

Article original

**Analyse microdensitométrique appliquée au bois :  
méthode de traitement des données  
utilisée à l'Inra-ERQB (programme Cerd)**

Frédéric Mothe<sup>a\*</sup>, Gilles Duchanois<sup>b</sup>,  
Bruno Zannier<sup>a</sup>, Jean-Michel Leban<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Équipe de recherches sur la qualité des bois, Inra, 54280 Champenoux, France

<sup>b</sup>École nationale supérieure des technologies et industries du bois,  
22, rue du Merle-blanc, 88000 Épinal, France

(Reçu le 5 août 1996 ; révisé le 10 décembre 1996 ; accepté le 27 août 1997)

**Abstract – Microdensitometric analysis of wood samples: data computation method used at Inra-ERQB (CERD program).** The procedure used at Inra for computing data derived from the microdensitometric analysis of a wood sample is described and discussed. The initial data are in the form of one or several radial density profiles. The first step of the treatment, which is the most time consuming and the only one requiring manual intervention, consists in locating the annual ring limits on each profile of each ring. The intermediate data – which can be corrected using an independent measurement of density (ratio weight/volume of the whole sample) – are then computed for each ring profile. Finally, each ring is described by several 'synthetic' values: the ring width, the mean density, the minimal and maximal density, the earlywood and latewood widths and ratios, and a set of density values (named 'quantiles') describing the shape of the ring profile. (© Inra/Elsevier, Paris.)

**wood / methods / X-ray densitometry / ring width / wood density**

**Résumé –** Le traitement des données obtenues par l'analyse microdensitométrique d'éprouvettes en bois tel qu'il est pratiqué à l'Inra est détaillé et discuté. Les données initiales se présentent sous la forme d'un ou plusieurs profils de densité radiaux. La première étape du traitement, la plus longue et la seule à nécessiter une intervention manuelle, consiste à indiquer la position des limites de chaque cerne sur chaque profil. Des données intermédiaires – éventuellement corrigées par une mesure indépendante de densité de contrôle (rapport poids / volume de l'éprouvette) – sont ensuite calculées sur chaque profil de cerne pour servir de base à la suite du traitement. Chaque cerne est finalement décrit par des variables « synthétiques » : sa largeur, les densités moyenne, minimale et maximale, les largeurs, proportions et densités des bois initial et final ainsi qu'une

---

\* Correspondance et tirés à part  
Courriel : mothe@nancy.inra.fr

série de densités moyennes de fraction de cernes (appelées « quantiles ») permettant de reconstituer le profil simplifié du cerne. (© Inra/Elsevier, Paris.)

## **bois / méthodes / analyse microdensitométrique / largeur de cerne / densité du bois**

### **1. INTRODUCTION**

La radiographie d'une éprouvette d'épaisseur uniforme permet de visualiser les variations locales de densité. L'analyse microdensitométrique permet ensuite de quantifier les variations de noircissement sous forme de profils de densité. Cette technique, avec des variantes concernant le rayonnement (X ou bêta) et la technique de numérisation (numérisation directe, microdensitométrie ou analyse d'image) est appliquée au matériau bois depuis les travaux de Cameron et al [2] et Polge [12], aussi bien en dendrochronologie ou dendroclimatologie que pour évaluer l'aptitude du bois à la mise en œuvre.

Les données se présentent usuellement sous la forme d'un profil radial de densité obtenu par l'irradiation dans la direction axiale ou tangentielle d'éprouvettes de fine épaisseur. Ce profil est ensuite divisé de façon à isoler chaque accroissement annuel que l'on essaie de caractériser par un certain nombre de critères synthétiques et conventionnels, tels que la moyenne, le minimum et le maximum de densité.

