



Vue générale de l'analyseur de texture.

ESSAI D'ANATOMIE QUANTITATIVE DE QUELQUES BOIS A L'ANALYSEUR DE TEXTURES

par A. MARIAUX (1), P. GUÉNEAU (2) et J. SERRA (3)

SUMMARY

AN ATTEMPT AT A QUANTITATIVE ANATOMICAL STUDY OF SOME WOODS, USING THE TEXTURE ANALYSER

New image analysers which break up a televised picture into points have performances bearing no comparison with those of former techniques of measurement. A trial application to wood has been made, and this article explains the principles of the analyser, the mathematical methods used to interpret the structures (structuring elements, variograms), and the measurements of the elements of the wood which were made.

An interesting result was obtained, thanks to the quantity of measurements made possible, concerning the elliptical form of vessels in beech which are characteristic of the individual tree. Comments are also made on the difficulties which remain to be overcome.

(1) Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne.

(2) Centre Technique du Bois, Paris.

(3) Centre de Morphologie Mathématique. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

ENSAYO DE ANATOMIA CUANTITATIVA DE ALGUNAS MADERAS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE TEXTURAS

Los nuevos analizadores de imágenes que utilizan la descomposición en puntos de una imagen televisada, consiguen resultados que no son comparables con las antiguas técnicas de medición. Se ha realizado un ensayo de aplicación a la madera y exponemos aquí los principios del analizador, los medios matemáticos utilizados para interpretar las estructuras (elementos estructurales, variogramas) y las mediciones que han podido ser realizadas de elementos de madera.

A título de ejemplo, se ha obtenido un resultado interesante, gracias a la cantidad de medidas que ha sido posible efectuar, en lo relativo a la forma elíptica de los vasos de la haya, características del individuo-árbol. También se comentan las dificultades que quedan por vencer.

L'explication des diverses propriétés des bois réside soit dans leur structure, soit dans leur composition chimique.

De ce point de vue explication de propriétés, l'étude de la structure nécessite l'expression quantitative des éléments de cette structure par de très nombreuses mesures microscopiques. Qu'il s'agisse de comptage d'éléments dans un champ ou de détermination de dimensions dans différentes orientations, les progrès ont surtout été faits dans l'enregistrement et l'exploitation des données. Même des techniques évoluées, comme le cisaillement d'image, demandent une intervention minutieuse et lente de l'observateur.

L'apparition dans le domaine microscopique de la technique de la télévision utilisant le balayage électronique des images, apporte avec elle tous les progrès faits dans l'analyse automatique de ces images. Les performances sont alors telles que de grands espoirs peuvent être mis dans une exploration systématique de tous les éléments de la structure considérés comme facteurs des propriétés physiques et mécaniques des bois.

Sur la proposition du Centre de Morphologie Mathématique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, le Centre Technique Forestier Tropical et le Centre Technique du Bois ont collaboré avec lui, dans une première tentative d'application aux bois.

Le Centre de Morphologie Mathématique a en

effet développé, grâce à G. MATHERON et J. SERRA, des méthodes d'analyse d'image et de morphométrie. C'est un essai d'application au bois, à la fois de l'appareil « analyseur de texture » et des méthodes mathématiques les mieux adaptées, que nous avons réalisé avec la collaboration de Y. TRÉNARD (1), P. PERNOT, R. DUMAY et O. PÉRAY (2).

Comme il n'était pas possible, dans une première tentative, d'explorer toutes les grandeurs mesurables dans une structure de bois, nous avons pris des objectifs précis quoique déjà vastes : caractères des vaisseaux et des fibres pouvant jouer un rôle, d'une part dans l'imprégnabilité de certains bois de France, d'autre part dans l'anisotropie de retrait de quelques bois tropicaux.

Trois niveaux de problèmes sont à considérer dans cette expérience :

- 1) En quoi consiste matériellement l'analyse de l'image,
- 2) Quelles sont, très grossièrement, les processus mathématiques qui nous conduiront de l'analyse électronique de l'image aux grandeurs anatomiques que nous recherchons.
- 3) Sous quelle forme le bois donne-t-il une image analysable, et quelles sont les possibilités d'analyse des éléments de la structure du bois. Nous limiterons aux résultats anatomiques, laissant de côté les relations avec des propriétés physiques, qui ne sont pas le but de cet article et demandent de plus amples recherches.

PRINCIPE DE L'ANALYSEUR DE TEXTURE

La transmission à un écran de télévision d'une image quelconque, en noir et blanc, se fait par la décomposition de cette image en 600 lignes parallèles. Dans l'analyseur, chacune de ces lignes est composée de 300 points environ. Ce que l'appareil va explorer, c'est donc un ensemble de 200.000 à 400.000 points, selon les mailles et les champs choisis (fig. 2).

1) Image seuillée.

L'image captée présente toute une gamme de gris,

du blanc au noir. L'appareil permet de classer ces gris en une dizaine de niveaux, et de sélectionner le ou les gris à retenir et ceux à éliminer. Sur une coupe transversale de bois observée au microscope, on cherchera, par exemple, à obtenir une opposi-

(1) Centre Technique du Bois.

(2) Centre de Morphologie Mathématique.
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

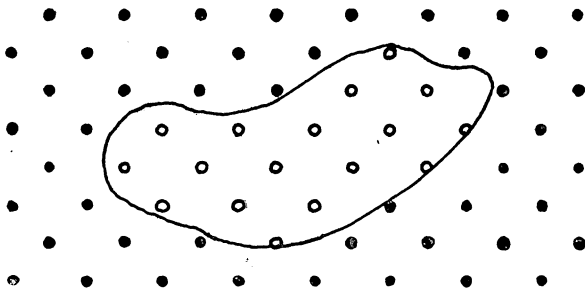


FIG. 2. — Image discrétisée

O = valeur 1
• = valeur zéro.

tion entre parois vues en noir et cavités vues en blanc, en choisissant un *seuil* de gris qui élimine les inégalités de teinte des parois, sans transformer en noir certaines petites membranes, thyllés, etc. ... présentes dans les cavités. Cette opération se fait à vue, sur l'écran de télévision (fig. 3).

2) Élément structurant.

L'image ainsi préparée, et discrétisée en points, est ensuite analysée en binaire : un point est blanc ou noir, le signal sera 1 ou 0.

Mais dans l'appareil élaboré à Fontainebleau (et commercialisé sous licence par E. LETZ), l'exploration de l'image ne se fait pas en testant successivement et individuellement les points. C'est un petit élément géométrique formé de quelques points (tout ou partie d'un hexagone de taille variable) qui balaie l'ensemble des lignes et qu'on appelle élément structurant. On teste alors pour

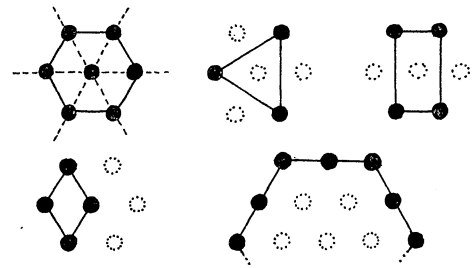


FIG. 4. — L'élément structurant hexagonal et quelques-uns des éléments qui en découlent.

chaque position de l'élément, si tous ses points sont dans la même phase, soit noire, soit blanche, ou s'il intercepte un changement de phase, et par lesquels de ses points (fig. 4).

