JOAQUIM C. GONÇALEZ
Université de Brasilia

RENÉ KELLER
ENGREF/INRA

PATRICK PERRÉ
ENGREF/INRA

MESURE DE LA DENSITÉ DES BOIS PAR ANALYSE D'IMAGE

Système d'analyse d'image pour mesurer la densité des bois sur coupe microscopique.
Image analysis system for measuring wood density on a microscope slide.

Les auteurs présentent ici une nouvelle technique, l'analyse d'image propre à l'anatomie des bois, qu'ils appliquent ici à quatre essences de la forêt amazonienne.

Avec le développement de l'électronique et de l'informatique, l'analyse d'image devient un outil préférentiel pour étudier l'anatomie du bois. Certainement pour des raisons de simplicité, par comparaison au problème complexe de reconnaissance d'essences, cette technique a surtout été utilisée pour la quantification anatomique du bois (caractérisation de la morphologie du milieu poreux avec application au déterminisme des propriétés).

SMITH (1965) a réalisé une comparaison anatomique par l'interception linéaire des parois cellulaires et de leur lumen en section microscopique et en surface du bois massif. STELL (1976), cité par LAMGHARI (1992), a déterminé le pourcentage et la distribution de quelques éléments anatomiques. Dans le même sens, ILIC et HILLIS (1983) ont utilisé cette méthodologie pour quantifier le pourcentage des fibres de l'eucalyptus, dégager la relation existant entre l'anatomie et le risque de collapse et pour déterminer les relations qui peuvent exister entre la taille des cellules, la surface des parois, etc.

Actuellement les domaines d'application de l'analyseur d'image au matériau bois s'élargissent de plus en plus. Son adaptation à la densitométrie, et plus précisément à la microdensitométrie, a déjà été l'objet de plusieurs travaux. Différentes stratégies sont utilisées :

- analyse d'image appliquée à l'exploitation des films radiographiques,
- utilisation de corrélations densité locale – propriétés optiques,
- mesure de la fraction surfacique de parois cellulaires sur échantillons massifs polis ou coupes anatomiques observées au microscope.

Cette dernière stratégie est celle utilisée dans la présente étude.

L'analyse de films radiographiques fut d'abord employée par FERRAND (1982). Cet auteur a montré clairement que l'analyseur d'image était utilisable pour mesurer les niveaux de gris sur les radiographies obtenues en soumettant les échantillons à un rayonnement X « mou » (POLGE, 1966). La perte de précision dans la mesure des niveaux de gris est compensée par la grande souplesse géométrique de l'analyseur d'image, ce que confirma plus récemment LAMGHARI (1992) qui s'est servi de cette méthode pour les espèces épicéa et noyer et a trouvé des résultats reproductibles et répétitifs, montrant clairement que la méthode d'analyseur d'image est prometteuse. LAMGHARI a conclu que la méthode est intéressante pour plusieurs raisons :

- facilité et rapidité pour réaliser les mesures de la densité,
- souplesse vis-à-vis de la géométrie des limites de cerne,

• possibilité d'étudier la densité non seulement sur des barrettes mais également sur des rondelles.

Cependant, en dépit des progrès apportés, l'analyse d'image ne constitue pas dans ce cas une nouvelle technique de mesure de la densité : il s'agit seulement de mieux exploiter l'information qui existe sur les films radiographiques. Le principe physique de la mesure de densité réside dans la relation entre la densité et l'atténuation du rayonnement X.

En revanche, la technique qui consiste à déterminer la fraction surfacique de parois cellulaires est une technique de mesure à part entière. Connaissant la fraction surfacique du solide, la densité est simplement obtenue en supposant que la fraction surfacique est égale à la fraction volumique et en multipliant cette dernière par la masse volumique de la phase solide.

Cette méthode fut appliquée avec plus ou moins de succès par différents auteurs (SACHSSE, 1984 ; SCHNELL, SELL, 1989 ; PARK, TELEWSKI, 1993). Que les mesures soient effectuées sur coupes ou sur échantillons polis, les résultats ne sont généralement précis que dans le bois final. D'ailleurs le dernier article cité ne traite que du bois final de *Pinus ponderosa*.

Le but de cette étude est donc de mettre à la disposition des utilisateurs un outil supplémentaire pour déterminer la densité moyenne sur coupe microscopique du bois, et de chercher aussi à définir la densité individuelle de ses tissus (rayons ligneux, parenchyme axial....). La méthode utilisée est identique à celle mise au point sur trois essences tempérées : *Picea abies, Fagus silvatica* et *Quercus* (LAHBABI, 1995 ; LAHBABI *et al.*, 1996).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce travail de recherche, développé au laboratoire de Recherches en Sciences Forestières de l'ENGREF à Nancy (France), porte sur quatre essences de la forêt amazonienne :

- Fava Amargosa (*Vataireopsis speciosa* Ducke),
- Jequitiba Rosa (*Cariniana micrantha* Ducke),
- Peroba d'Agua (*Rauwolfia paraensis* Ducke),
- Peroba Mico (*Aspidosperma macrocarpum* Mart).

L'analyse d'image a été utilisée sur coupes anatomiques afin de séparer, de façon automatique, les parois des vides. La densité est ensuite obtenue en multipliant la fraction surfacique de solide par la densité de la matière ligneuse (nous avons utilisé 1 500 kg/m^3). Cependant, il est bon de préciser que cette méthode nécessite un calibrage pour le positionnement, sur l'histogramme, de la frontière entre parois et vides. Le calibrage utilisé ici permet d'obtenir l'infradensité (poids sec rapporté au volume vert). Des mesures de la densité moyenne pour l'espèce et de la densité des éléments anatomiques sont présentées pour les quatre essences étudiées.

ANALYSEUR D'IMAGE

Le système d'analyse d'images (cf. photo p. 31) utilisé pour les mesures comprend :

- Un microscope stéréoscopique (ZEISS), **a1,** sur la photo.
- Une caméra-vidéo monochrome (COHU), **a2,** adaptée au microscope (elle peut être aussi adaptée à un dispositif macroscopique) qui permet de convertir une image optique en un signal électronique. L'objet à analyser est placé sur le microscope à mouvements croisés orientables par l'opérateur.
- Un moniteur, **a3**, permettant de visualiser l'image (image en niveaux de gris), qui sera par la suite mémorisée à l'aide d'un processeur spécialisé (MVPAT Matrox). Ce processeur permet un gain de vitesse très grand. Grâce à ce système, des images numériques peuvent être mémorisées en niveaux de gris. L'image obtenue est divisée en un champ de points images dits pixels, généralement 512 × 512 (ou 256 × 256).
- Un système de mesures formé d'un micro-ordinateur (Personal Computer sous système MS-DOS), **a4**, capable de stocker les données numériques relatives à chaque image.
- Le traitement d'images, **a5**, qui se fait au moyen d'un logiciel écrit en langage C (VISILOG 3.6 de NOESIS). Ce logiciel permet de développer de nouvelles fonctions pour faire des calculs intermédiaires (seuillage automatique) et sert à sauvegarder les résultats d'analyse dans un fichier directement utilisable pour une analyse ultérieure.

COUPES MICROSCOPIQUES

Les coupes microscopiques des quatre essences ont été réalisées à l'ENGREF de Nancy. Nous avons au préalable préparé des cubes orientés selon les trois principaux plans du bois. Avant de confectionner les coupes, les cubes ont été mis à ramollir dans un autoclave.

Les coupes de 12 à 20 µm d'épaisseur sont obtenues par un microtome à glissière et à couteau mobile, le bloc de bois étant fixe. Les coupes ont été clarifiées dans une solution d'hypochlorite de sodium à 50 %, puis déshydratées progressivement à l'alcool. Le milieu de montage et de coloration des coupes sur lame a été, respectivement, le baume du Canada et la safranine.

Pour les mesures des fibres et de la longueur des vaisseaux, nous avons découpé de petits morceaux de bois qui ont été dissociés dans un mélange acide chromique 10 % – acide nitrique 10 % (1 : 1) pendant 72 h. Les lames portant le bois dissocié ont été observées en microscopie optique.

DESCRIPTION SOMMAIRE DU PLAN LIGNEUX DES ESPÈCES

Cette description rapide a pour objet de faire ressortir les caractéristiques anatomiques les plus marquantes chez chacune des essences (cf. planches pp. 34-37).