Pour qu'un profil radial soit représentatif du cerne dans l'arbre (ou dans l'éprouvette), il faut admettre que la densité varie peu dans les directions longitudinale et tangentielle. Comme la variabilité tangentielle est loin d'être négligeable pour certaines essences, telles que le chêne, l'acquisition et le traitement de plusieurs profils radiaux parallèles est parfois indispensable. La collecte de données sur plusieurs rayons permet également d'obtenir des informations sur la forme des limites de cernes, notamment leur angle d'inclinaison par rapport à la nor-

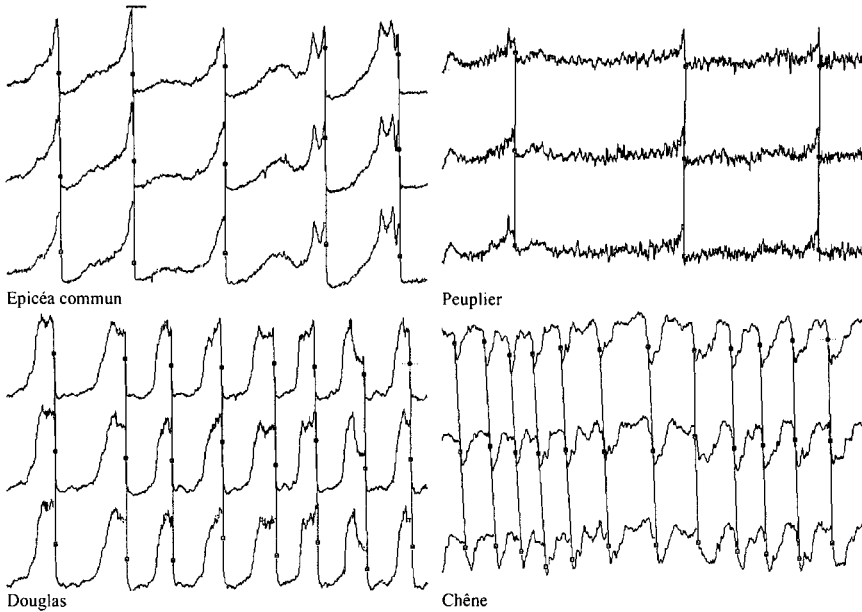
male à l'axe radial. Une cartographie complète de la densité (ce qui équivaut à un grand nombre de profils parallèles) peut être réalisée avec des microdensitomètres récents ou d'autres procédés de numérisation d'image.

Quel que soit le nombre de profils radiaux enregistrés, une remise en forme des données est nécessaire, d'une part pour réduire la quantité d'information à traiter, mais surtout pour homogénéiser le format des données. En effet, chaque cerne est représenté dans chaque profil par un nombre de mesures variable selon l'écartement entre les limites du cerne. Il n'est pas évident, par exemple, de calculer le profil de cerne moyen sur des données aussi hétérogènes.

Nous décrivons ici la démarche qui a été adoptée par l'Équipe de recherches sur la qualité des bois de l'Inra pour traiter ce type de données, depuis la délimitation des cernes sur chaque profil, le « prétraitement » destiné à homogénéiser les profils de cerne, jusqu'au calcul des variables synthétisant les informations recueillies sur chaque cerne annuel.

### **2. DÉLIMITATION DES CERNES**

La première étape du traitement de données microdensitométriques consiste à déterminer la position radiale des limites de cernes annuels sur chacun des profils. Dans les cas les plus simples (bois résineux dépourvu de faux cernes ou de cernes manquants), cette opération peut être réalisée automatiquement en quelques secondes. Elle devient l'étape la plus longue et la plus fastidieuse de la chaîne de



**Figure 1.** Visualisation des profils microdensitométriques et localisation des limites de cernes avec le programme Cerd. Pour chaque essence, les trois profils représentent 3 cm dans la direction radiale  $\times$  1,5 mm dans la direction tangentielle. La fenêtre de mesure est de 24  $\mu$ m radial  $\times$  500  $\mu$ m tangential. Les éprouvettes ont une épaisseur longitudinale de 2 mm. L'échelle de l'axe des ordonnées varie suivant les essences. L'axe des abscisses est orienté de la moelle (à gauche) vers l'écorce (à droite).