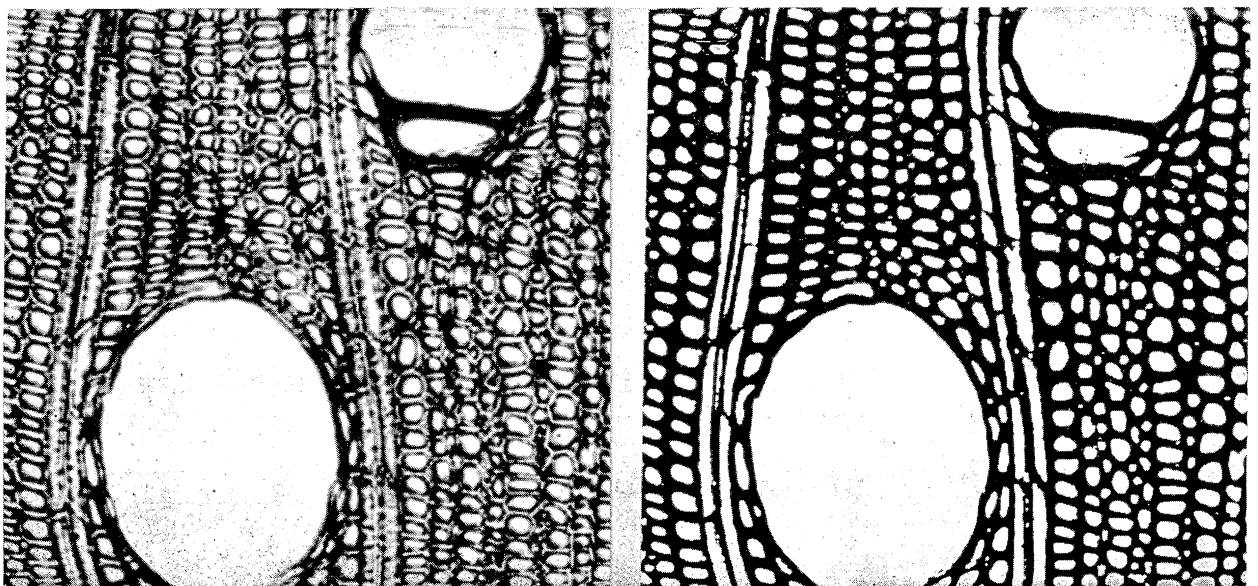
Le point seul conduit aux teneurs et aux surfaces. L'élément structurant permet d'une part, des transformations de l'image et, d'autre part, des analyses extrêmement élaborées de la structure de l'objet.

3) Transformations de l'image.

Nous observons une coupe transversale de bois seillée en noir et blanc ; toutes les cavités de vaisseaux, rayons, parenchyme, fibres, sont blanches. Si nous voulons, par exemple, étudier les vaisseaux, nous allons chercher à éliminer toutes les cavités nettement plus petites que ceux-ci.

Une façon de le faire est d'effectuer une *érosion*. Un élément structurant B circulaire (en pratique

FIG. 3. — Section transversale d'*Aucoumea klaineana* à gauche, naturelle, à droite, seillée.



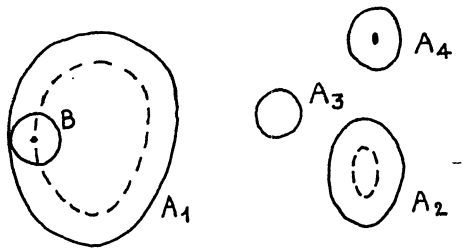


FIG. 5. — Erosion de l'ensemble A par l'élément structurant B . De l'élément A_3 , il ne reste rien et l'érodé de A_4 est réduit à 1 point.

un hexagone) balaie l'image (fig. 5). Il rencontre une cavité, c'est-à-dire un ensemble A de points blancs. Si le centre de B étant implanté en un point z , tout l'élément B_z est inclus dans A , le point z reste blanc. Si B_z déborde de A sur des points noirs, z n'appartient plus au nouvel ensemble transformé C et devient noir.

En termes symboliques :

$$C = \{ z/B_z \subset A \}$$

(C égale l'ensemble des z tels que B centré en z soit inclus dans A .)

Toutes les cavités seront rétrécies, érodées, d'une marge égale au rayon de l'élément. L'érosion apparaît sur l'écran. On fait varier le rayon de l'élément structurant jusqu'à éroder entièrement les petites cavités, et ne plus conserver que les vaisseaux.

Pour revenir à la dimension initiale de ceux-ci on pratique l'opération inverse, la **dilatation**, sur l'image des vaisseaux.

Cette composition d'une érosion et d'une dilatation constitue une **ouverture**. C'est une sorte de tamisage des grains de l'image.

Beaucoup d'autres transformations sont possibles. Ainsi, si l'on commence par une dilatation on va fusionner les vaisseaux accolés qui resteront unis après érosion. Cette opération de **fermeture**

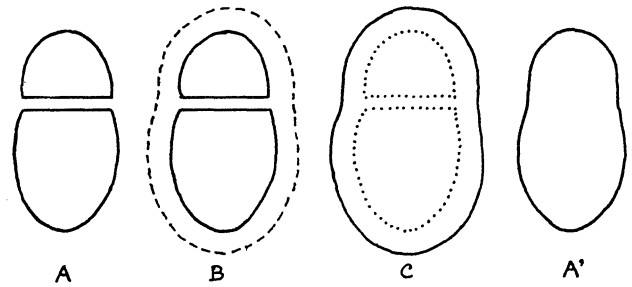


FIG. 6. — Fermeture par dilatation B puis érosion C d'un groupe A de 2 vaisseaux accolés en un seul élément A' .

permettra de compter les groupements de vaisseaux (fig. 6).

Ainsi encore, on peut faire des **dilatations linéaires** dans une direction choisie. L'augmentation de surface, variable selon la direction, permet de calculer l'anisotropie de diamètre des éléments.

4) Champs explorés, succession automatique.

La surface analysée n'est pas nécessairement l'ensemble du champ visible au grossissement choisi. Pour s'adapter au problème particulier, on peut choisir au préalable une diminution du champ qui lui donne une forme et une dimension appropriées ; c'est ce qu'on appelle un masque de mesure. Il peut être rectangulaire, carré, circulaire ou même linéaire.

Cela permettra par exemple, si l'on veut faire des mesures sur le tissu fibreux, de limiter le champ exploré à l'intervalle entre 2 rayons.

D'autre part, on peut disposer d'une platine à balayage qui permet un déplacement automatique de la coupe en vue d'une exploration systématique, avec un pas choisi sur les deux axes de coordonnées.

Précisons enfin que les **effets de bordure** (interceptions d'éléments par le bord du champ) sont compensés dans les calculs.

PROCESSUS MATHÉMATIQUE DE MORPHOLOGIE

QUELQUES MESURES IMPORTANTES

Une partie de la logique de l'analyseur est programmée pour les transformations que nous venons de voir. Une autre partie comporte les programmes de calcul à partir des signaux 0 et 1 donnés par les

différents points de l'élément structurant balayant l'image.

Ces calculs s'appliquent à la phase choisie, soit blanche, soit noire, de l'image seuillée et transfor-

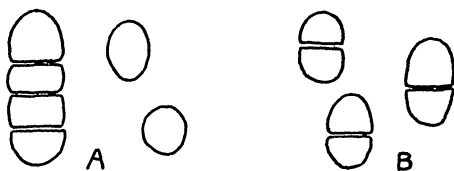


FIG. 7. — Le nombre de vaisseaux (6) et le nombre de groupes (3) ne donnent pas toute l'information sur le groupement des vaisseaux : par 4, en A, par 2 seulement en B.

mée. Ainsi, si l'on opère sur les cavités de vaisseaux après élimination des petites cavités (autres tissus), on pourra déterminer les grandeurs suivantes :

- surface totale,
- nombre,
- périmètre,
- nombre d'accolements,
- surface unitaire moyenne, soit par vaisseaux, soit par groupes,
- diamètre moyen dans chaque direction, donc forme moyenne des vaisseaux,
- granulométrie, etc...
- épaisseur des parois.

