et NORMAND 1954 (4), KELSEY 1963 (2) et BOYD 1974 (1). On trouvera, en particulier dans ce dernier, une bibliographie très complète à laquelle nous renvoyons le lecteur.

L'étude de J. D. BOYD, appuyée sur ses propres travaux comme sur ceux de tous les auteurs qu'il cite, et notamment les plus récents, le conduit aux conclusions suivantes :

Pour les conifères étudiés, la lignification différente des parois radiales et tangentielles paraît être le facteur dominant de l'anisotropie. Un autre facteur déterminant est la forme des cellules, parois et cavités, qui apparaît surtout dans les différences entre bois initial et bois final.

Par contre, les autres facteurs souvent avancés n'ont paru que très faibles ou nullement en cause :

angle fibrillaire dans les parois, proportion de rayons, lamelles moyennes.

D'autres auteurs ayant travaillé sur des feuillus, comme MC INTOSH 1955 (3), SCHNIEWIND 1959 (8), démontrent clairement dans certains bois le rôle des rayons restreignant le retrait radical. SCHNIEWIND conclut même (pour *Quercus kelloggii* Newb.) à l'isotropie du bois débarrassé de rayon, mais avec un retrait différent pour le bois initial et pour le bois final.

Ces recherches très approfondies, appuyées sur des calculs d'élasticité du bois, ne peuvent cependant être extrapolées qu'avec prudence aux bois d'autres espèces, et notamment de feuillus tropicaux à plan ligneux beaucoup plus homogène. Eux aussi pourtant, possèdent souvent une forte anisotropie de retrait.

Avant d'envisager de participer à ces recherches par des expérimentations directes, nous abordons ici le problème à partir de données déjà existantes, recueillies et stockées pour d'autres buts.

OBJECTIF

Les laboratoires du C. T. F. T. ont eu longtemps pour principal programme de tester les bois tropicaux pour rechercher les qualités commercialisables. Ils ont ainsi été conduits à accumuler, sur le même arbre-échantillon, un grand nombre de mesures : caractéristiques anatomiques, propriétés physiques et mécaniques, parfois analyse chimique, durabilité, etc...

Notre objectif présent est d'essayer d'exploiter ce stock de données pour rechercher statistiquement, toutes espèces mélangées, des tendances significatives dans les relations entre les caractéristiques anatomiques et l'anisotropie de retrait exprimée par le rapport des valeurs de retrait linéaire tangentiel et radial (de l'état vert à l'état anhydre).

DONNÉES DISPONIBLES AU C. T. F. T.

MATÉRIEL

L'échantillon retenu après éliminations diverses (données manquantes, défauts dans les éprouvettes, etc...) contient 1 365 individus.

Chaque « individu » est un arbre dont une pièce de bois est venue au C. T. F. T. pour essais en laboratoire. Généralement, cette pièce était une grume, parfois une simple pièce débitée semblable à une traverse de chemin de fer. Dans cette pièce, les éprouvettes de rétractibilité linéaire et le bloc pour analyse anatomique n'ont pas été pris exactement au même point. Il y a donc une possibilité de légères différences de structure (variations dans un même arbre) entre les deux prélèvements. D'où l'intérêt d'avoir une population nombreuse et très variée pour neutraliser l'influence de ce léger facteur de dispersion des résultats.

Cette population représente un très large éventail de structures puisqu'elle contient 70 familles et 347 genres environ.

La proportion de certaines familles qui contiennent beaucoup de bois commerciaux abondamment testés, est dominante sur celle de nombreuses petites familles. Cette proportion est tout à fait artificielle, sans rapport avec la composition des