FAVA AMARGOSA

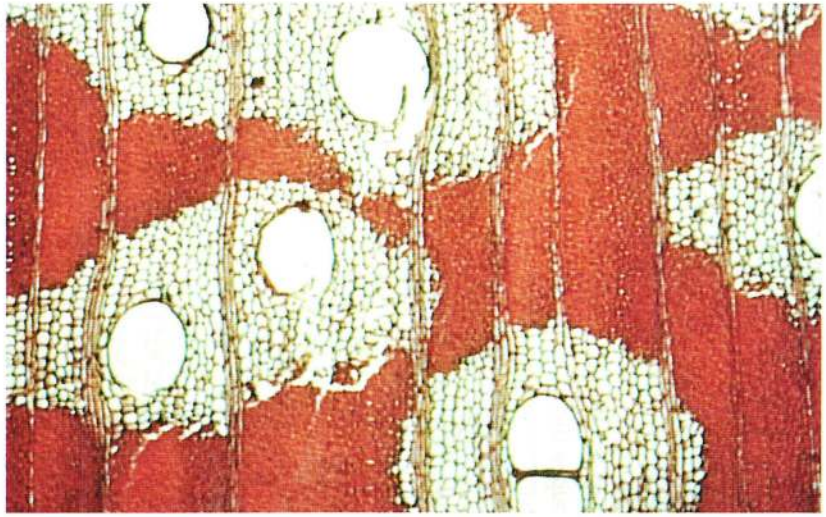
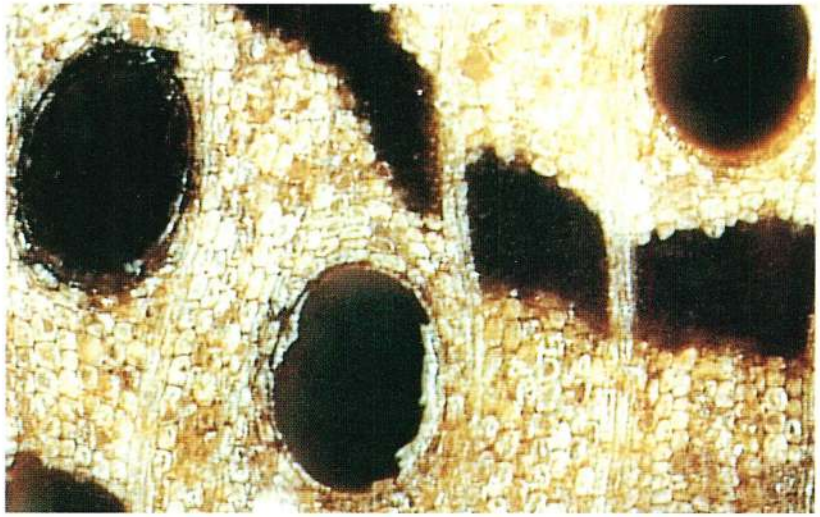


Photo J.-C. MOSNIER

Coupe transversale 25 x



Coupe transversale (bois massif) 50 x

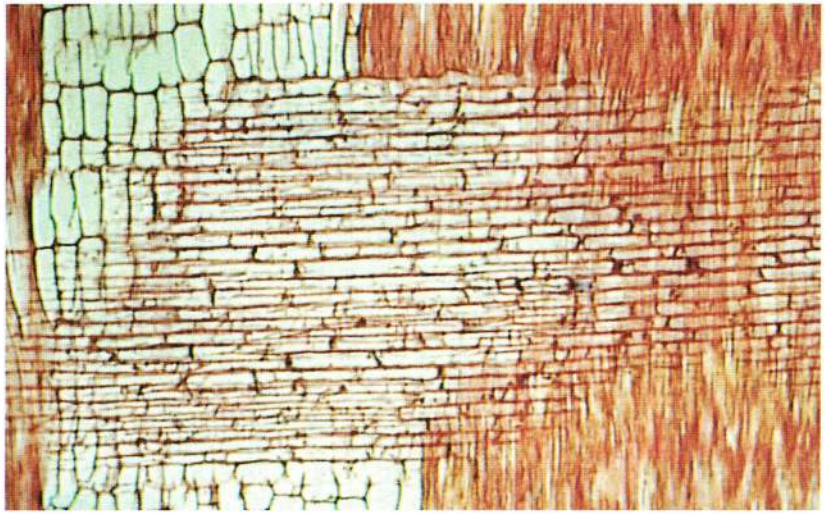
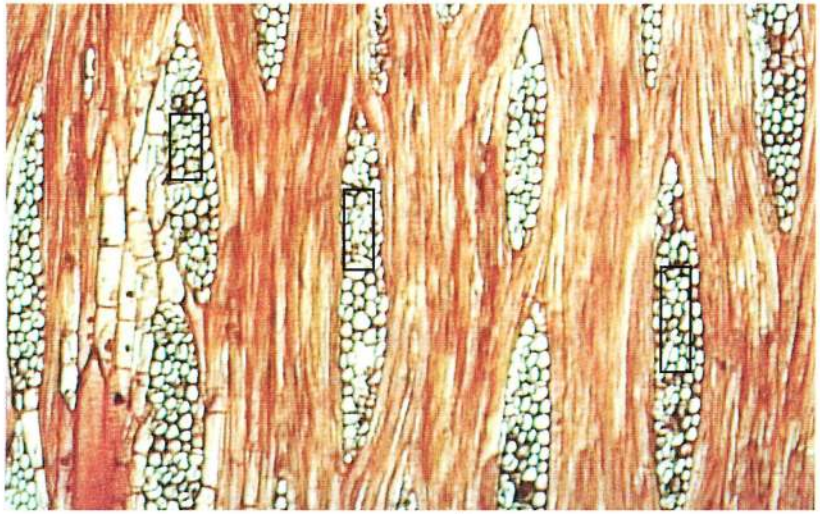


Photo J.-C. MOSNIER

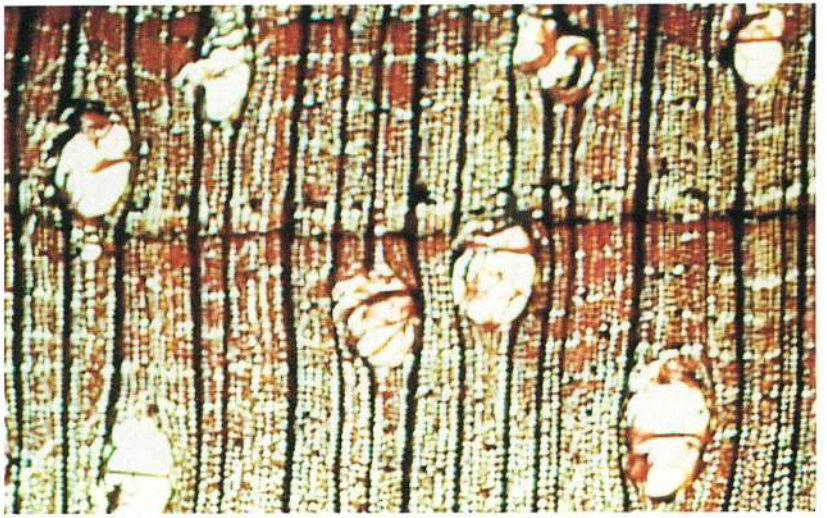
Coupe radiale 50 x



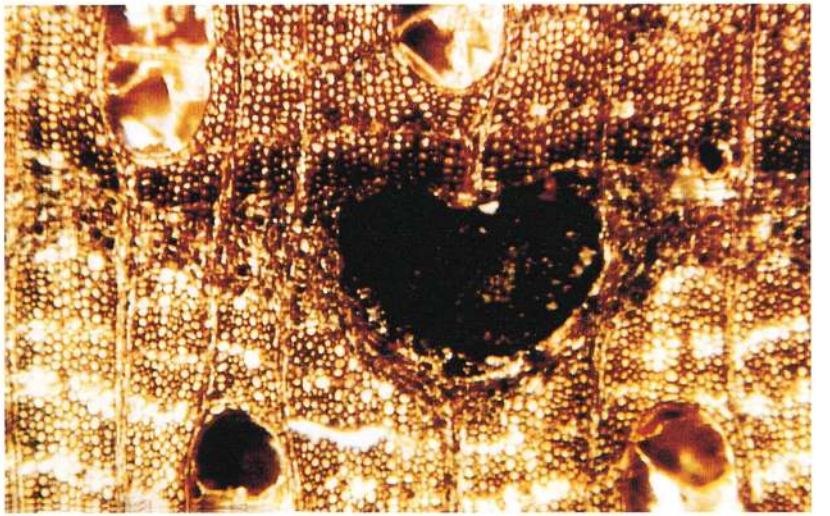
Coupe tangentielle 50 x

Fenêtre d'exploration :
- parenchyme axial (en haut à gauche)
- rayons ligneux (en bas à droite)