Sans entreprendre de rapporter ici tous les raisonnements mathématiques qui conduisent à ces grandeurs, il est bon de faire entrevoir le processus suivi :

La **surface totale** des] vaisseaux par unité de surface est la donnée la plus immédiate : c'est le nombre de points blancs dans l'image (par rapport au nombre total noir + blanc).

Le **nombre de vaisseaux** (c'est-à-dire le nombre de « grains » pour les mathématiciens) se détermine par rotation de la normale, le long de la paroi des vaisseaux.

La **surface unitaire** moyenne se déduit de la surface totale divisée par le nombre.

Si par une fermeture on a réuni en un seul les vaisseaux accolés (fig. 6) et qu'on détermine le nombre de « grains » ainsi formés, la différence des deux nombres donne le **nombre d'accolements**. (Mais nous ne saurons pas s'il y avait quelques accolements multiples et des vaisseaux isolés ou beaucoup d'accolements par 2) (fig. 7). Toutefois, cette information incomplète peut quand même être précieuse, par exemple au point de vue rôle de diffusion des vaisseaux.

La **granulométrie** résulte d'une série de transformations autant que d'un calcul : on détermine le nombre de vaisseaux restant après des érosions

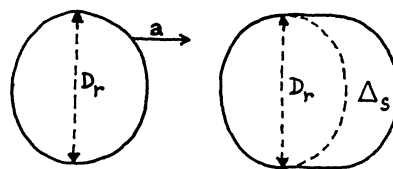


FIG. 8. — Une dilatation tangentielle \vec{a} permet de déterminer le diamètre radial D_r , la surface nouvelle Δ_s étant fonction de a et de ce diamètre.

de tailles successives ne laissant que les grains de plus en plus gros.

Les **diamètres** et l'**anisotropie** utilisent l'aptitude de l'analyseur à travailler dans les 3 directions principales de l'hexagone (0 , $\pi/3$ et $2\pi/3$) : Avec un élément structurant linéaire, dilatons un vaisseau d'une taille a dans la direction 0 (fig. 8). La surface s du vaisseau (comptée en nombre de points blancs) est augmentée d'une surface Δ_s . Celle-ci dépend de la projection du vaisseau dans cette direction 0 , c'est-à-dire du diamètre perpendiculaire à cette direction ; ici le diamètre radial. Connaissant a , on déduit D_r de Δ_s .

En effectuant successivement la dilatation des vaisseaux dans les trois directions, on obtient trois diamètres qui permettent non seulement de calculer le diamètre moyen tangentiel que l'on n'avait pas obtenu directement (sauf à tourner l'image de 90°), mais encore de vérifier si l'ovalité moyenne des vaisseaux (la direction du plus grand axe) est bien dans une des directions principales du bois (radiale ou tangentielle). Ceci est encore plus important dans l'étude de l'aplatissement des fibres ou trachéides.

Les **épaisseurs de parois** peuvent aussi se déterminer par une transformation linéaire. Si l'on reste sur l'exemple des vaisseaux, l'épaisseur des parois intervasculaires sera donnée par la taille de l'élément structurant (fig. 5 et 6) nécessaire à la fermeture du groupe de vaisseaux.

Si la dilatation est linéaire, et qu'elle est effectuée sur les cavités des fibres, elle permet de déterminer l'épaisseur moyenne et la fonction de répartition des épaisseurs des parois dans chaque direction.

Cependant, des difficultés apparaissent notamment avec la disposition des fibres plus ou moins en séries radiales bordées de séries d'extrémités de fibres sans cavités appréciables.

Parallèlement à ces méthodes, on peut en mettre en œuvre une autre qui appréhende mieux la répartition spatiale des éléments (vaisseaux, fibres, cernes) et que le C. M. M. a développée sous le nom d'analyse du variogramme.

LES VARIOGRAMMES.

But du variogramme.

Le variogramme est un outil morphologique destiné le plus souvent à débrouiller et caractériser des structures d'échelles différentes et imbriquées, telles que l'ensemble des cellules d'un même tissu du bois, puis les différents tissus de ce bois et enfin des variations de texture, cernes, etc... visibles à l'échelle de la figure 9, mais que l'on peut déceler à l'aide de mesures automatiques effectuées successivement sur des champs du type de la figure 3 où seuls, vaisseaux et fibres sont visibles.

Définition et propriété du variogramme.

Considérons la figure 10 qu'on analyse dans la direction $\vec{\alpha}$. Implantons au hasard un point x dans un grain A . Quand on s'écarte de ce point dans la direction $\vec{\alpha}$, de la distance h , on trouve le point $x + h$, qui est, soit dans la même phase que x , c'est-à-dire dans le grain A , soit dans l'autre phase. Le variogramme est la somme des cas où x et $x + h$ sont dans des phases différentes. C'est une fonction de $|h|$, définie dans chaque direction α , qu'on note $\gamma_\alpha(h)$.

Indiquons sommairement certaines propriétés du variogramme. La tangente à l'origine de $\gamma_\alpha(h)$ dans la direction α est égale au diamètre apparent $D_\alpha + D'_\alpha$ de la figure 10a, et dans la direction $\beta = \alpha + 90^\circ$, elle vaut D_β . D'autre part, dès que

FIG. 9. — Section transversale d'*Aucoumea klaineana* à faible grossissement ($\times 10$), montrant des cernes d'accroissement.



$|h|$ dépasse le diamètre maximum du grain D_β , dans la direction α , $\gamma(h)$ reste constant quel que soit h . En effet, si x est dans le grain, $x + h$ ne peut pas y être. Ce palier de $\gamma_\alpha(h)$ a pour ordonnée la surface A du grain ; il est donc le même dans toutes les directions.

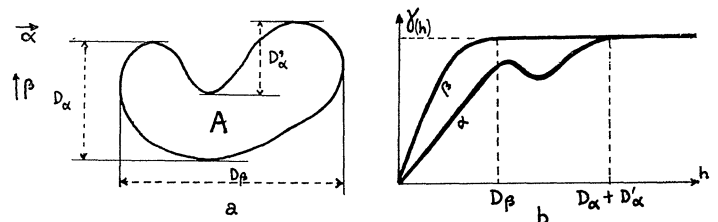
La description qui précède est du type **global**. (Le champ de mesures recouvre la totalité de l'objet.) Si l'on analyse une structure comme celle de la photographie n° 3, il faut passer en représentation **locale**. Les résultats précédents se transposent sans difficultés : $\gamma(h)$ est la probabilité que x et $x + h$ appartiennent à des phases différentes, les tangentes à l'origine valent la somme des diamètres apparents de cavités par unité de volume, et si p est la proportion en surface des cavités, le palier a pour ordonnée $p(1 - p)$.

Variogrammes, périodicités et paquets de particules.

Montrons sur quelques schémas comment le variogramme reflète certaines structures. Considérons le damier de la figure 11a. Son variogramme parallèlement aux côtés est le même dans les deux directions, et est donné par la figure 11b. Il présente des extrêmes aux multiples de la longueur de la case élémentaire. Si nous supposons maintenant l'échiquier infini, et que nous représentons son variogramme en local, on obtient la figure 11c (dont on notera qu'elle n'atteint jamais définitivement son palier).