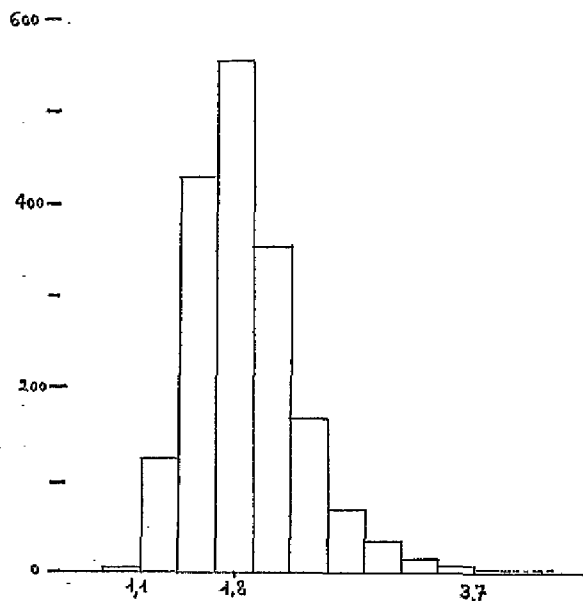
forêts tropicales ; mais ce n'est pas notre propos, car nous cherchons seulement à utiliser les analyses faites sur une vaste gamme de structures.

Les Légumineuses, à elles seules, forment 24,8 % du total des individus. Les autres familles les plus représentées le sont chacune beaucoup moins : Burséracées 5,9 % ; Sapotacées 5,3 % ; Méliacées 4,4 % ; Sterculiacées 4,4 % ; Combrétacées 4,2 % ; Guttifères 4,1 % ; Myrtacées 3,7 % ; Euphorbiacées 3,2 % ; etc...

Dans certaines familles, la structure est toujours semblable, ainsi pour les Burséracées, les Sapotacées ; dans d'autres, on trouve des plans ligneux extrêmement variés, ainsi pour les Légumineuses, les Euphorbiacées. Précisons encore qu'il s'agit principalement de bois de feuillus et non de conifères qui ne comptent que 44 individus, soit 2,5 % du total.

La figure 1 est un histogramme des valeurs du rapport T/R des rétractibilités tangentielle et radiale. Elle montre quelles sont les valeurs les plus fréquentes de ce rapport d'anisotropie, et aussi les extrêmes qui peuvent nous apporter la meilleure contribution à l'explication du phénomène.

CHOIX DES DONNÉES



Toutes les données utilisées ici existaient déjà, nous l'avons dit, et elles étaient déjà stockées sous forme de cartes perforées pour ordinateur. Il ne pouvait être question de recommencer des mesures en si grand nombre, mais seulement de choisir celles qui présentaient un intérêt.

Du point de vue retrait, leur appropriation au but recherché est peu satisfaisante. Une partie des facteurs mis souvent en cause ne figure pas dans nos données : d'abord ceux qui ne concernent pas l'anatomie du bois, comme le taux de lignification des parois tangentielles et radiales. Nous avons d'ailleurs publié autrefois une étude statistique comme celle-ci, sur le rôle des constituants chimiques dans le retrait des bois, mais globalement, sans considérer l'anisotropie (5). Les inégalités d'épaisseur des parois ne sont pas non plus dans nos données, car les mesures habituelles sont faites sur les fibres dissociées, donc sans orientation connue. Nous disposons

FIG. 1. — Histogramme des valeurs. T/R .

FIG. 2. — Exemple de fiche descriptive de bois

| | | |
|--------------------------------|---|---|
| Bois n° 20692 Essai n° 2216 | Nom : <i>Drypetes variabilis</i> Vitt (<i>Euphorbiaceae</i>) | Provenance : Guyane |
| GERNES | : Présence de zones sans parenchyme | |
| VAISSEAUX | : Nombre/mm ² : 13 Disposition : Disséminés Groupement : Isolés ou accolés par 2-3 radialement Longueur des éléments (après dissociation) (μ) : Ponctuations intervasculaires : Diamètre (μ) : 3-4 Disposition et nature : Aréolées Nature des perforations : Uniques | Diamètre (μ) : 135 (115-165) |
| RAYONS | : Disposition : Non étagée Hauteur (μ) : 1.170 (620 à 2.400) Sériation : min. : 1 moy. : 2 max. : 2-3 Constitution cellulaire : Homogène : cellules couchées et une rangée terminale de cellules carrées Nature des ponctuations V/R : De même taille que les ponctuations intervasculaires Éléments sécréteurs : Non Contenus : Cristaux | Thylles : Absents Nombre/mm : 12 Largeur (μ) : 33 |
| PARENCHYME | : Disposition : Dispersé, en chaînettes 1-sériées, sinueuses, parfois continues, parfois interrompues, irrégulières Nombre et allongement des cellules dans une file : Nombreux éléments courts Contenus : Non Éléments sécréteurs : Non | |
| FIBRES | : Longueur (μ) : 2.900 Épaisseur des parois (μ) : 30 Nature : Ligneuses | Largeur (μ) : 33 |
| OBSERVATIONS : | Date et Auteur | |

seulement de toutes les mesures faites classiquement pour décrire la structure d'un bois, rassemblées sur des fiches descriptives représentées en figure 2.