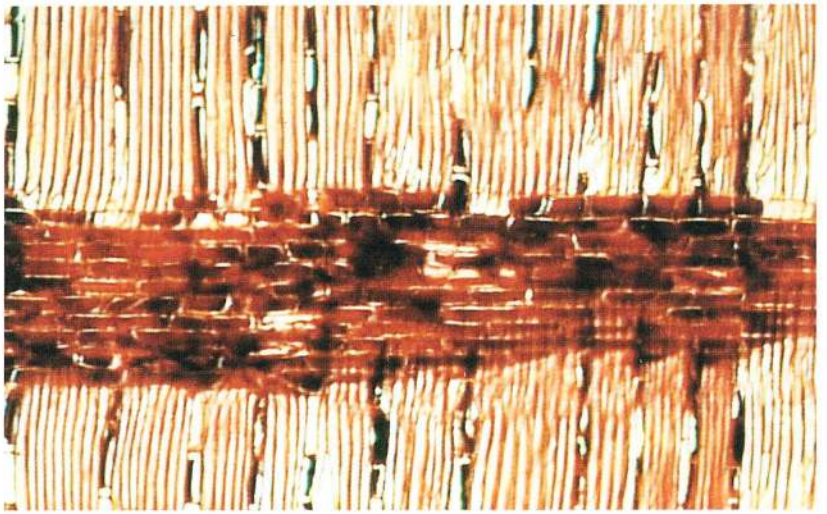
JEQUITIBA ROSA



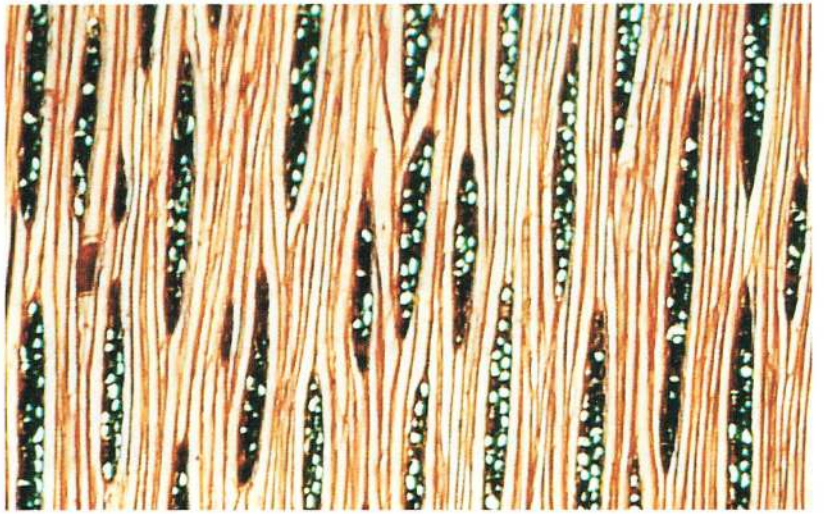
Coupe transversale 25 x



Section transversale (bois massif), canal traumatique 50 x



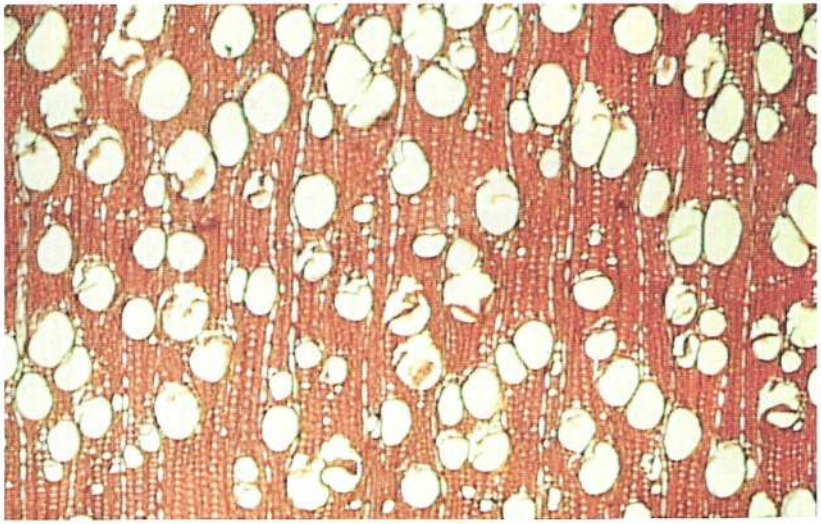
Coupe radiale 50 x



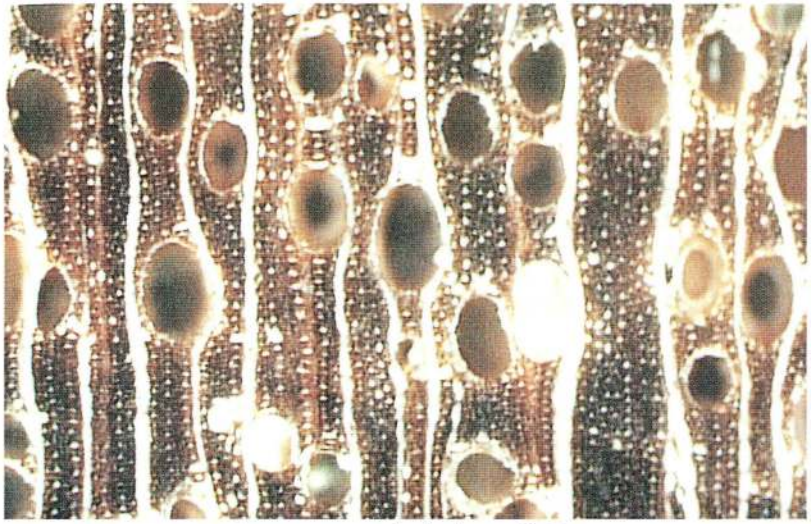
Coupe tangentielle 50 x

Photo J.-C. MOSNIER

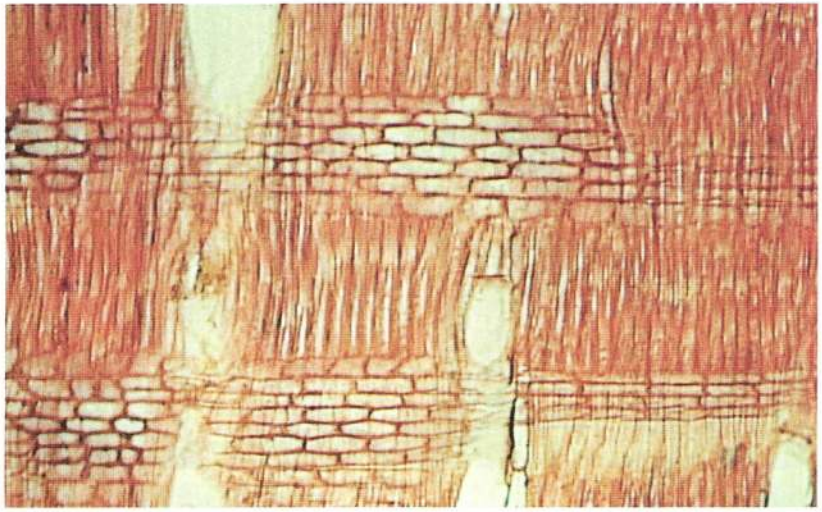
PEROBA MICO



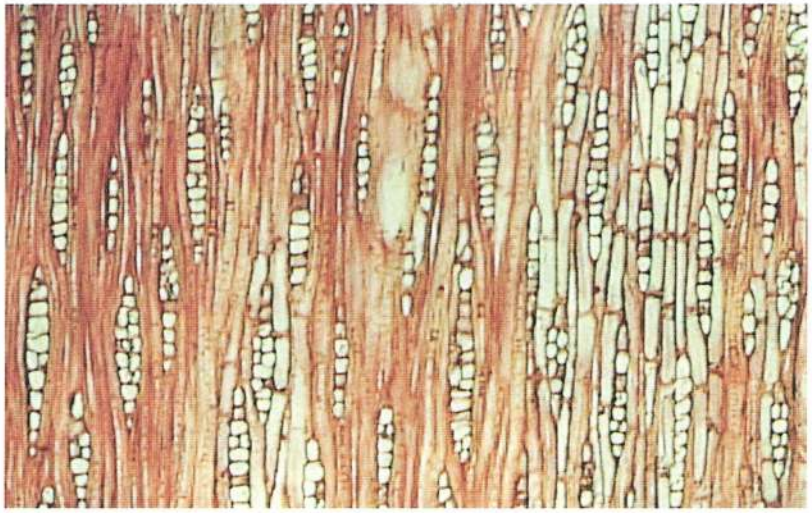
Coupe transversale 25 x



Coupe transversale (bois massif) 50 x



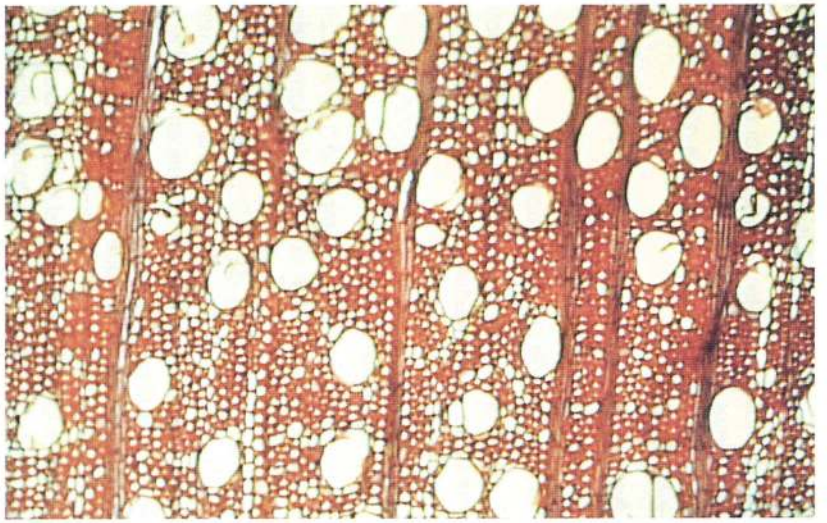
Coupe radiale 50 x



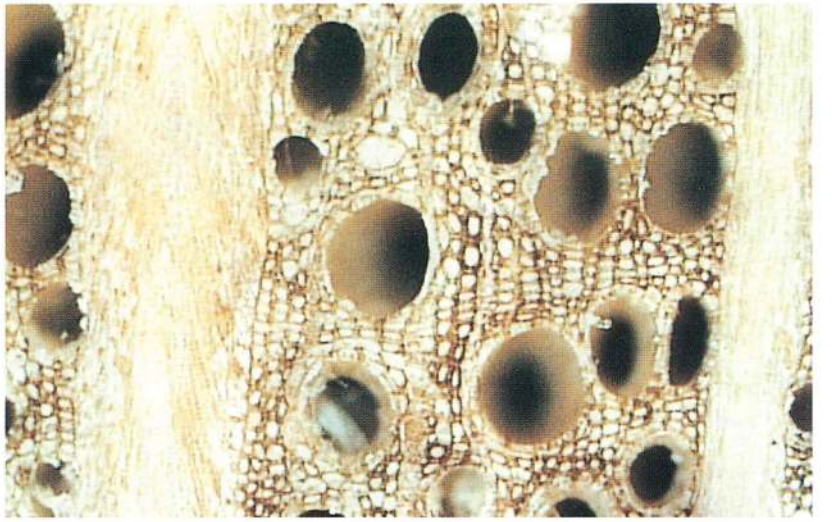
Coupe tangentielle 50 x

Photo J.-C. MOSNIER

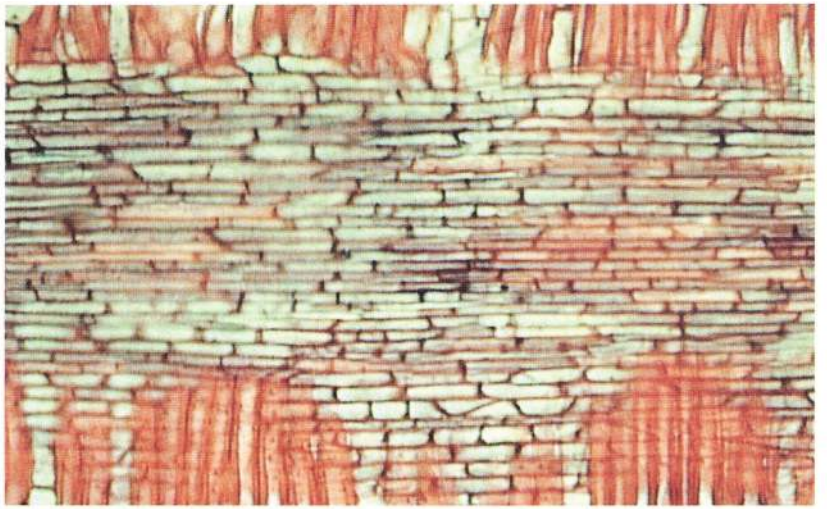
PEROBA D'AGUA



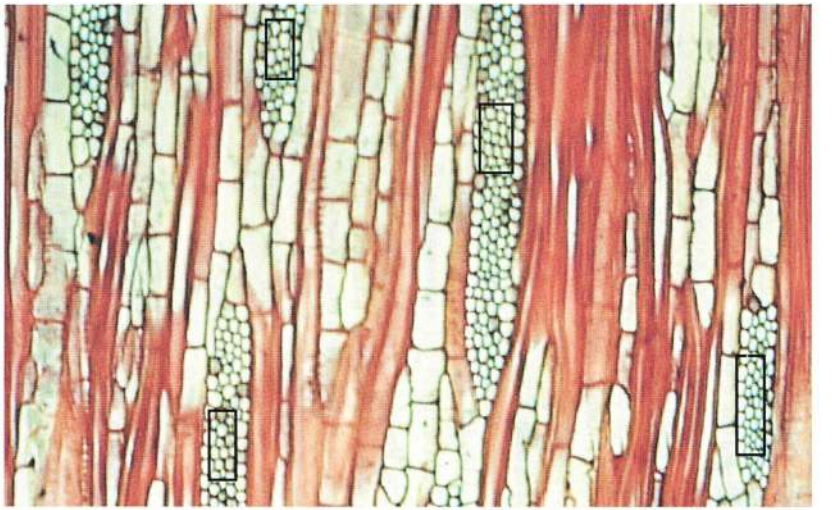
Coupe transversale 25 x



Coupe transversale (bois massif) gros rayon ligneux 50 x



Coupe radiale 50 x



Coupe tangentielle 50 x

Fenêtre d'exploitation des rayons ligneux pour en déterminer la densité.

Photo J.-C. MOSNIER