Considérons maintenant une régionalisation présentant des amas dont les centres sont à une distance moyenne λ_α dans la direction α . Si nous mettons x dans une particule d'un amas, $x + \lambda_\alpha$ a relativement plus de chances d'être semblable à x que $x + \lambda_\alpha + \frac{\lambda_\alpha}{2}$ par exemple. Le variogramme va donc présenter un minimum pour la valeur λ_α (fig. 12b). De la même manière, si les centres des amas sont plus écartés dans la direction α que β , les minima de $\gamma_\alpha(h)$ seront plus espacés que ceux de $\gamma_\beta(h)$. On mettra ainsi en évidence l'anisotropie des groupes de particules.

FIG. 10. — Variogramme d'un grain A .



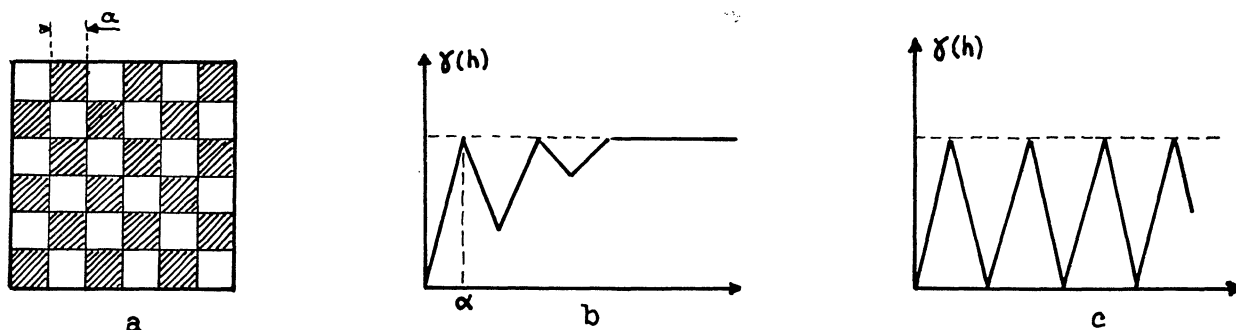


FIG. 11. — Variogramme d'un damier.

Le variogramme de la figure 12b devient pratiquement constant à partir d'une certaine valeur a_α , qui dépend évidemment de la direction considérée. On appelle cette abscisse a_α la **portée** du variogramme, et l'ordonnée correspondante son **palier**. Il se peut que le variogramme expérimental n'atteigne pas un palier, mais croisse indéfiniment. Dans ce cas, il témoigne de l'existence de macrostructures.

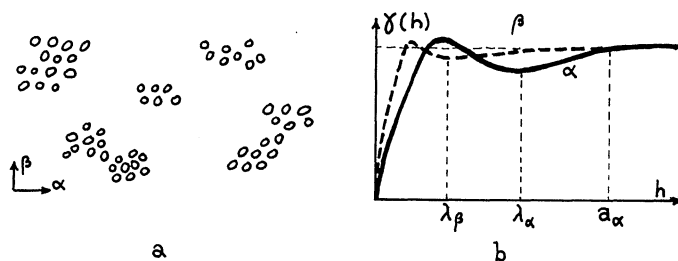


FIG. 12. — Variogramme d'amas de particules.

PREMIERS ESSAIS SUR BOIS

Le bois peut être présenté à l'analyseur sous différentes formes ; nous y reviendrons dans les considérations finales, mais pour ces premiers essais, nous avons travaillé sur préparations microscopiques, c'est-à-dire sur sections minces montées entre lame et lamelle et observées par transparence.

En fonction des objectifs que nous nous étions

donnés comme tests et du matériel disponible, les premiers essais ont porté sur 2 espèces de conifères et deux espèces de feuillus de France, avec un échantillonnage très abondant sur chaque arbre, et une quarantaine de bois tropicaux appartenant à 16 espèces (dans 5 familles), à raison d'une coupe par arbre.

IDENTIFICATION DES TISSUS

La première opération fut d'identifier les différents tissus constitutifs des bois, c'est-à-dire de voir sur quels critères ou par quelles transformations l'analyseur pourrait reconnaître les types de cellules.

Fibres.

Nous avons travaillé surtout en coupe transversale, et dans ce plan, la plupart des cellules étant à axe longitudinal — sauf celles des rayons — apparaissent avec une cavité à contour bien précis. Le cas le plus simple est celui des conifères comme

le sapin où il n'y a pratiquement que des trachéides et des rayons. On peut se placer entre 2 rayons à l'aide du masque et travailler uniquement sur les trachéides, ou bien négliger la présence des rayons dont la proportion est faible et constante, si l'on fait une étude de variation des trachéides dans un sens radial.

De même, les fibres dans un bois de feuillus peuvent être analysées sur des champs réduits, éliminant rayons, vaisseaux et parenchyme, à condition que celui-ci ne soit pas dispersé, intimement mélangé aux fibres.

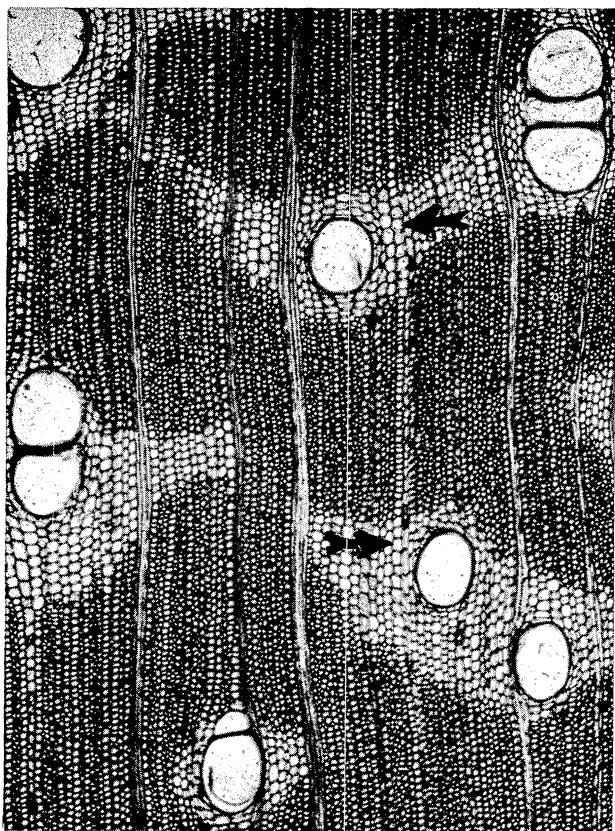


Fig. 13. — Plages de parenchyme dans un bois de *Chlorophora excelsa*. Les flèches montrent des cellules terminales de rayons traversant ces plages et non différenciables.

Trachéides et fibres représentent le « fond » du bois, dont on cherche donc à isoler de petits champs homogènes pour déterminer leurs dimensions, épaisseurs de parois, anisotropies, etc...

Les autres tissus ne peuvent être examinés isolément. On procède par différenciation par rapport au fond fibreux et éventuellement entre eux.

Vaisseaux.

Les vaisseaux sont les éléments les plus faciles à individualiser grâce à leurs dimensions. Une série d'ouvertures peut éliminer toutes les petites cavités et ne conserver que l'image des vaisseaux, ou

plutôt de leurs cavités. Quand on travaille sur un ensemble de coupes de même espèce, par exemple de peuplier, cela peut paraître plus facile que sur une suite de coupes d'essences très diverses, comme ce fut le cas avec les bois tropicaux. Néanmoins, une ouverture de même taille a permis sur toutes les coupes d'éliminer les fibres et les rayons, en gardant tous les vaisseaux.