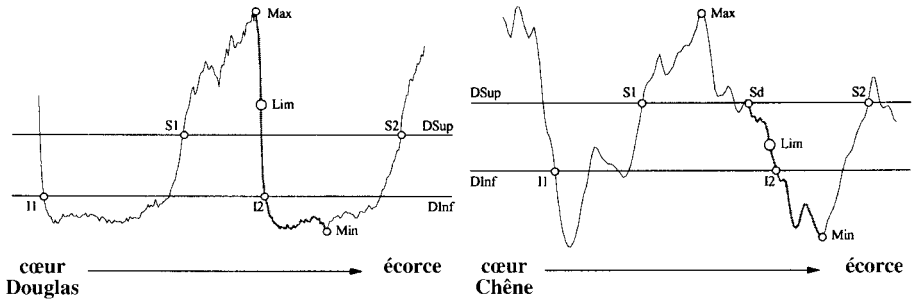
mesure lorsque les limites de cernes sont peu marquées ou que la forme des profils est trop changeante pour que la procédure automatique donne des résultats fiables. L'opérateur doit alors s'aider de la radiographie ou observer l'éprouvette pour valider ou rectifier manuellement, cerne après cerne, le choix proposé par la procédure automatique (figure 1).

Pour détecter les limites de cernes, la procédure automatique se base sur les points d'intersection des profils avec deux seuils de densité (DSup et DInf). Selon la

notation présentée par la figure 2, la séquence I1, S1, I2, S2 indique la présence d'une limite sur la pente descendante Max - Min. Celle-ci est normalement placée à l'endroit où la pente est la plus forte entre Max et Min pour les conifères, Sd et I2 pour le chêne <sup>1</sup>.

Plutôt que de fixer les seuils DSup et DInf à des valeurs constantes qu'il faudrait fréquemment réajuster, nous avons choisi de les adapter aux caractéristiques locales du profil :

<sup>1</sup> Le chêne réclame un traitement particulier car le maximum de densité apparaît souvent au début de la zone de bois final en raison de la forme triangulaire des plages de fibres denses. Pour éviter que la limite ne soit placée trop en amont de la courbe, il est nécessaire d'éliminer la partie haute du versant décroissant de densité (figure 2).



**Figure 2.** Détection automatique des limites de cerne avec le programme Cerd. Max est le point de densité maximale entre S1 et I2, Min le point de densité minimale entre I2 et S2. La limite est placée au point Lim au niveau duquel la pente est maximale entre Max et Min pour le douglas, entre Sd et Min pour le chêne.

$$D_{\text{Inf}} = p_{\text{Min}} \cdot D_{\text{Min}} + (1 - p_{\text{Min}}) D_{\text{Moy}}$$

$$D_{\text{Sup}} = p_{\text{Max}} \cdot D_{\text{Max}} + (1 - p_{\text{Max}}) D_{\text{Moy}}$$

où **pMin** et **pMax** sont deux paramètres, normalement compris entre 0 et 1, qui définissent la « sévérité » de la détection. Leur valeur doit être d'autant plus forte que la densité est susceptible de fluctuer, respectivement dans le bois initial et le bois final,  $D_{\text{Moy}}$ ,  $D_{\text{Min}}$  et  $D_{\text{Max}}$  sont les moyennes et extrêmes de densité mesurés localement sur une fenêtre dont la longueur – de l'ordre de quelques largeurs de cernes – est fixée par le paramètre **LFen**.

Dans un bois peu hétérogène comme le peuplier ou le hêtre, il peut être néces-

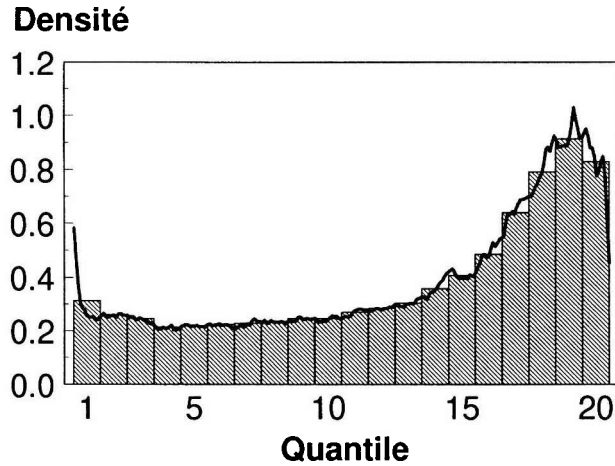
saire de lisser la courbe (par moyennes flottantes) avant de lancer la procédure pour faciliter la détection des limites de cernes.