Bien que nous ayons en vue une recherche méthodique avec un minimum d'idées préconçues, nous avons été conduits, par la nécessité d'alléger un peu le programme, à éliminer certains caractères paraissant totalement étrangers à l'anisotropie de retrait. C'est ainsi que nous avons éliminé les contenus cellulaires (cristaux, silice, etc...), la présence de canaux sécréteurs, de cellules à huile, de fibres cloisonnées, la longueur des éléments de vaisseaux, etc...

Afin de réduire encore le nombre de caractères, et

surtout pour exprimer des facteurs plus logiques, le programme ne prévoyant pas la recherche de combinaisons de caractères, nous avons fait faire au préalable certaines combinaisons : ainsi le produit hauteur × largeur des rayons représente la dimension globale moyenne du rayon à un coefficient de forme près ; de même le produit nombre × largeur des rayons représente approximativement la proportion de tissu de rayon, et le produit nombre × (diamètre)² des vaisseaux une valeur proportionnelle à la surface relative des vaisseaux.

Au total, nous avons rassemblé les 14 caractères décrits dans le tableau 1.

MÉTHODE CHOISIE : PROGRAMME DE SEGMENTATION

APERÇU TRÈS SUCCINCT DE LA MÉTHODE

Le programme de segmentation utilisé (6) sert à expliquer un caractère quantitatif (ici le rapport T/R) par un ensemble de caractères (ici 14 caractères explicatifs) qui sont tous des caractères qualitatifs à modalités ordonnées.

L'analyse procède par étapes. Illustrons-la dans le cas où les caractères explicatifs n'ont que deux modalités ; chacun de ces caractères induit une

dichotomie de l'ensemble des individus : un groupe contient les individus qui ont la 1^{re} modalité du caractère, l'autre groupe contient ceux qui ont la seconde.

À l'étape 1, on retient la dichotomie telle que les moyennes dans les 2 groupes du caractère à expliquer soient les plus différentes possible, et que chaque groupe soit le plus concentré possible autour

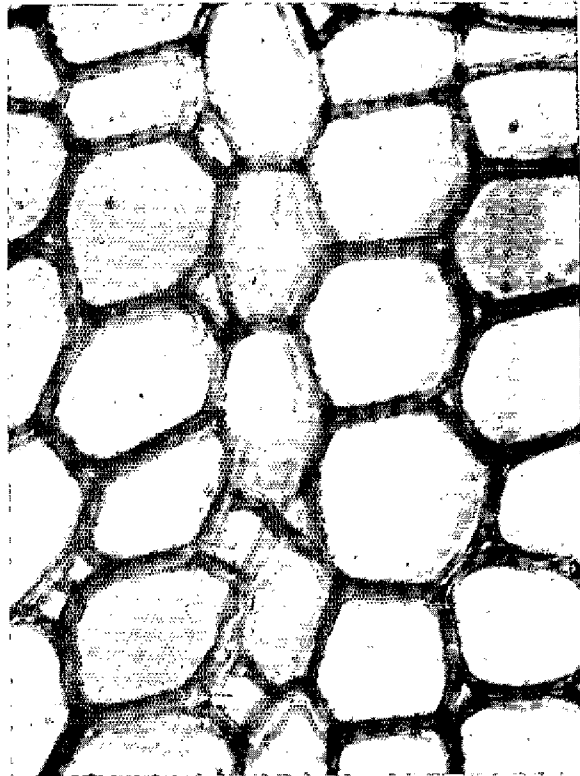
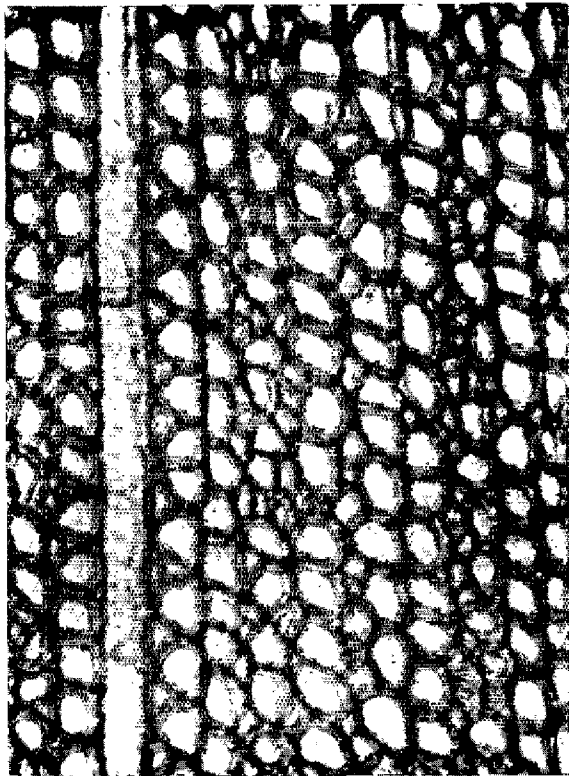
TABLEAU 1
 CARACTÈRES RETENUS COMME PARAMÈTRES
 (Variables explicatives)