• Chez **Fava Amargosa** le parenchyme longitudinal est visible à l'œil nu et abondant. Il est paratrachéal, aliforme, confluent et associé en plages losangiques aux pores, parfois anastomosées entre pores voisins.

• L'espèce **Jequitiba Rosa** présente des cernes (pas forcément annuels) distincts, parfois irréguliers et intercalés de bandes foncées ; son bois présente souvent des canaux sécréteurs uniquement traumatiques.

• Chez **Peroba Mico,** les caractéristiques anatomiques les plus marquantes sont les cernes peu distincts et intercalés de bandes foncées irrégulières ; le parenchyme longitudinal ou axial est extrêmement rare.

• L'espèce **Peroba d'Agua** présente une longueur de fibre exceptionnelle pour un feuillu (moyenne d'environ 2 713 µm). La présence de gros rayons ligneux y est aussi une caractéristique importante (appréciés pour l'aspect de surface et pour la résistance mécanique qu'ils lui donnent).

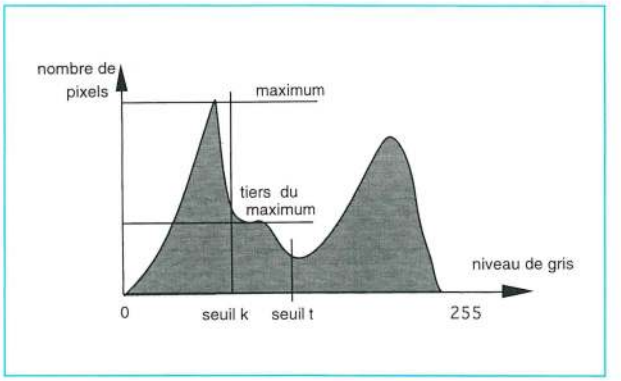


Figure 1 - Détermination du seuil k sur l'histogramme des niveaux de gris.
Calculation of the threshold value k on the histogram of grey levels.