Les paramètres  $p_{\text{Min}}$ ,  $p_{\text{Max}}$  et  $LFen$  doivent être ajustés à chaque jeu de données pour que la détection automatique des limites fonctionne efficacement. L'algorithme est cependant suffisamment « robuste » pour que des valeurs approximatives conviennent dans la plupart des cas (*tableau I*).

Le principal défaut de cette méthode, qui explique son manque d'efficacité pour les bois à forte hétérogénéité tangentielle comme le chêne, est de considérer chaque profil isolément sans tenir compte des

**Tableau I.** Valeurs courantes des paramètres utilisés dans la procédure de détection des limites de cerne et efficacité de la procédure automatique pour quelques essences.

Essence	pMin (%)	pMax (%)	LFen (mm)	Lissage	Efficacité
Douglas, épicéa, sapin	30	50	10	non	bonne
Pin sylvestre, pin maritime	30	50	5	non	moyenne
Mélèze	5	50	5	non	bonne
Chêne	20	20	5	non	médiocre
Hêtre	5	20	5	oui	moyenne
Peuplier	20	50	5	oui	médiocre



**Figure 3.** Profil densitométrique d'un cerne de douglas et profil reconstitué sous forme de 20 quantiles ( $Q = 20$ ).

informations disponibles sur les profils voisins. Un perfectionnement de la procédure avec des techniques inspirées de l'analyse d'image est maintenant envisagé.

### 3. CALCUL DES DONNÉES DE BASE SUR CHAQUE PROFIL DE CERNE

Lorsque les limites de cernes ont été localisées sur chaque profil, il devient possible de ramener le volumineux fichier des données brutes à quelques séries de variables descriptives des cernes chronologiquement ordonnées. Un premier jeu de données de base concerne chaque cerne de chaque profil ; dans un deuxième temps, des variables dites « synthétiques » sont calculées pour décrire l'ensemble des données recueillies sur un cerne. Ces données synthétiques, qui permettent de reconstituer de façon simplifiée les pro-

files d'origine, sont les seules finalement conservées et exploitées dans la plupart des études.

Les données suivantes sont calculées sur chaque profil 'p' de chaque cerne 'a' :

$DMoy_{ap}$  : la densité moyenne des 'M' mesures comprises entre les deux limites encadrant le cerne (limites 'a' incluse et 'a+1' exclue).

$Lgc_{ap}$  : la largeur du cerne, obtenue simplement par le produit de 'M' par le pas de déplacement radial (en général, 24  $\mu m$ ).

$DMin_{ap}$  et  $DMax_{ap}$  : les densités minimale et maximale des 'M' mesures.

$DMin5_{ap}$  et  $DMax5_{ap}$  : la densité moyenne des  $M/20$  mesures les plus faibles et les plus fortes du cerne (indépendamment de l'ordre des mesures).

$Dq_{ap1}$  à  $Dq_{apQ}$  : un nombre 'Q' de densités moyennes de « quantiles »<sup>2</sup> reconstituant la forme du profil découpé en 'Q' parts égales. Ce découpage permet de

<sup>2</sup> Le nombre de quantiles 'Q' ayant été fixé arbitrairement à 20 dans les études réalisées jusqu'ici dans notre laboratoire, le terme « vingtile » est couramment employé pour les désigner.

ramener le nombre de mesures 'M', variable et souvent important (par exemple,  $M = 104$  pour un cerne de 2,5 mm avec un pas radial de 24  $\mu\text{m}$ ), à un nombre fixe 'Q' (en général 20), indépendamment de la largeur de cerne.