| N° | Caractère | Classe | Valeur ou signification |
|----|--|--------|---------------------------------|
| 1 | Nombre vaisseaux par mm ² (Q) | 0 | 0 (conifères) à 2 |
| | | 1 | 3-4 |
| | | 2 | 5-7 |
| | | 3 | 8-10 |
| | | 4 | 11-59 |
| 2 | Diamètre moyen des vaisseaux (tang.) (Q) | 5 | > 60 |
| | | 0 | 0 (conifères) |
| | | 1 | < 142 microns |
| | | 2 | 143-182 |
| | | 3 | 183-220 |
| 3 | Proportion vaisseaux (ND ² %) (Q) | 4 | > 220 |
| | | 0 | < 8 |
| | | 1 | 8-11 |
| | | 2 | 12-14 |
| | | 3 | 15-21 |
| 4 | Étagement rayons (ql) | 4 | 22-46 |
| | | 5 | > 46 |
| | | 0 | non-étagés |
| | | 1 | échelonnés |
| | | 2 | étagés |
| 5 | Nombre de rayons par mm (Q) | 0 | < 6 |
| | | 1 | 6-7 |
| | | 2 | 8-10 |
| | | 3 | 11-16 |
| | | 4 | > 16 |
| 6 | Taille des rayons (HL) (Q) | 0 | < 2 (classes du produit) |
| | | 1 | 2-3 |
| | | 2 | 4-5 |
| | | 3 | > 5 |
| | | 4 | < 19 |
| 7 | Proportion rayons (NL %) (Q) | 1 | 19-28 |
| | | 2 | 29-75 |
| | | 3 | > 75 |
| | | 0 | homogènes (cellules couchées) |
| | | 1 | subhomogènes (kribs 3) |
| 8 | Structure rayons (ql) | 2 | modér. hétérogènes (kribs 2) |
| | | 3 | très hétérogènes (kribs 1) |
| | | 4 | pas de cellules couchées |
| | | 0 | absent |
| | | 1 | rare |
| 9 | Parenchyme dispersé (ql) | 2 | abondant |
| | | 0 | absent |
| | | 1 | juxtavasculaire |
| | | 2 | en manchon |
| | | 3 | en losange |
| 10 | Parenchyme circumvasculaire (ql) | 4 | aliforme à anastomosé |
| | | 0 | absent |
| | | 1 | lignes interrompues ou ondulées |
| | | 2 | lignes continues fines |
| | | 3 | bandes épaisses |
| 11 | Parenchyme tangentiel (ql) | 0 | < 1.211 microns |
| | | 1 | 1.211-1.390 |
| | | 2 | 1.391-1.939 |
| | | 3 | 1.940-4.000 |
| | | 4 | > 4.000 |
| 12 | Longueur moyenné des fibres (Q) | 0 | < 14 microns |
| | | 1 | 14-21 |
| | | 2 | 22-31 |
| | | 3 | 32-56 |
| | | 4 | > 56 |
| 13 | Largeur des fibres (Q) | 0 | < 37 |
| | | 1 | 37-53 |
| | | 2 | 54-64 |
| | | 3 | 65-72 |
| | | 4 | > 73 |
| 14 | Rapport cavité sur largeur des fibres (Q) $\left(\frac{100 C}{L}\right)$ | 0 | < 37 |
| | | 1 | 37-53 |
| | | 2 | 54-64 |
| | | 3 | 65-72 |
| | | 4 | > 73 |