Rayons et parenchymes.

On peut différencier des cellules sur l'analyseur par la grosseur ou par la forme de leur cavité. En coupe transversale, certaines cellules de rayons (de type dressé) et de parenchyme, se séparent des fibres par leur cavité légèrement plus grande. Mais dans certains bois légers, la différence est trop faible. En outre, une paroi transversale, quand elle est présente dans la coupe, annule la cavité et élimine donc la cellule. des mesures en cours. Un peu de parenchyme est ainsi perdu. C'est pourquoi aussi, les cellules couchées de rayons sont mal identifiables malgré leur forme : elles contiennent beaucoup de parois qu'aucun seuillage ne peut éliminer.

Enfin, entre elles, des cellules de parenchyme et des cellules dressées de rayons apparaissent pratiquement identiques (fig. 13).

On est conduit à essayer d'identifier les rayons sur coupe tangentielle. Dans la mesure où il s'agit de rayons homocellulaires, leurs cellules apparaissent petites et assez circulaires. Mais les cellules dressées se confondent encore avec le parenchyme — s'il y en a. En outre, une partie des cellules, même couchées, sont bouchées par leurs cloisons, et, d'autre part, les cavités des fibres sont plus ou moins ouvertes et de teinte très variable, difficile à seuiller dans les bois tendrés sans faire disparaître une partie des rayons.

C'est pourquoi nous avons écarté les mesures concernant les rayons, et, de plus, nous avons cherché à travailler sur des bois particulièrement pauvres en parenchyme.

Il faut cependant remarquer que, pour certaines recherches, l'analyse globale de la structure, toutes cellules ensemble et non identifiées, peut être intéressante, et c'est là que les variogrammes auront le maximum d'intérêt.

MESURES DIRECTES SUR L'IMAGE TRANSFORMÉE.

Pour les bois de France et quelques bois tropicaux, des mesures directes ont donc été faites sur les vaisseaux et les fibres ou trachéides (avec, rappelons-le, comme trame de fond, l'intention de

relier les mesures obtenues à des propriétés des bois).

Une fois le meilleur seuil sélectionné sur l'image, les différentes mesures souhaitées ont été faites

sans autre problème : nombre, nombre de groupes, surface unitaire, diamètres dans les directions tangentielle et radiales. On travaillait avec un objectif $\times 4$ qui donnait un champ de $0,75 \text{ mm}^2$ (210.672 points). La répartition des champs de mesure dans les coupes dépendait de l'information recherchée. Dans les bois tempérés, ils étaient placés par rapport aux cernes ; dans les bois tropicaux, selon un quadrillage systématique à raison de 16 par lame.

MESURES CONDUISANT AUX VARIOGRAMMES.

Les mesures conduisant aux variogrammes ont été faites sur 20 préparations sélectionnées, en utilisant toujours et uniquement la coupe transversale, avec un objectif $\times 10$.

Sur chaque coupe, le variogramme moyen a été calculé à partir de 36 champs disposés en maille régulière.

Sur chaque champ, on a mesuré d'abord la surface seillée, c'est-à-dire la proportion totale de cavités et de parois ; ensuite, la covariance avec des pas variant de 1 à 80μ : 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 50, 60, 70, 80.

Les mesures de covariance ont été effectuées dans les 2 directions, radiale et tangentielle. Elles ont été directement sommées pour chaque direction, de manière à avoir des valeurs moyennes.

On remarque, sur le variogramme moyen d'un *Aucoumea* (celui de la fig. 3), trois séries de phénomènes (fig. 14).

a) Croissance rapide, de 0 à 15μ , avec une pseudo-périodicité (effet de trou), qui reflète la structure des fibres. L'abscisse du maximum (portée) représente la dimension moyenne des cavités. L'abscisse

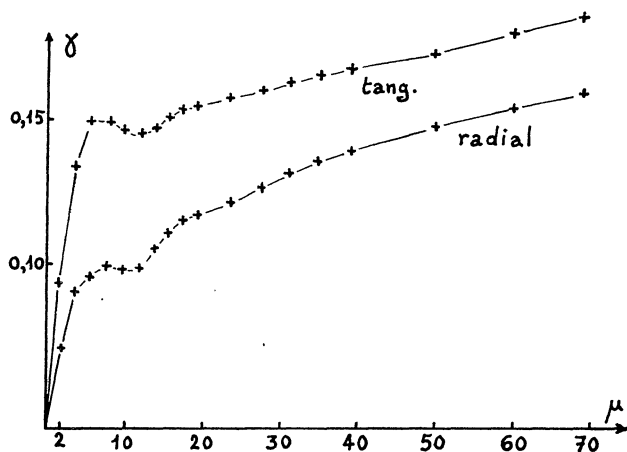


FIG. 14. — Variogramme d'un *Aucoumea klaineana*.

Il faut remarquer que toutes les mesures souhaitées étaient faites successivement et rapidement sur le même champ.

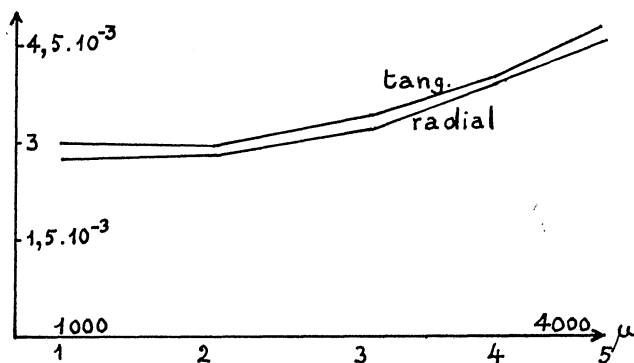
Nous donnerons en dernière partie quelques résultats intéressants par eux-mêmes, obtenus dans la mesure des diamètres des vaisseaux de peupliers et de hêtres. Ils montreront comment des informations vraiment nouvelles peuvent apparaître uniquement grâce à la puissance de cette technique.

du minimum correspond à la distance moyenne entre cavités, soit, si les centres des cavités sont alignés (direction radiale), au diamètre moyen des fibres dans la direction considérée. La différence est donc l'épaisseur des parois.

L'interprétation des ordonnées, plus délicate, ne peut être donnée que dans la mesure où l'on peut approcher la structure du phénomène par un modèle probabiliste. La différence des ordonnées du maximum et du minimum reflète le degré de régularité dans les distances inter-fibres. La tangente à l'origine, est égale à $1/\pi$ fois le périmètre total des cavités par unité de surface.

b) Le variogramme ne tend pas vers un palier, mais connaît une deuxième croissance, moindre que la première. Cette deuxième montée est provoquée par les vaisseaux, et si on la poursuivait plus loin, elle aurait une forme sensiblement analogue à celle des fibres, mais sur une échelle dix fois plus étirée. On ne retrouverait toutefois pas la pseudo-périodicité, qui n'existe plus au niveau des vaisseaux. Par contre, ce que nous venons de dire sur la tangente à l'origine, s'applique encore à la pente initiale de cette deuxième croissance. On connaît donc aussi le périmètre des vaisseaux (sans celui des fibres cette fois-ci).

FIG. 15. — Variogramme à grande échelle d'un *Aucoumea klaineana*.



c) On voit que les deux variogrammes radiaux et tangentiels sont décalés l'un par rapport à l'autre. Cette anisotropie, dite de type **zonal**, est le fait des rayons. En effet, si l'on se déplace le long d'un rayon (donc dans la direction radiale), on ne change pas d'état sur de très longues distances. Le variogramme de la direction radiale en est décalé vers le bas. La valeur de ce décalage est proportionnelle à la surface occupée par les rayons, rectilignes sur de grandes distances.