*À noter que, le rapport  $M / Q$  n'étant généralement pas entier, les densités des pas de mesures chevauchant une frontière entre deux quantiles sont réparties équitablement de façon à ce que la moyenne des  $Q$  quantiles soit égale à  $DMoy$  (aux erreurs d'arrondi près), et que, lorsque le nombre de mesures 'M' est inférieur à 'Q', chaque donnée est simplement répétée un nombre de fois  $k$  égal à la partie entière de  $(Q / M) + 1$ . Le calcul est alors effectué sur ce nouveau nombre de données  $k * M$  qui est bien supérieur à  $Q$ . Cet artifice n'empêche pas les quantiles calculés sur un cerne très étroit de présenter un aspect discontinu « en escalier ».*

À moins d'employer un nombre de quantiles élevé, la forme du profil restituée de cette façon ne reflète qu'imparfaitement les détails du profil réel. L'amplitude des variations de densité est notablement sous-estimée (figure 3). Des travaux sont en cours pour rechercher des modèles numériques qui permettraient d'améliorer la fidélité de la reconstitution tout en réduisant le nombre de paramètres à conserver (Rozenberg et al., soumis aux ASF).

Dans la suite du traitement, il ne sera plus fait appel aux données d'origine : les calculs ultérieurs se basent uniquement sur ces données décrivant chaque profil de cerne.

#### 4. CORRECTION PAR LA DENSITÉ GRAVIMÉTRIQUE DE CONTROLE

Ce traitement, qui est réalisé optionnellement à la demande de l'utilisateur, est destiné à remédier en partie aux erreurs de mesure liées à la technique d'analyse de radiographies aux rayons X.

Pour une longueur d'onde donnée, le noircissement d'une radiographie dépend essentiellement de la composition atomique et de l'épaisseur du matériau irradié. On admet généralement que la composition atomique du bois est invariable<sup>3</sup>, ce qui permet d'étalonner les radiographies en irradiant avec les éprouvettes une cale usinée dans un matériau synthétique (souvent à base cellulosique) dont la composition atomique est connue.

Bien entendu, le bois présente en réalité une certaine variabilité dans sa composition chimique; il intègre des éléments minéraux et divers composants extractibles en quantité souvent non négligeable. Ceci se traduit par une erreur de mesure sur la densité estimée par microdensitométrie. L'analyse de ces erreurs [1] montre que leur gravité dépend souvent de l'arbre ou de l'essence considérés, ce qui laisse espérer qu'une correction globale des mesures sur une éprouvette (en négligeant donc les variations éventuelles du facteur correctif internes à l'éprouvette) pourrait être efficace.

Lorsque la géométrie de l'éprouvette s'y prête, une mesure indépendante de sa densité globale par une méthode gravimétrique (mesure de masse et de volume) permet de corriger une partie de l'erreur de mesure. Chaque valeur de densité estimée

<sup>3</sup> Les hypothèses de Polge [12], qui sont à la base de l'application au bois de la technique microdensitométrique, sont les suivantes : le bois comprend 70 % d'hémicelluloses et 30 % de lignine, chacun ayant une formule chimique fixe, ce qui permet de calculer la composition atomique du bois (49,1 % de carbone, 6 % d'hydrogène et 44,9 % d'oxygène).

par microdensitométrie (DMes) est remplacée par :

$$DCorr = DMes / RMC$$

avec  $RMC = DMoy_E / DGrE$

où  $DMoy_E$  est la moyenne des densités mesurées sur l'éprouvette par microdensitométrie (en éliminant s'il y a lieu le fond de la radiographie aux deux extrémités),  $DGrE$  est la densité de contrôle gravimétrique.

En pratique, il n'est pas utile de corriger tous les points de mesure; le calcul est effectué seulement sur les données de base ( $DMoy_{ap}$ ,  $DMin_{ap}$ ,  $DMax_{ap}$  et les densités de quantiles).

### 5. RECONSTITUTION DU CERNE MOYEN « SYNTHÉTIQUE »

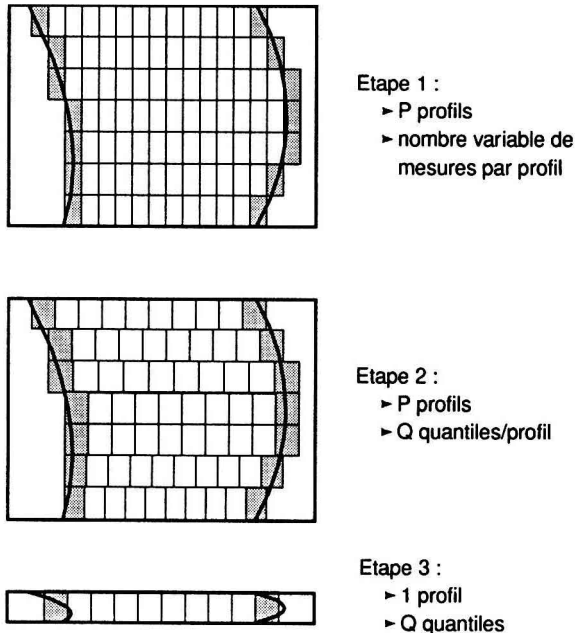
Chacun des 'P' profils de cerne étant décrit par 'Q' quantiles de densité, le profil radial moyen peut être reconstitué en