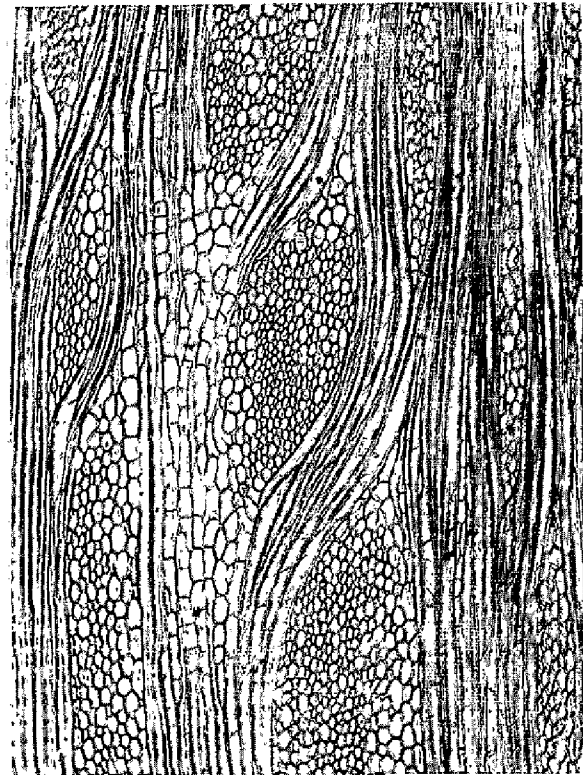
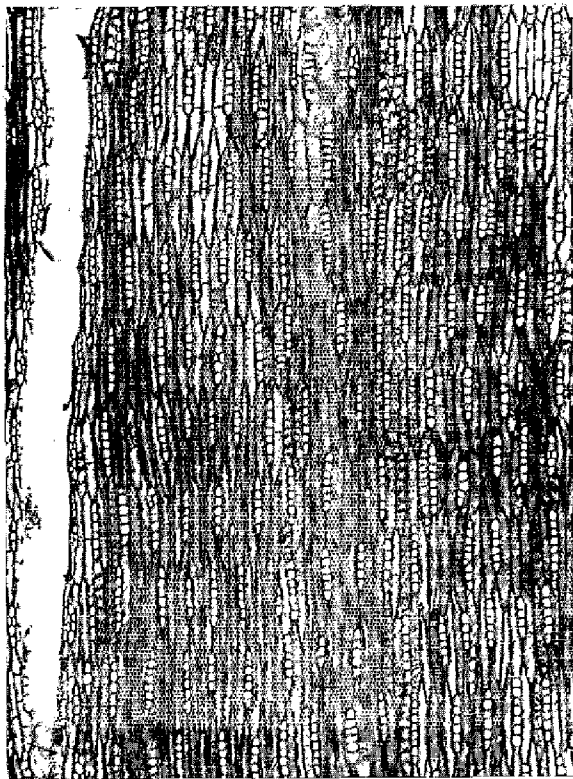
(Q) signifie que les mesures ont été transcrites quantitativement sur les cartes perforées. Ainsi pour le diamètre des vaisseaux, 3 colonnes réservées à cette valeur permettaient la transcription directe de la valeur moyenne en microns (de 0 à 999, par exemple 165).

(ql) signifie que les observations anatomiques ont été exprimées qualitativement ; il s'agit toujours de qualitatif ordonné, c'est-à-dire qu'on a fait des classes d'intensité du caractère. Ainsi pour l'étagement des rayons, 0 exprime l'absence d'étagement, 1 l'échelonnement et 2 le véritable étagement des rayons.