Considérons maintenant la même coupe dans son ensemble, sur une échelle beaucoup plus vaste. Prenons pour paramètre la surface moyenne des cavités dans chaque champ ; ce que les morphologistes appellent la « teneur ». On a donc 36 valeurs numériques implantées sur une maille carrée de 1.280 μ d'intervalle. Le concept de variogramme se généralise à ces valeurs.

Si x est le rang d'un champ (de 1 à 36), et $f(x)$ la teneur en cavités de ce champ, on pose :

$$\gamma_r = \text{moyenne en } x \text{ de } [f(x) - f(x + h)]^2.$$

On peut donc continuer à analyser les croissances de la courbe à une échelle beaucoup plus vaste que celle du champ de mesures élémentaires (fig. 15).

Les variogrammes à grande échelle sont assez différents. Cependant, dans le sens tangentiel, on observe sur presque tous une légère dérive qu'on

explique mal autrement que par l'irrégularité d'épaisseur de la coupe : en effet, si la coupe est plus épaisse d'un côté, la lumière la traverse moins et l'on a moins de parties seuillées. Dans le sens radial, les variations s'expliquent mieux en raison de la présence des cernes. On trouve, en gros, deux types de variogrammes.

Les uns « en dents de scie » expliquées par la présence des cernes, et on peut associer à leur périodicité la périodicité des cernes.

D'autres variogrammes pratiquement plats : on peut s'expliquer ceci par deux raisons : les cernes peuvent être irréguliers ou inexistantes et faire qu'ainsi le variogramme paraisse plat en valeur moyenne, d'autre part, les cernes peuvent être supérieurs à 4.000 (pas 5), et donc ne pas être pris en compte par cette échelle. L'échantillon de la figure 15, qui au dernier pas paraît s'accroître, pourrait avoir son premier maximum un peu au-delà du pas 5.

Ainsi, le variogramme fournit tout une série d'informations structurales de première importance, les condense en une seule fonction mathématique, et permet donc, en un seul coup d'œil, d'envelopper tout un éventail de structures, en particulier de déceler et de quantifier des anisotropies de structures dont l'existence ou l'importance auraient pu échapper à la simple observation des coupes.

UN EXEMPLE DE RÉSULTAT

Forme des vaisseaux, critère individuel chez le HÊTRE

Echantillonnage.

L'étude a utilisé, pour ce point particulier, les données recueillies sur 3 hêtres et un peuplier. Deux hêtres et le peuplier furent échantillonnés à un seul niveau ; le 3^e hêtre à deux hauteurs différentes. A chaque niveau la découpe transversale de l'arbre fut partagée en 3 secteurs. Dans chaque secteur, on a prélevé quelques lames minces suivant le plan de la figure 17.

Echelle de travail.

Comme l'un des facteurs d'hétérogénéité du bois réside dans l'alternance entre bois initial et bois final, le champ de mesures était déplacé, à intervalles réguliers de 1 mm, perpendiculairement aux cernes d'accroissement annuels, sur une ligne radiale. Dans chaque cerne, trois lignes radiales étaient ainsi parcourues.

Ensuite, on s'est placé à l'échelle du cerne, en prenant les moyennes des paramètres mesurés sur chaque groupe de 3 champs équidistants du début du cerne (fig. 18).

Analyse des données.

Pour chaque secteur considéré comme un individu, on a calculé, à partir des lames minces, la moyenne des huit caractères suivants concernant les vaisseaux :

% surf.	: Proportion de surface occupée par les vaisseaux,
per. vais.	: Périmètre moyen d'un vaisseau,
surf. vais.	: Surface moyenne d'un vaisseau,
diam. tg.	: Diamètre tangentiel moyen d'un vaisseau,
diam. rad.	: Diamètre radial moyen d'un vaisseau,

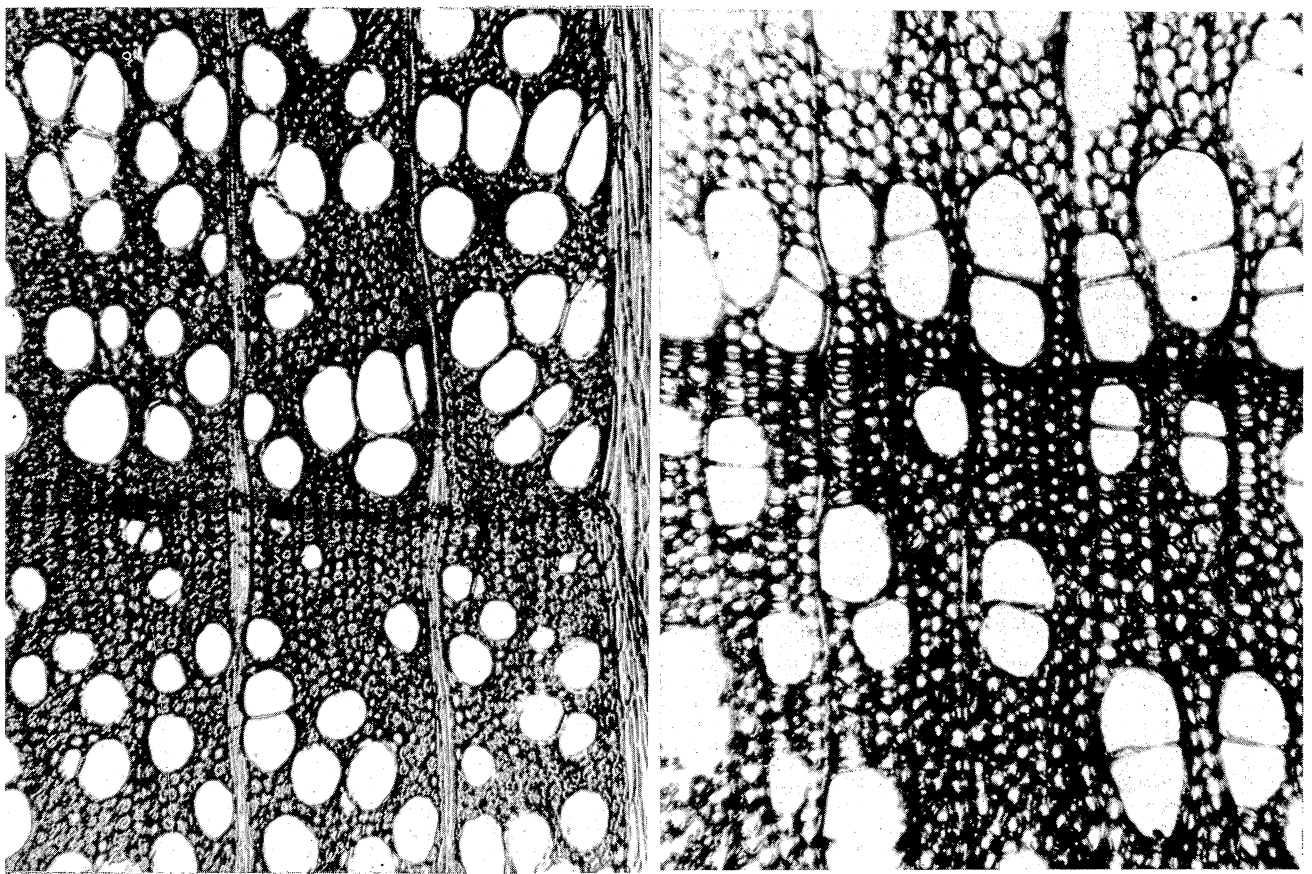


FIG. 16. — Sections transversales, $\times 115$, d'un hêtre (*Fagus sylvatica*) et d'un peuplier (*Populus sp.*) pour l'analyse des vaisseaux.

nombre vais. \dots : Nombre de vaisseaux/mm²,
 nombre groupes : Nombre de vaisseaux/mm² après regroupement,
 surf. groupes : Surface moyenne d'un vaisseau après regroupement.