ANALYSE D'IMAGE APPLIQUÉE À LA MESURE DE DENSITÉ

Pour déterminer la densité par l'analyse d'image sur coupe microscopique, nous avons utilisé le programme développé par LAHBABI (1995) pour l'espèce Epicéa (*Picea sp.*). Cette technique est utilisée au Laboratoire de Recherches en Sciences Forestières à l'ENGREF de Nancy. Cette méthode est décrite de façon détaillée dans d'autres publications (LAHBABI, 1995 ; LAHBABI *et al.*, 1996).

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

□ Choix du seuil

Pour mesurer la densité du bois sur coupe microscopique, l'étape primordiale, comme pour la plupart des études utilisant l'analyse d'image, est le choix d'un seuil de l'image qui, ici, permettra de séparer les parois cellulaires des vides. La coupe devra être la plus parfaite possible et son épaisseur la plus fine possible (environ 12 µm). La première étape est le seuillage automatique. LAHBABI a adapté la technique de seuillage automatique proposée par RIDLER et CALVAR, citée par MARDIA et HAINSWORTH (1988), pour le calcul de la valeur du seuil qui permet de séparer les parois par rapport aux vides sur l'histogramme des niveaux de gris. L'algorithme relatif à cette méthode comporte les phases suivantes (cf. fig. 1) :

• Sélection d'une partie de l'image.

• Calcul de l'histogramme des niveaux de gris.

• Calcul du seuil (t) de l'image par la méthode de Ridler et Calvard.

• Séparation de l'image en deux classes C1 et C2 (les parois et les vides) en utilisant la valeur (t) du seuil.

• Calcul du maximum de l'histogramme associé à la classe C1.

• Calcul du niveau de gris k correspondant au tiers du maximum calculé. La nouvelle valeur du seuil est k.

Pour améliorer le contraste vide-paroi de l'image de la coupe, deux filtres (vert et bleu) ont été utilisés. Le problème de l'irrégularité de la lumière a été résolu grâce aux étapes suivantes :

• Acquisition de l'image de la coupe microscopique.

• Acquisition de l'image du filtre.

• Soustraction de ces deux images.

• Traitement de l'image (notamment détermination de la valeur du seuil) effectué sur chaque zone sélectionnée de l'image.

□ Balayage selon la direction radiale

Le champ total de l'image comprend 512 × 512 pixels. Afin d'obtenir l'évolution de la densité dans la direction radiale, l'image est divisée en rectangles de 32 pixels d'extension radiale et de 512 pixels d'extension tangentielle (cf. fig. 2). Sur chaque rectangle, l'histogramme des niveaux de gris est déterminé en vue d'obtenir la valeur du seuil relatif à ce rectangle. Le balayage radial de l'image est automatique (16 rectangles adjacents). La translation dans la direction radiale par largeur d'image le long de la coupe est manuel. Dans notre cas, nous avons fait un balayage sur toute la coupe transver-

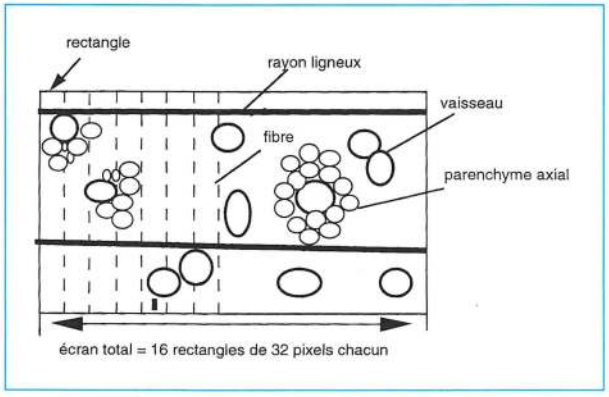


Figure 2 - Schéma d'une coupe microscopique à l'écran.
Diagram of a microscope slide on screen.

sale (équivalent à 7 images de 16 mesures chacune, c'est-à-dire 112 mesures de densité pour chaque espèce). Nous avons fait les mêmes mesures en utilisant deux objectifs : × 2,5 et × 5 (par abus de langage, la dénomination grossissement sera souvent utilisée à la place d'objectif dans la suite du texte).

Pour les éléments anatomiques, parenchyme axial et rayons ligneux, nous avons mesuré la densité respectivement sur des coupes transversale et tangentielle. Dans ce cas, le grossissement utilisé a été de × 20.

Sur chaque rectangle, la densité est calculée à partir de la porosité en attribuant aux parois la densité de la matière ligneuse. Sachant que la méthode nécessite un calibrage, nous avons pris ici la valeur arrondie à 1 500 kg/m^3.

L'ensemble des données est stocké sur disque, puis traité en vue d'établir les profils densitométriques pour chaque espèce. Les coupes microscopiques de nos espèces ne présentant pas d'accroissements annuels, l'intérêt essentiel de cette application à des essences tropicales consiste à déterminer la densité moyenne pour chaque espèce et les éléments individualisés du plan ligneux.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Quelques remarques sur la méthode employée sont nécessaires avant d'exposer les résultats. Bien que le traitement automatique de l'image permette de s'affranchir de l'effet opérateur et du niveau d'éclairement de la coupe, il faut éviter la saturation de la caméra dans les vides cellulaires ou le manque de lumière au niveau des parois épaisses. En effet, ces deux éventualités change la forme de l'histogramme, donc la frontière entre vides et parois. Il est donc important d'utiliser une intensité correcte de la lumière. Nous avons travaillé avec une lumière qui a fourni la plus nette structure du bois, donnant à l'écran une image la plus fidèle possible du plan ligneux de l'espèce. Dans notre cas, l'intensité de la lumière a été réglée entre les graduations 4 et 6, sur les 12 du microscope Zeiss utilisé en fonction de l'espèce et du grossissement. Nous avons vérifié expérimentalement que l'effet « réglage de la lumière » ne provoque pas de différences significatives dans la mesure moyenne de la densité d'une même coupe par des opérateurs différents : ce réglage ne dépassera pas un écart d'une demi-graduation.

Les figures 3 à 6 (objectif × 2,5) montrent les résultats de la densité obtenus par analyse d'image sur coupe microscopique pour les quatre espèces étudiées. Le programme établi pour cette méthodologie exprime les résultats en kg/m^3. Pour les quatre essences, les densités trouvées par la méthode d'analyse d'image sont très voisines des infradensités (densités basales) déterminées par la méthode d'Archimède.

□ La moyenne générale des observations pour l'espèce **Jequitiba Rosa** (fig. 3) est de 568 kg/m^3 (avec la méthode d'Archimède, l'infradensité est de 562 kg/m^3). La borne inférieure de la densité est de 232 kg/m^3 et la borne supérieure, de 913 kg/m^3. La réalisation des mesures a présenté quelques difficultés dans le cas de cette essence : on rappelle que ces mesures ont été réalisées dans le plan transversal du bois. Les coupes microsco-

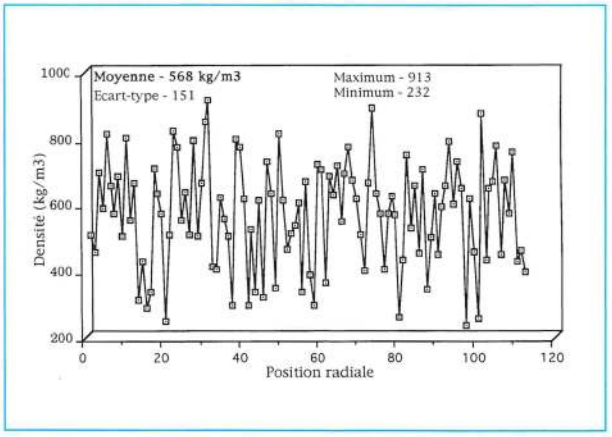


Figure 3 - Densité déterminée sur coupe microscopique par analyse d'image pour l'espèce Jequitiba Rosa (objectif × 2,5).
Density calculated on microscope slide by image analysis for Jequitiba Rosa (lens × 2.5).

piques de cette espèce présentent des bandes foncées provenant de zones d'accroissement. Ces bandes sont prises par le programme de l'analyseur d'image comme des tissus de densité maximale. Nous avons donc choisi des zones pour lesquelles les bandes n'étaient pas présentes.

□ L'espèce **Peroba d'Agua** (cf. fig. 4) a une moyenne générale de 575 kg/m^3 (par la méthode d'Archimède, l'infradensité est de 572 kg/m^3). Les valeurs maximale et minimale trouvées pour cette espèce sont respectivement de 1 026 et 269 kg/m^3. Pour cette espèce nous avons réussi à mesurer la densité des rayons ligneux (coupe radiale, objectif 20 ×, cf. planche p. 37).