Finalement, tous les facteurs quantitatifs ou qualitatifs ont été découpés en un petit nombre de classes — 6 au maximum — afin de les rendre homogènes dans la suite du programme.



Premier caractère sélectionné : largeur des fibres. Au même grossissement $\times 500$, sections transversales : à gauche, *Monopetalanthus durandii* H. et N. ; à droite, *Cleistopholis glauca* Pierre.



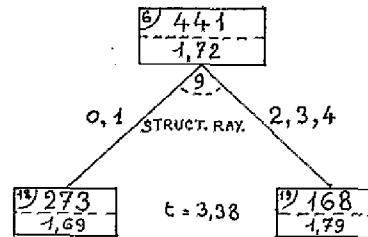
Deuxième caractère sélectionné : dimension des rayons. Au même grossissement $\times 55$, sections tangentielle : à gauche, *Pterocarpus erinaceus* Poir. ; à droite, *Poga oleosa* Pierre.

de sa moyenne. La qualité de la dichotomie est mesurée par le t de Student (différence des moyennes divisée par son écart-type).

A l'étape 2, on dichotomise selon les mêmes principes chacun des groupes produits à l'étape 1, et ainsi de suite pour les étapes suivantes.

Lorsque les caractères explicatifs ont plus de deux modalités, on commence par les rendre dichotomiques en regroupant les modalités en deux lots de façon que les 2 groupes d'individus associés à la dichotomie, diffèrent le plus possible relativement au caractère à expliquer.

Le résultat de l'analyse est commodément représenté par un arbre montrant les dichotomies successives. Voici un exemple de dichotomie :



Signification : le groupe 6 contient 441 individus sur lesquels la moyenne du caractère à expliquer est 1,72. C'est le caractère « structure des rayons » dont les 5 modalités sont regroupées en 2 lots (0, 1) et (2, 3, 4) qui fournit la dichotomie des 441 individus telle que les deux groupes résultants soient les plus différents possible selon le caractère à expliquer (T/R). Cette dichotomie est la 9^e effectuée et retenue à partir de la population de départ.

Ces groupes (n^{os} 18 et 19) ont respectivement 273 et 168 individus et les moyennes du caractère à expliquer sont respectivement 1,69 et 1,79, le t de Student associé à la différence 1,79-1,69 étant 3,38.

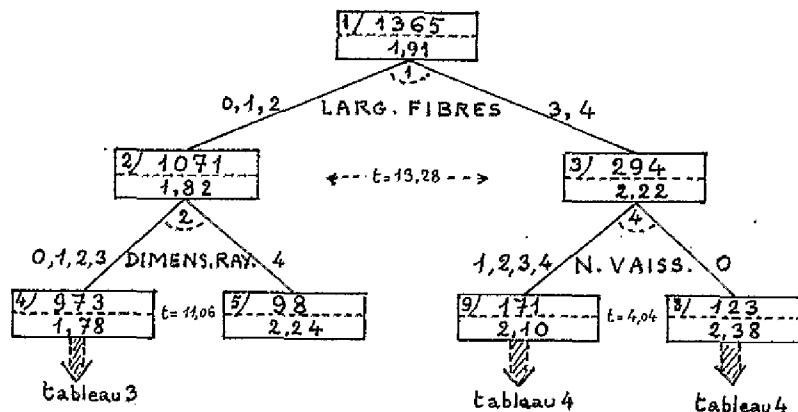
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

L'ensemble des dichotomies effectuées ne peut être représenté en un seul arbre en raison des nombres de groupes de plus en plus grands.

Le tableau 2 représente le sommet de l'arbre,

c'est-à-dire les premières dichotomies, puis les tableaux 3 et 4 donnent les embranchements venus dans les étapes ultérieures.

TABLEAU 2. — Premières segmentations.