On a effectué l'analyse des correspondances dans ce tableau de données, après les avoir normalisées. Les trois premiers axes factoriels ont pour inerties relatives respectives 89,5 %, 7,5 % et 2 % (inertie cumulée 99 %). On peut donc déjà dire que le premier axe reflète un facteur trivial, ou pour le moins, fortement évident par rapport aux autres.

De haut en bas à droite :

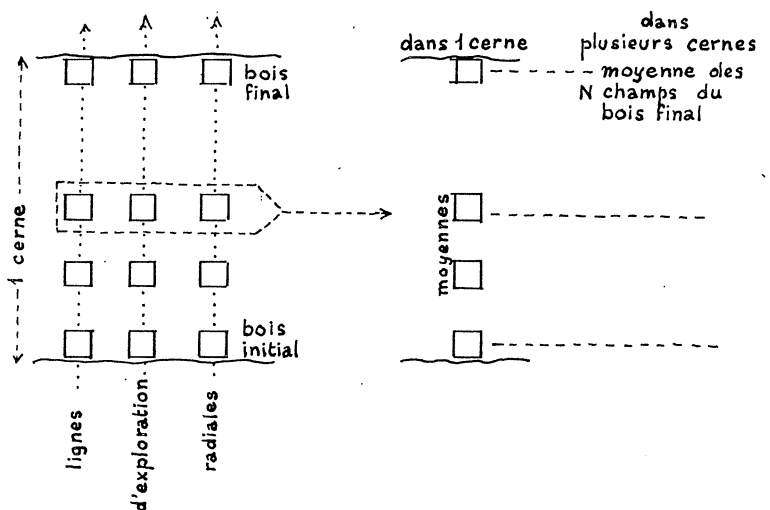
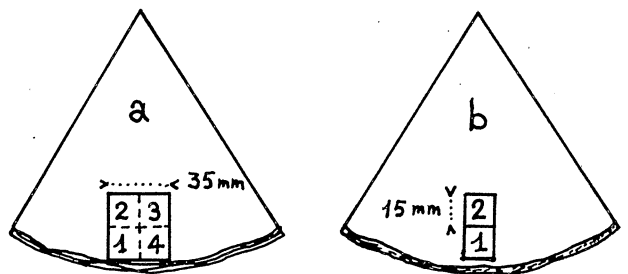


FIG. 17. — Echantillonnage dans le peuplier (a) et dans le hêtre (b). Un seul des 3 secteurs est représenté.

FIG. 18. — Distribution des champs de mesure dans une coupe.

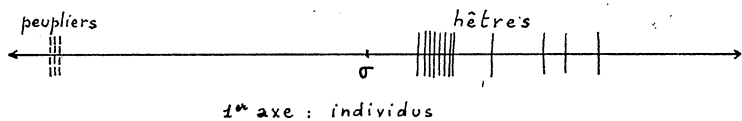
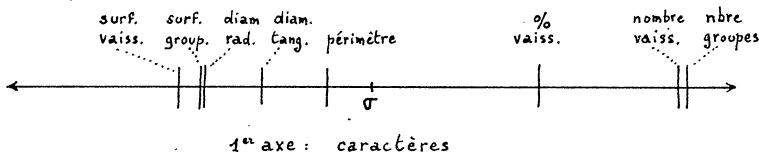


FIG. 19. — Analyse multivariable, 1^{re} composante principale. On doit lire les 2 axes en les superposant. Les caractères sont d'autant plus liés à des individus qu'ils leur sont plus proches.



sont du même ordre et l'on a intérêt à les représenter ensemble (plan factoriel 2-3 ; fig. 20). L'examen de ce plan 2-3 permet de découvrir un phénomène extrêmement intéressant concernant les individus : si l'on rejoint par une ligne les points représentatifs d'un même hêtre, on obtient une série de droites pratiquement parallèles. Les trois points du peuplier ne vérifient absolument pas cette tendance.

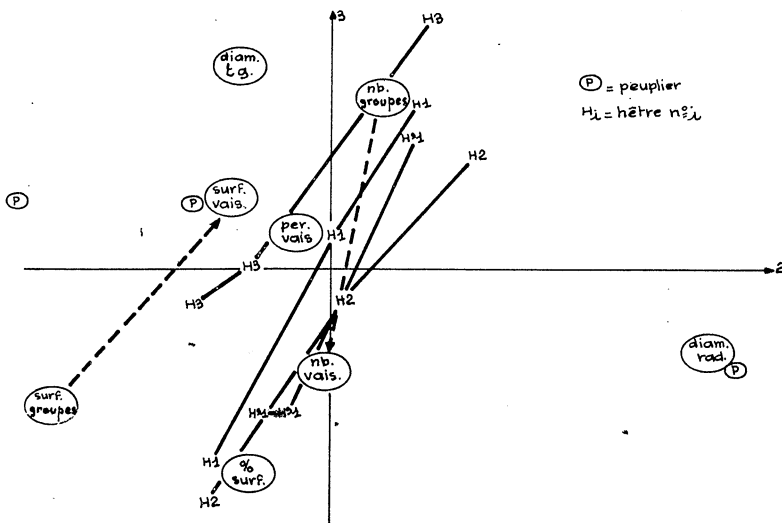


FIG. 20. — Analyse multivariable. Plan factoriel 2^e et 3^e composantes principales.

Comme pour l'axe n° 1, le contre-point joué par l'implantation spatiale des points-caractères, donne à ces alignements un début de signification. On remarque tout d'abord que le fait de regrouper les vaisseaux fait varier leur surface, et, de manière inverse, leur nombre parallèlement aux alignements des points-arbres. D'un secteur à un autre du même arbre, il y a donc grande hétérogénéité dans les groupes de vaisseaux. A l'inverse, l'évolution diamètre tangentiel → diamètre radial, est orthogonale aux alignements. Tout se passe donc comme si un hêtre donné conservait, d'un secteur à un autre, la même ellipticité de vaisseaux (voire, peut-être, d'un niveau à un autre).

Effectivement (cf. fig. 19), en ce qui concerne les individus, il oppose hêtre à peuplier (le contraire eût surpris).

La répartition des caractères montre du côté hêtre beaucoup de vaisseaux, mais relativement petits ; du côté peuplier, des vaisseaux plus gros, mais en plus faible nombre et à un degré moindre, de grands diamètres radiaux et tangentiels (le moindre degré est normal, la surface variant comme le carré des périmètres et diamètres). A cette différenciation s'en ajoute une autre : les hêtres sont plus irrigués (périmètre total) et le pourcentage de surface occupé par les vaisseaux sur leurs coupes est plus élevé.

Ces deux pôles sont, par contre, sans relation avec la présence de groupes de vaisseaux, ni avec leurs anisotropies.

Passons aux axes nos 2 et 3. Leurs inerties

Interprétation.