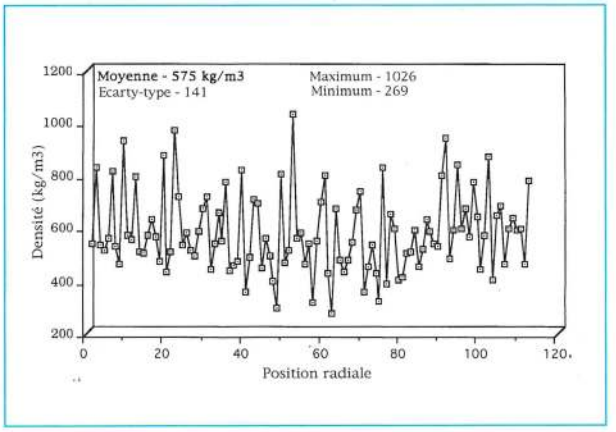


Figure 4. Peroba d'Agua (objectif x 2,5).
Peroba d'Agua (lens × 2.5).

Les rayons ligneux de l'espèce Peroba d'Agua ont une densité moyenne de 492 g/dm^3.

Les rayons de cette espèce sont constitués par des couches de cellules orientées radialement superposées les unes aux autres. Ces cellules se lignifient légèrement et forment une masse de tissu plus condensé dont la densité est plus élevée que, par exemple, la densité du parenchyme axial. Par ailleurs, dans cette espèce coexistent à la fois de petits et de gros rayons.

La figure 5 montre la densité moyenne des rayons ligneux et la densité moyenne pour l'espèce Peroba d'Agua. Compte tenu de la présence des vaisseaux, assimilables à de grands vides, et du parenchyme axial aux parois peu lignifiées, il est très probable que la densité des fibres est la plus élevée parmi les éléments anatomiques. En raison de l'imprécision liée à l'insuffisance de profondeur de champ, nous n'avons pas mesuré la densité individuelle des fibres.

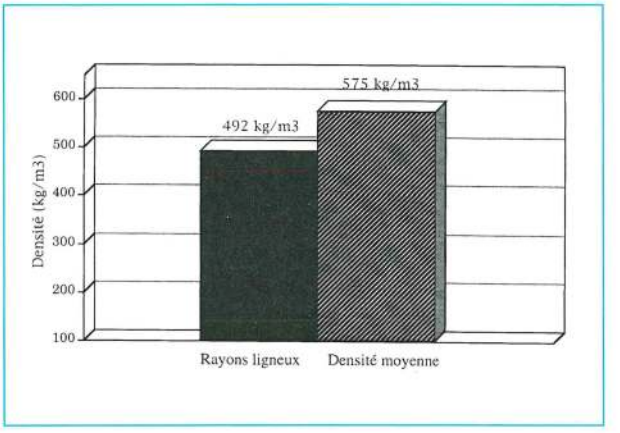


Figure 5 - Densité moyenne déterminée sur coupe microscopique par analyse d'image pour les éléments anatomiques particuliers de l'espèce Peroba d'Agua.
Average density calculated on microscope slide by image analysis for specific anatomical elements of Peroba d'Agua species.

□ L'espèce **Peroba Mico** (cf. fig. 6) présente une densité moyenne de 665 g/dm^3 (par la méthode d'Archimède, l'infradensité est de 661 g/dm^3). La borne inférieure de la densité de cette espèce est de 413 g/dm^3 et la densité supérieure est de 912 g/dm^3. Pour cette espèce, nous n'avons pas réussi à mesurer la densité individuelle des tissus. La fenêtre de travail de l'analyseur d'image s'est révélée trop grande pour obtenir des images ponctuelles satisfaisantes. Il faudrait concevoir un programme de mesures de la densité par des fenêtres de tailles et formes réglables à volonté pour résoudre ce problème.

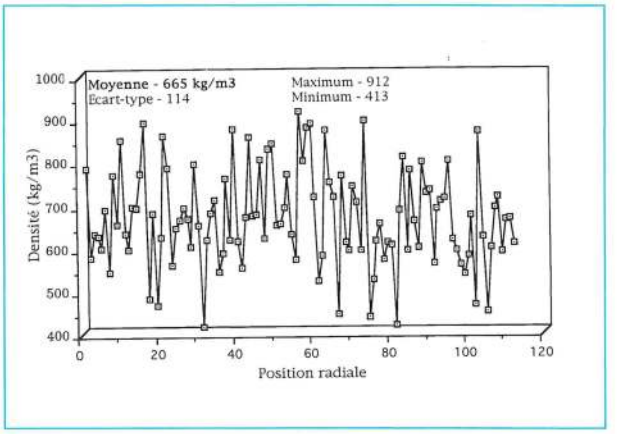


Figure 6 - Peroba Mico (objectif × 2,5).
Peroba Mico (lens × 2.5).

□ L'espèce **Fava Amargosa** (cf. fig. 7) a une densité moyenne de 622 g/dm^3 (par la méthode d'Archimède, l'infradensité est de 627 g/dm^3). Le maximum et le minimum des valeurs de la densité de cette espèce sont respectivement de 1 114 et de 288 g/dm^3. L'abondance du parenchyme axial dans cette essence et la grande taille des rayons ont permis de réaliser des mesures isolées de la densité des ces tissus sur coupes transversales et radiales (cf. planche p. 34). Pour ces deux tissus, nous avons utilisé l'objectif 20 ×.

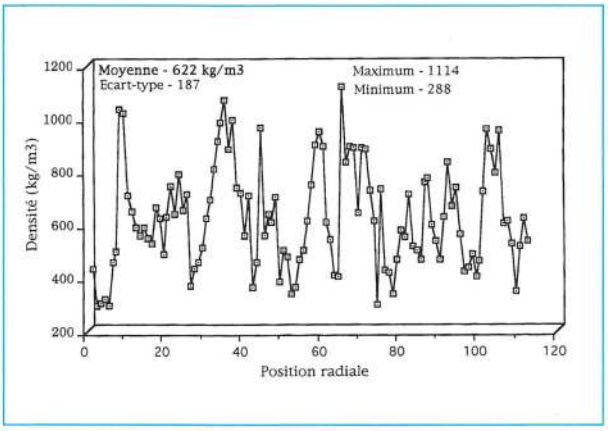


Figure 7 - Fava Amargosa (objectif × 2,5).
Fava Amargosa (lens × 2.5).

Le parenchyme axial a une densité moyenne de 259 g/dm^3. Les cellules de parenchyme axial sont généralement des cellules prismatiques aux parois fines et aux lumens importants, où se trouvent souvent des substances de réserve. La finesse des parois des cellules sont responsables de la faible densité moyenne présentée par cet élément anatomique. Ce tissu est probablement un point de faible résistance mécanique du bois.

La densité moyenne des rayons ligneux est de 433 g/dm^3. Les rayons de cette espèce sont constitués par des couches de cellules superposées de taille relativement uniforme, donnant une masse de tissu plus condensé et par conséquent une densité plus élevée que le parenchyme axial. Les rayons de Peroba d'Agua ont une densité plus élevée que celle des rayons de Fava Amargosa.

La figure 8 permet de comparer les valeurs moyennes de la densité du parenchyme axial et des rayons ligneux à la densité moyenne de l'espèce Fava Amargosa.

Pour cette espèce, nous avons pu mesurer la densité du parenchyme axial. Mais on peut déduire que la densité

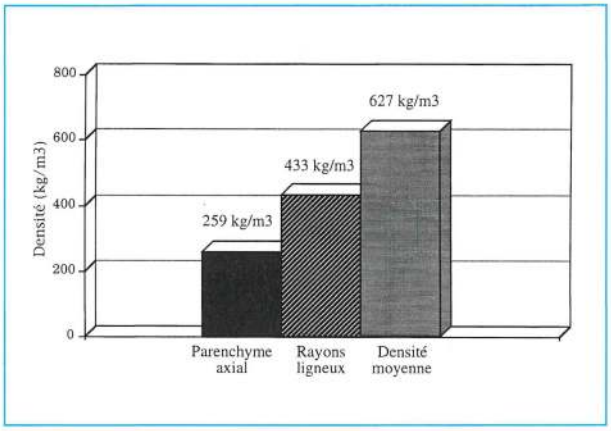


Figure 8 - Densité moyenne déterminée sur coupe microscopique par analyse d'image pour des éléments anatomiques particuliers de l'espèce Fava Amargosa.
Average density calculated on microscope slide by image analysis for specific anatomical elements of Fava Amargosa species.

des fibres est le principal facteur qui relève la densité moyenne de l'espèce. Après les fibres, les rayons ligneux sont les éléments anatomiques de résistance du bois. Le parenchyme axial et les vaisseaux sont les éléments anatomiques de faible résistance du bois. Du point de vue physique, selon KELLER et THIERCELIN (1975), les rayons ont une rétractibilité tangentielle élevée.