effectuant des moyennes de profils par quantile (*figure 4*).

### 6. ESTIMATION DE L'ANGLE D'INCLINAISON DES LIMITES

Dans le plan transverse, l'inclinaison d'une limite de cerne peut être définie par l'angle entre la tangente à la limite et la normale à la direction radiale (que l'on suppose coïncider avec l'axe principal des profils). Une limite de cerne parfaitement tangentielle se caractérise ainsi par un angle d'inclinaison nul.

Par souci de simplification, nous avons choisi de calculer, pour chaque cerne, un seul angle moyen ( $AngLim_a$ ), censé refléter l'inclinaison moyenne des deux limites encadrant le cerne d'âge 'a'. On admet donc que ces deux limites sont globalement rectilignes (hypothèse raisonnable dans la mesure où la dimension tangentielle n'est pas trop élevée) et parallèles



**Figure 4.** Reconstitution d'un cerne synthétique à partir de P profils découpés en Q quantiles. (Ici, P = 7 et Q = 8.)

(ce qui n'empêche pas l'angle moyen d'évoluer d'un cerne à l'autre).

L'angle moyen  $\text{AngLim}_a$  est estimé par la pente de la droite de régression de la coordonnée tangentielle sur la coordonnée radiale établie sur les positions des limites dans chaque profil. Afin de s'affranchir de la largeur de cerne, l'ajustement est effectué sur les coordonnées radiales centrées sur la moyenne des deux limites encadrant le cerne. Ce changement de variable permet en particulier d'utiliser l'écart-type résiduel pour évaluer la qualité de l'ajustement et détecter d'éventuelles anomalies.

Cette donnée est utilisée dans le calcul de la largeur de cerne détaillé ci-dessous.

## 7. CALCUL DE LA LARGEUR DE CERNE

Dans l'hypothèse où l'éprouvette analysée a été découpée de façon parfaitement radiale, la largeur de cerne peut être définie comme la distance moyenne séparant deux limites de cerne :

$$\text{LgcMoy}_a = 1/P \sum_{p=1}^p \text{Lgc}_{ap}$$

où P est le nombre de profils analysés.

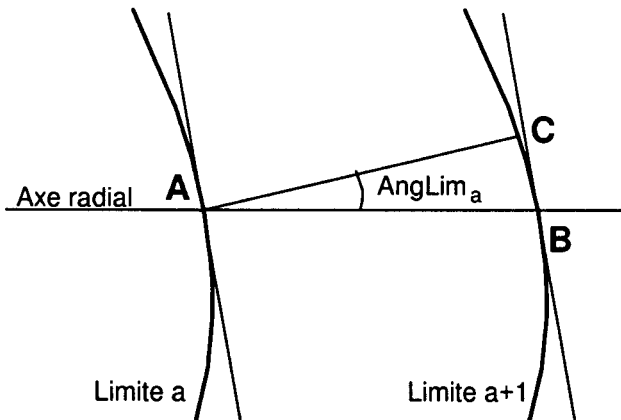
Cette information est particulièrement utile lorsque plusieurs éprouvettes radiales ont été prélevées sur la circonférence : la moyenne sur la circonférence des largeurs d'un cerne d'âge donné donne ainsi une bonne estimation de l'accroissement radial de l'arbre pour l'année considérée.

Mais lorsque l'on recherche une indication sur la production ligneuse locale, ce qui est implicitement le cas dans les études sur la variabilité intra-arbre des propriétés du bois, cette valeur moyenne s'avère inadaptée : la largeur de l'accroissement annuel sera en effet surestimée lorsque l'inclinaison des cernes est importante.