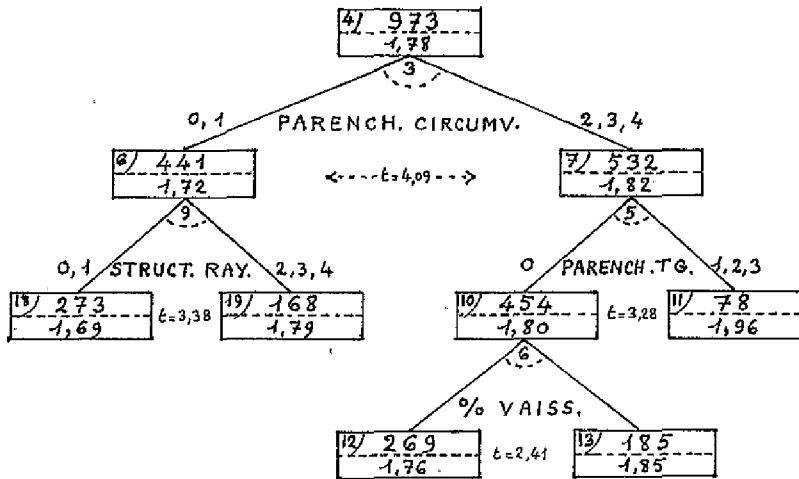


TABLEAU 3. — Reprise du groupe 4.

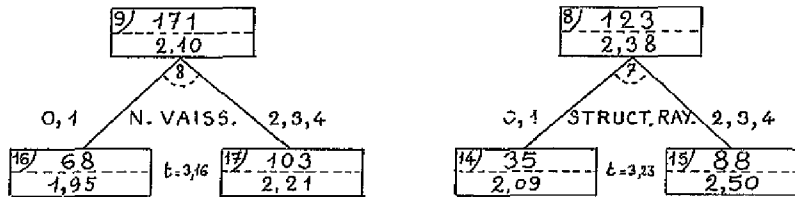


TABLEAU 4. — Reprise des groupes 8 et 9.

DISCUSSION

Avant de faire des commentaires sur les points les plus intéressants ou les plus discutables de ces résultats, il faut bien avoir présent à l'esprit ce que nous disions en commençant, sur la mauvaise adéquation de certains paramètres à notre problème. Il ne faut donc pas espérer des miracles, mais seulement d'éventuelles indications fructueuses, positivement ou négativement d'ailleurs.

Prenons la première coupure ; celle qui est apparue statistiquement la meilleure sur l'ensemble de 1.365 individus : elle s'est faite sur la largeur des fibres, bien que celle-ci mesurée sur dissociation ne soit pas orientée. Et la séparation indique que les plus fortes anisotropies sont (en moyenne) constatées sur les bois à fibres larges.

Restons avec ce groupe de bois à fibres larges. Une segmentation ultérieure, déjà beaucoup moins significative par son t de Student et qui n'est inter-

venue qu'en 4^e étape, s'est opérée sur le nombre de vaisseaux. C'est un facteur d'anisotropie très peu attendu ; mais nous voyons que la coupure isole seulement le groupe 0 (vaisseaux très rares ou absents) de l'ensemble des autres. Dans ce groupe de 123 bois, il y a les 44 conifères — sans vaisseaux — et il est regrettable que le découpage en classes de nombres n'ait pas fait une classe « 0 vaisseaux » spéciale pour les conifères car c'est peut-être eux seulement qui ont provoqué cette segmentation par leur comportement particulier et non par une influence directe des vaisseaux. Il est probable que ceux-ci n'ont joué que comme meilleur caractère d'identification de ce groupe particulier. Nous reviendrons sur ce point.

Revenons à la première étape, qui s'est opérée sur le facteur largeur de fibres. Les meilleurs t de Student étaient 1) largeur des fibres (retenue) ;

2) Structure des rayons ; 3) Dimension des rayons (HL) qui est classé 3 fois, c'est-à-dire quelle que soit la coupure entre les classes.

Si nous observons maintenant dans les tableaux la présence de la dimension des rayons en 2^e étape partageant le groupe 2, et de la structure des rayons pour le partage des groupes 6 et 7, on peut retenir que le facteur rayons a beaucoup d'importance. On notera que ni le nombre des rayons ni leur proportion n'apparaissent. Par ailleurs, dans les groupes partagés par la structure, ce sont les groupes avec rayons hétérogènes — peu de cellules couchées — qui ont le T/R le plus fort. C'est contraire à l'expérience plusieurs fois faite et publiée, que les cellules couchées diminuent le retrait radial, augmentant ainsi le T/R , notamment dans le Chêne.