Les profils densitométriques présentés par les quatre espèces (cf. fig. 2 à 6) montrent des valeurs de la densité qui fluctuent à l'intérieur de la coupe microscopique. Ces variations sont tout à fait normales, chaque tissu ayant sa densité propre. Comme la méthode détermine la densité en divisant l'image qui apparaît sur l'écran en rectangles, si un rectangle correspond à une zone occupée par des fibres, la densité sera élevée. En revanche, si le rectangle se situe sur une zone de pores ou de parenchyme axial la densité sera faible.

Les mesures effectuées avec un grossissement plus important (5,0 × plutôt que 2,5 ×) ne font pas apparaître de différences significatives sur les valeurs moyennes de la densité pour les quatre espèces (cf.fig. 9 à 12). Ce résultat valide indirectement la méthode pour ces essences. On observe que les écarts-types sont plus élevés pour le grossissement 5,0 ×, car le plus grand grossissement réduit le champ d'observation sur la coupe ; le rectangle d'analyse n'englobera donc qu'un seul type de tissu ; néammoins la densité moyenne est toujours identique pour les deux grossissements. Il semble ainsi que le grossissement le plus petit (2,5 ×) représente mieux le plan ligneux de l'espèce, car il est presque sûr

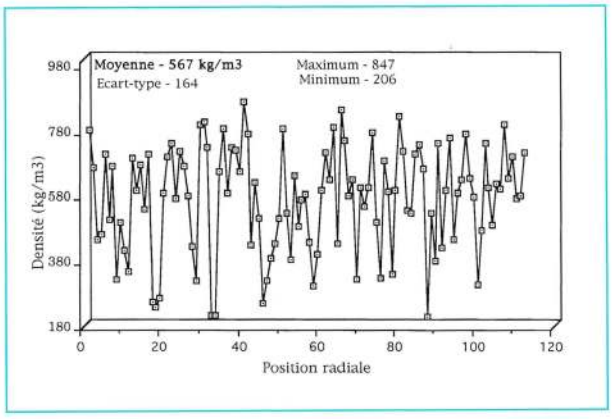


Figure 9 - Jequitiba Rosa (objectif × 5).
Jequitiba Rosa (lens × 5).

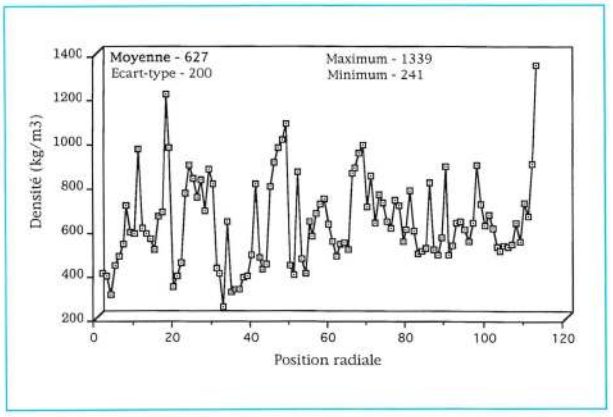


Figure 12 - Fava Amargosa (objectif × 5).
Fava Amargosa (lens × 5).

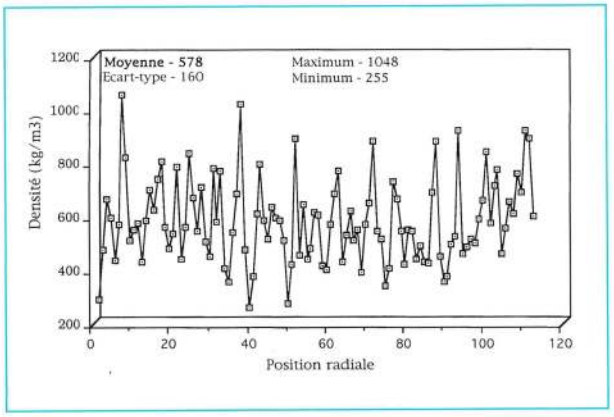


Figure 10 - Peroba d'Agua (objectif × 5).
Peroba d'Agua (lens × 5).

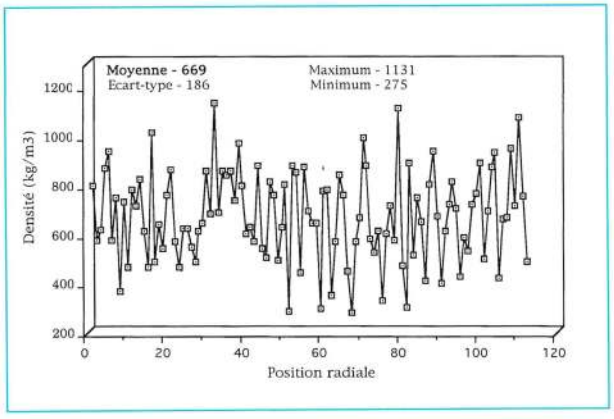


Figure 11 - Peroba Mico (objectif × 5).
Peroba Mico (lens × 5).

que l'image de l'écran englobera tous les types de tissus et les écarts entre les valeurs de la densité seront plus faibles.

CONCLUSION

La densité moyenne déterminée sur coupe microscopique de quatre espèces au plan ligneux très différent est très proche de l'infradensité (densité basale). Néammoins il paraît nécessaire d'explorer encore d'autres espèces, vu la très grande variabilité du plan ligneux des espèces tropicales, pour valider cette méthode qui s'avère facile, rapide et précise.

Parmi les tissus dont nous avons pu mesurer la densité, on peut constater indirectement que les fibres sont les éléments les plus denses du bois, suivies par les rayons ligneux, puis par le parenchyme axial. Donc la résistance mécanique du bois du point de vue anatomique est assurée surtout par les fibres et par les rayons ligneux.

Avec quelques modifications du programme de l'analyseur d'image, qui permettraient de travailler avec des fenêtres de n'importe quelles taille et forme, il serait possible de mesurer la densité des éléments anatomiques de toutes les espèces. Il faudrait aussi disposer d'un microscope au pouvoir de résolution plus important (peut-être un microscopie électronique) dans le cas des fibres, mais aussi confectionner des coupes microscopiques transversales, dont la direction du fil du bois sera aussi perpendiculaire que possible au plan de référence radial-tangentiel.

De plus, la mesure de la densité par cette méthode nécessite des précautions relativement simples, mais dont

dépendent toutes les mesures. Les principales sont : coupe microscopique bien faite pour assurer une bonne mise au point de l'image à analyser, élairage bien réglé et grossissement dont le plus faible (2,5 ×) paraît être le meilleur pour les coupes transversales (les différents tissus sont analysés ensemble et les écarts entre les valeurs de densité sont plus faibles, c'est-à-dire les résultats sont plus homogènes).

Cependant, il faut aussi noter les limites de ce procédé : la densité calculée à partir d'un seul grossissement ne peut pas représenter précisément chaque élément du plan ligneux. Un grossissement plus faible est bien adapté aux vaisseaux. De plus, il permet de bien englober la variabilité du plan ligneux.

Il a été noté qu'avec le grossissement utilisé, la densité moyenne calculée était trés proche de la densité mesurée par pousée d'Archimède. En observant précisément l'image seuillée, il est possible de constater que ce bon résultat est lié à un effet de compensation (la densité des fibres est surestimée, la densité des parenchymes est sous-estimée). Une autre approche envisageable serait de déterminer pour tout grossissement la densité de chaque élément du plan ligneux. La densité moyenne serait ensuite obtenue en quantifiant, à grossissement plus faible, la proportion de chacun de ces éléments. Une faille existe encore avant de mener à bien cette démarche : accéder de façon précise à la densité des fibres. Ces recherches sont en cours sur ce sujet.