Pour éviter ce biais, on définit usuellement en tout point de l'arbre un repère local RTL relatif aux limites de cernes et à l'angle du fil au voisinage du point considéré. Le protocole que nous utilisons ne permet d'avoir aucune information sur l'angle du fil ; en revanche il est facile de tenir compte de l'angle d'inclinaison des cernes de façon à faire évoluer l'axe radial d'un cerne à l'autre. La largeur corrigée est ainsi la distance orthogonale entre les deux limites du cerne (figure 5) :

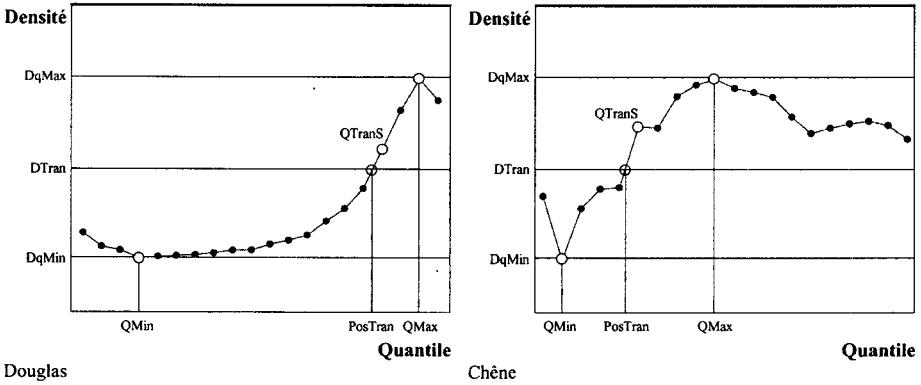
$$\text{LgcCor}_a = \text{LgcMoy}_a * \cos(\text{AngLim}_a)$$

où  $\text{AngLim}_a$  est l'angle d'inclinaison moyen des limites du cerne 'a'.



**Figure 5.** Correction de la largeur de cerne par l'angle d'inclinaison des limites par rapport à la normale à l'axe radial.  $\text{LgcMoy}_a$  correspond à la distance AB,  $\text{LgcCor}_a$  à la distance AC.





**Figure 6.** Localisation de la transition BI/BF à partir du profil des quantiles. Douglas et chêne,  $Q = 20$ ,  $\beta_x = 0,5$ .

Les largeurs de cernes sont toujours corrigées dans le sens d’une réduction. La somme radiale de toutes les largeurs de cernes corrigées peut être sensiblement inférieure à la longueur totale de l’éprouvette.

**8. LOCALISATION DE LA TRANSITION BOIS INITIAL – BOIS FINAL**

La distinction entre bois initial et bois final est particulièrement utile pour décrire simplement l’anatomie d’un bois dans un but de modélisation (modèles mécaniques basés sur la théorie des matériaux multicouches par exemple).

La convention que nous avons adoptée pour tracer une limite arbitraire entre bois initial et bois final dans le cerne est basée uniquement sur la forme du profil densitométrique synthétique (représenté par les quantiles). La délimitation est ici réalisée sans intervention de l’utilisateur, selon l’algorithme suivant (figure 6) :

- recherche de la densité de quantile maximale dans le cerne (DqMax) ;
- localisation du quantile QMin de densité DqMin minimale dans le cerne ;
- choix d’un seuil arbitraire de densité (DTran) compris entre DqMax et DqMin :

$$DTran = \beta_x DqMax + (1-\beta_x) DqMin$$

où  $\beta_x$  est une constante ajustable entre 0 et 1 ( $\beta_x = 0,5$  par défaut) ;

- localisation du quantile QMax de densité maximale compris entre QMin et le dernier quantile<sup>4</sup> ;
- localisation du premier quantile (QTranS) dont la densité est supérieure à DTran, compris entre QMin et QMax (QTran est pris égal à QMax si cette condition n’est jamais vérifiée) ;
- interpolation linéaire entre les densités des quantiles QTranS-1 et QTranS pour trouver la position radiale dans le cerne PosTran du point d’intersection avec le seuil de densité DTran. Ce point d’inter-

<sup>4</sup> La densité du quantile QMax peut éventuellement être inférieure à la densité maximale DqMax lorsque le maximum de densité du cerne précède le minimum (ce qui reste exceptionnel).

section est supposé correspondre à la transition entre bois initial et bois final.