Il convient de souligner une des limites du programme de recherche : seuls les résultats des premières étapes de la segmentation sont reproductifs. Une légère modification de la présentation des facteurs explicatifs (découpage en classes différent, par exemple) suffit à modifier les résultats dès la 5^e étape (caractère retenu différent).

Négativement, cet arbre de segmentation montre que le parenchyme apparaît tardivement dans les subdivisions ; en outre, le plus attendu comme cause d'anisotropie, le parenchyme en bandes tangentielles apparaît après le parenchyme associé aux vaisseaux. Ceci montre le rôle négligeable du parenchyme et s'accorde avec les résultats donnés par Ph. PERNOT en 1974 (7) : il trouvait un coefficient de corrélation partiel entre T/R et parenchyme, de 0,13 seulement, c'est-à-dire tout à fait négligeable, l'échantillon étant le même que celui-ci.

On peut noter également que, si la largeur des fibres est le premier facteur mis en évidence, par contre, l'épaisseur relative des parois (coefficient de souplesse, 14^e facteur) n'est pas apparue. Mais si l'on prend T et non plus T/R comme variable à expliquer, le programme de segmentation indique le coefficient de souplesse comme 1^{er} facteur explicatif.

En résumé, les caractères anatomiques mis en avant par cette méthode de segmentation sur le critère T/R sont surtout la largeur des fibres, la dimension et la structure des rayons.

CONCLUSION

LES AXES DE RECHERCHE A SUIVRE

Sur une population très nombreuse et couvrant une gamme de structures très étendue, les résultats obtenus ont un poids considérable. Mais l'expression assez grossière des caractères anatomiques et surtout leur mauvaise adaptation au problème étudié, empêchent de considérer ces résultats comme satisfaisants et suffisants.

Nous les voyons plutôt comme le défrichage d'un vaste domaine, permettant de mieux voir les perspectives intéressantes et de choisir des axes de recherche ayant de bonnes chances d'être fructueux.

Ainsi, doit être abandonné le rôle du parenchyme, même bien stratifié en couches tangentielles. Il faudra rechercher tout spécialement à mettre en évidence le rôle des dimensions de la section transversale des fibres mesurées d'une façon plus complète. Les rayons devront retenir aussi l'attention.

Travaillant sur une population aussi diverse, il sera nécessaire et intéressant de considérer différemment les variations d'anisotropie de retrait entre genres (donc structures) différents, et les variations au sein d'un groupe de même structure.

REFERENCES

1. BOYD (V. D.). — Anisotropic shrinkage of wood: identification of the dominant determinants. *J. Jap. Wood Resh. Soc.*, Vol. 20, n° 10, 1974.
2. KELSEY (K. E.). — A critical review of the relationship between the shrinkage and structure of wood. *C. S. I. R. O. Div. For. Prod.*, Techn. paper n° 28, 1963.
3. MC INTOSH (D. C.). — Shrinkage of Red Oak and Beech. *For. Prod. J.*, 5 (5), 1955 et 7 (3), 1957.
4. MARIAUX (A.) et NORMAND (D.). — Anisotropie de retrait transversal du bois, aperçu bibliographique des explications proposées. Comptes rendus du VIII^e Congrès Intern. Bot., Paris, 1954.
5. MARIAUX (A.). — Le retrait du bois et ses constituants chimiques, recherches de corrélations, *Holz-forschung*, 12, n° 8, 1958.
6. MORGAN (J. N.) and CONQUEST (J. A.). — Problems in the analysis of survey data, a proposal. *J. A. S. A.* vol. 58, n° 302, June 1963. Programme AID (Bibliothèque C. I. S. I.).
7. PERNOT (Ph.). — Étude morphologique de bois tropicaux, en liaison avec leur anisotropie de retrait, Centre de Morphologie Mathématique de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Rapport de stage, non publié, 1974.
8. SCHNIEWIND (A. P.). — Transverse anisotropy of wood: a function of gross anatomic structure, *For. Prod. J.* 9 (10), 1959.