La méthode paraît très prometteuse, même s'il reste encore quelques problèmes à résoudre, et s'avère être un outil appréciable pour déterminer la densité du bois. □

▶ Joaquim C. GONÇALEZ
Université de Brasilia
Génie forestier
Caixa Postal 04357
70919-900 BRASILIA DF
Brésil

▶ René KELLER
Patrick PERRE
ENGREF
14, rue Girardet
54042 NANCY CECEX
France

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FERRAND J. Ch., 1982.
Réflexions sur la densité du bois, 3e partie : Mesures sur les radiographies à l'aide d'un analyseur d'images. Holzforchung, 36(2), p. 191-196.

GOUGEON G., CHERMAN J. L., COSTER M., 1989.
Précis d'analyse d'images. Mém. Scient. Rev. Mét., p. 86-99.

ILIC J., HILLIS W. E., 1983.
Video image processor for wood anatomical quantification. Holzforschung 37, p. 47-50.

KELLER R., THIERCELIN F., 1975.
Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de hêtre. Ann. Scien. Forest., 32(2), p. 113-129.

LAHBABI R., 1995.
Mesure par analyse d'image de paramètres microscopiques requis pour une prédiction déterministe des propriétés du bois. Thèse de l'ENGREF, Nancy, 141 p.

LAMGHARI R., 1992.
Utilisation de l'analyseur d'images en tant que microdensitomètre. D.E.A. Sciences du bois, ENGREF, Nancy, 47 p. + annexes.

MARDIA K. V., HAINSWORTH T. J., 1988.
A spatial thresholding method for image segmentation. I.E.E.E. Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 10 (6), p. 919-927.

PARK W. K., TELEWSKI F. W., 1993.
Measuring maximum latewood density by image analysis at the cellular level. Wood and Fiber Sci. 25(4), p. 326-332.

SACHSSE H., 1984.
Zur Dichtebestimmung von Hölzern mittels mikroskopischer Linearanalyse. Holz als Roh-und Werkstoff, vol. 42, p. 121-129.

SCHNELL G. R., SELL J., 1989.
Bildanalytische Messung des Zellwandanteils bzw. der Dichte von Holz-Präparationsmethode, Messtechnik. Holz als Roh und Werkstoff, 47, p. 351-354.

SMITH D. M., 1965.
Effect of growth zone on specific gravity and percentage of summer wood in wide ringed douglas fir. Forest products laboratory, forest service. U.S. Departement of agriculture, report 2057.

RÉSUMÉ

MESURE DE LA DENSITÉ DES BOIS SUR COUPE MICROSCOPIQUE PAR ANALYSE D'IMAGE
Application à quelques essences de la forêt amazonienne

La technique de l'analyse d'image a été utilisée ici pour déterminer la densité moyenne de l'espèce et la densité de quelques éléments anatomiques, sur coupe microscopique transversale, pour quatre essences de bois tropicaux : Fava Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jequitiba Rosa (*Cariniana micrantha*), Peroba d'Agua (*Rauwolfia paraensis*) et Peroba Mico (*Aspidosperma macrocarpum*). Le principe de mesure consiste à séparer les parois des vides sur l'image discrétisée.

La densité moyenne déterminée sur coupe microscopique, dans notre cas, est très proche de la mesure de contrôle (infradensité — densité basale — mesurée par poussée d'Archimède). Parmi les tissus que nous avons réussi à mesurer individuellement, les fibres sont les éléments les plus denses du bois, suivies par les rayons ligneux puis par le parenchyme axial.

La technique paraît très prometteuse, même s'il reste encore quelques problèmes à résoudre. Elle s'avère être un outil appréciable pour la détermination de la densité du bois.

Mots-clés : Bois tropicaux. Densité. Photo-interprétation. Amazonie.

ABSTRACT

MEASUREMENT OF WOOD DENSITY ON MICROSCOPE SLIDE BY IMAGE ANALYSIS
Application for certain species in the Amazon forest

The image analysis technique was used to determine the average density of four tropical wood species and some anatomical elements in microscope slides (cross-sectional). The species were : Fava Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jequitiba Rosa (*Cariniana micrantha*), Peroba d'Agua (*Rauwolfia paraensis*) and Peroba Mico (*Aspidosperma macrocarpum*). The method consists in using an image analysis system to differenciate the voids and the cell walls on microscopic cross sections of wood.

The average density determined in microscope slides, in our case, was approximatetly equal to the basic density (Archimedes method). Among the anatomical elements it was observed that the fibres are the densest elements followed by the rays and the axial parenchyma.

This technique appears to be helpful although there are still some problems to be solved. It is a useful tool for determining wood density.

Key words : Tropical wood. Density. Photointerpretation. Amazonia.

RESUMEN

MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS MADERAS MEDIANTE SECCIÓN MICROSCÓPICA POR ANÁLISIS DE IMAGEN
Aplicación a algunas especies de la selva amazónica

La técnica del análisis de imagen se ha utilizado en este caso para determinar la densidad de promedio de la especie y, asimismo, la densidad de algunos elementos anatómicos, por medio de secciones microscópicas transversales, y ello para cuatro especies de maderas tropicales : Fava Amargosa *(Vataireopsis speciosa)*, Jequitiba Rosa *(Cariniana micrantha)*, Peroba de Agua *(Rauwolfia paraensis)* y Peroba Mico *(Aspidosperma macrocarpum)*. El principio de la medición consiste en separar las paredes de los huecos en la imagen discretizada.

La densidad de promedio determinada mediante sección microscópica, es, en el caso que nos ocupa, semejante de la medición de control (infradensidad - densidad basal - medición por empuje de Arquimedes). Entre los tejidos que hemos logrado medir individualmente, las fibras constituyen los elementos más densos de la madera, seguidos por los radios leñosos y, acto seguido, por la parénquima axial.

La técnica aplicada parece perfectamente prometedora, incluso si aùn existen algunos problemas que será preciso resolver. Esta técnica demuestra ser un método apreciable para la determinación de la densidad de la madera.

Palabras clave : Maderas tropicales. Densidad. Fotointerpretación. Amazonia.

SYNOPSIS

MEASUREMENT OF WOOD DENSITY ON MICROSCOPE SLIDE BY IMAGE ANALYSIS

JOAQUIM C. GONÇALEZ, RENÉ KELLER, PATRICK PERRÉ

In this paper, the image analysis technique is used to determine the density of four tropical species : Fava Amargosa *(Vataireopsis speciosa)*, Jequitiba Rosa *(Cariniana micrantha)*, Peroba d'Agua *(Rauwolfia paraensis)* et Peroba Mico *(Aspidosperma macrocarpum)*.

The method consists in using an image analysis system to differenciate the voids and the cell walls on microscopic cross sections of wood. This allows the apparent porosity (solid volume over total volume) of the species to be determined. Then, the density is simply calculated as the porosity times the density of the wood matter (in the present work, we use 1 500 kg/m^3).

The image analysis system comprises an optical miscroscope, a camera, a digitalizer, a personal computer and software able to deal with image computation (see first picture).

In order to obtain an accurate method, each stage of the procedure must be carefully treated :

- The cross sections must be of high quality : between 12 and 20 µm thick, with a uniform thickness.
- The contrast is enhanced thanks to the use of colored sections (using safranin) with a filter of complementary color.
- An automatic determination of the threshold value is based on the shape of the grey level histogram (Fig. 1).

In order to measure the radial variation of the density, the whole procedure is applied on small rectangles (full extension in the tangential direction and small extension in the radial one : Figure 2). To avoid problems due to the spacial variation of the light, the threshold value is determined on each rectangle.

All these features allow the density determined by image analysis to be very close to the values measured by the classic gravimetric method.

The results proposed for the four species depict the radial variation of the density as determined on cross sections (see Figures 3, 4, 6 and 7). From these curves, the average density as well as the radial variations can be determined. These results must be analysed in relation with the anatomical pattern of each species (different anatomical views of the four species are available in the paper).

In addition, we must bear in mind that the proposed method allows the local value of the density to be determined. As examples of this possibility, the average density of specific elements of the anatomical pattern have been measured : ray cells for Peroba d'Agua, ray cells and parenchyma for Fava Amargosa (Fig. 5 and 8).

Finally, some elements concerning the effect of the magnification are proposed (Fig. 9 to 12). The conclusion is that high magnification is well adapted to refined details of the anatomical patterns as fibers, whereas small magnifications focus the measurement on the average value of the density.

In conclusion, the method of density measurement on microscopic cross-section proved to be efficient. One of its best features is to allow local measurements in connection with the anatomical features. This method is a promising tool in the field of research which aims to relate the properties of wood to its anatomical structure. Works on mass diffusivity, shrinkage and mechanical properties are in progress in the Forest Products Unit (ENGREF).