Il semblerait qu'on ait atteint l'un de ces rares paramètres microscopiques qui émergent à l'échelle macroscopique de l'arbre entier. L'ellipticité caractéristique au niveau de l'individu-arbre serait toutefois spécifique des hêtres et fautive pour le peuplier dont, au contraire, l'ellipticité des vaisseaux fluctue remarquablement d'un secteur à un autre (cf. plan 2-3).

On pourrait émettre quelques doutes sur la représentativité d'un plan factoriel 2-3 qui ne renferme que 10 % de la variance totale. En fait, nous le pensons significatif car l'importance démesurée du 1^{er} axe traduit simplement le fait qu'on a mêlé hêtres et peupliers, phénomène bien plus « variant » que les fluctuations internes aux hêtres, décelées par les axes nos 2 et 3.

Au terme de ces premiers essais d'analyse de structure de bois par un moyen aussi évolué mais aussi nouveau pour des chercheurs, dans le domaine du bois, quels enseignements pouvons-nous en retirer ?

Le matériel à analyser.

Le bois peut être présenté à l'analyseur sous différentes formes : bois massif, coupes minces ou microphotographies.

Le bois massif pourra peut-être s'envisager par la suite, mais il soulève des difficultés de préparation des surfaces, de remplissage des cavités et de contraste sur l'image qu'il était préférable d'éviter dans un premier temps.

Les microphotographies étant elles-mêmes à prendre sur coupes n'auraient pas été une simplification évidente par rapport à celles-ci. Il n'est pas exclu qu'elles puissent avoir leur avantage, par exemple pour améliorer le contraste de coupes trop pâles ou faire des retouches.

Les coupes minces, surtout les sections transversales, présentent l'avantage sur le bois massif, d'une séparation nette et contrastée entre parois et cavités des cellules.

Plusieurs défauts se sont cependant présentés dans les coupes : le bois renferme naturellement des contenus divers qui obstruent certaines cavités et empêchent d'identifier la cellule par la taille de sa cavité. Il faut donc un traitement qui débarrasse la coupe de tous ses contenus ; c'est parfois difficile à obtenir, surtout s'il y a beaucoup de cristaux.

Si la qualité de la préparation n'est pas parfaite, il y a des parois déchirées qui vont entraîner une interprétation aberrante, par l'analyseur, des cavités ainsi réunies.

Enfin, la figure 21 souligne par une mise au point appropriée, l'inconvénient d'une coupe un peu oblique — ou d'un bois contrefilé — où les cavités sont déformées par la superposition des contours apparents décalés des deux faces de la coupe. Celle-ci devra donc être la

plus fine possible. Mais, en contrepartie, on voit aussi sur la même figure, l'inégalité de teinte des parois. Il faut colorer la coupe au maximum pour permettre de seuiliser l'image comme la figure 3, à un niveau de gris qui sépare complètement parois et cavités en noir et blanc.

Les possibilités d'identification des éléments du bois.

C'est là, bien sûr, qu'est le principal problème. Quand on envisage d'analyser successivement de nombreux bois à structures très différentes, ce problème est aggravé par la nécessité d'adapter l'analyse à chaque bois ; mais, même quand on travaille sur un échantillonnage d'une même espèce, il y a des éléments ou des détails de structure difficiles à sélectionner sur l'image.

D'une façon générale, tous les tissus s'identifient par la taille des cavités des cellules constitutives, conjuguée avec l'épaisseur des parois, et la forme de la cavité. La taille est un critère facile pour l'analyseur ; la forme peut en être un si elle est suffisamment caractéristique. Intervient aussi la position relative dans la structure, évidente pour l'observateur, non pour l'analyseur : ainsi, l'œil sépare une cellule dressée de rayon d'une cellule de parenchyme, même si elles sont presque de même proportion.

Nous avons peu exploré l'interprétation des rayons. Les cellules couchées sont plus identifiables

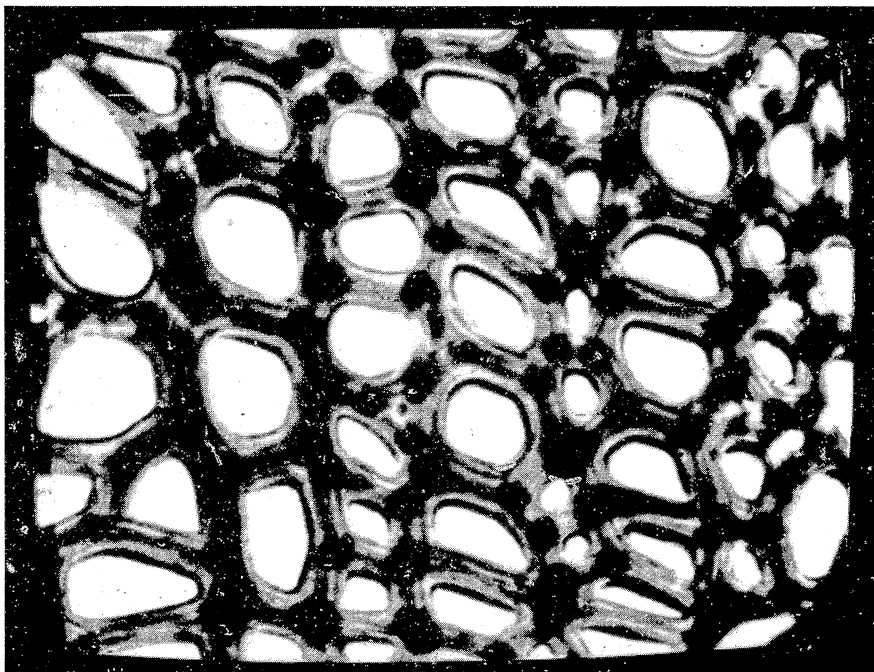


FIG. 21. — Section transversale d'*Aucoumea klaineana* vue sur l'analyseur non seuillée. Coupe légèrement oblique faussant la mesure des cavités $\times 860$.

que les cellules dressées. Nous tournons toujours là, autour du problème des parenchymes.

A l'échelle cellulaire, les mesures des ponctuations semblent également assez difficiles par manque de qualité d'image à fort grossissement. Et pourtant, des données quantitatives sur les communications entre cellules seraient certainement constructives pour les chercheurs tournés vers les problèmes de circulation des liquides. Là, l'analyse de photographies obtenues au microscope électronique à balayage, à moyen grossissement, serait peut-être la meilleure solution.

Intérêt dominant de l'analyseur.

De ce qui précède, il ressort qu'un analyseur de texture ne nous permet pas d'envisager actuellement une sorte de « fiche biométrique » complète,

automatique et précise d'un échantillon de bois, mais peut contribuer à une partie fastidieuse de ce type de travail.

C'est certainement dans des analyses liées à des recherches de différences génétiques ou écologiques, ou à des relations entre structure et propriété du bois, que l'appareil présente l'intérêt le plus considérable.

Son utilisation sur quelques paramètres simples, comme on vient d'en voir un exemple, a permis d'intégrer les données d'un échantillonnage élevé, donc une connaissance approfondie du matériau. Par suite, il est permis d'envisager de nouvelles directions d'études et d'atteindre des résultats jusqu'à maintenant inaccessibles, dans la quantification et la description morphologique de divers types de tissus normaux ou anormaux.

A NOS LECTEURS

Si vous ne possédez pas la collection complète des numéros de notre Revue, publiés de 1947 à 1976 inclus, demandez-nous nos

RÉPERTOIRES DES ARTICLES PARUS DEPUIS 30 ANS DANS LA REVUE

“ BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES ”

nous vous les adresserons gratuitement. Vous pourrez alors choisir puis nous commander les numéros anciens susceptibles de vous intéresser et qui se trouvent encore disponibles