Le nombre sans dimension PosTran variant entre 1 et Q, les fractions de bois initial et final (de 0 à 1) sont estimées de la façon suivante :

$$\begin{aligned} fBi_a &= (\text{PosTran} - 0,5) / Q \\ fBf_a &= 1 - fBi_a \end{aligned}$$

Ces fractions sont utilisées pour calculer les largeurs de bois initial et final (voir ci-dessous) ainsi que la proportion de bois final (ou texture) exprimée en pourcentage de la largeur de cerne ( $PpBf_a = 100.fBf_a$ ).

Étant donné le mode de calcul des fractions  $fBi$  et  $fBf$ , un cerne comprendra toujours au minimum un demi-quantile de bois initial et de bois final.

La procédure peut s'appliquer aussi bien aux quantiles de chaque profil qu'aux moyennes de quantiles composant le profil « synthétique ». Cette dernière solution semble néanmoins donner des résultats plus fiables dans un bois caractérisé par une forte variabilité tangentielle comme le chêne.

La position de la transition BI/BF déterminée par cette méthode correspond en général assez bien à la limite que placerait subjectivement un observateur en examinant le profil. Étant donné son caractère arbitraire, elle a toutefois peu de chance d'être identique à la limite « anatomique » déterminée par des méthodes conventionnelles (critère de Mork pour des résineux, fin de la zone de gros vaisseaux pour le chêne, etc.).

L'ajustement du paramètre  $\beta x$  permet d'améliorer la concordance entre les méthodes « anatomiques » et « densitométriques ». Ce travail n'a encore été effectué que sur le chêne rouvre, à l'occasion d'une étude anatomique approfondie

réalisée par Sciamia [13] et Mothe et al. [9] Lorsque DTran est pris égal à la moyenne du minimum et du maximum du cerne ( $\beta x = 0,5$ , valeur par défaut), la microdensitométrie sous-estime d'environ 20 % la largeur du bois initial. Une bien meilleure estimation est obtenue pour  $\beta x = 0,80$  ( $R^2 = 0,85$ , erreur d'estimation inférieure à 3 %).

## 9. CALCUL DES DONNÉES SYNTHÉTIQUES MOYENNES PAR CERNE

Outre la largeur de cerne, les quantiles moyens et les proportions de bois initial et final, chaque cerne est finalement décrit par les valeurs suivantes :

– les densités moyenne, minimale et maximale sont simplement les moyennes des densités correspondantes calculées sur chacun des profils,

– les largeurs de bois initial et final sont déduites de la largeur de cerne et des fractions de BI et BF.

$$LBf_a = Lgc_a * fBf_a$$

$$LBi_a = Lgc_a * fBi_a$$

où  $Lgc_a = LgcCor_a$ , si l'on souhaite corriger les largeurs par l'angle d'inclinaison des limites<sup>5</sup>,  $Lgc_a = LgcMoy_a$ , dans le cas contraire.

Pour des raisons pratiques de simplicité et de rapidité du traitement, le calcul des densités de bois initial et final n'est pas effectué sur les données brutes mais sur les 'Q' quantiles du cerne synthétique. La densité des bois initial et final est la moyenne des quantiles de part et d'autre de la position de la transition BI/BF, la densité du quantile intermédiaire (celui dans lequel est incluse la transition) étant répartie de façon appropriée :

<sup>5</sup> Selon la procédure décrite aux paragraphes 6 et 7.

$$DBi_u = \sum_{q=1}^{QTran-1} Dq + PqBi \cdot D_{QTran}$$

où QTran est le quantile dans lequel est localisé la transition (soit la partie entière de PosTran), PqBi est la fraction du quantile QTran attribuée au bois initial. ( PqBi = (PosTran - QTran) / Q ).

## 10. RECONSTITUTION DU PROFIL RADIAL MOYEN

Le profil moyen est notamment utilisé pour représenter graphiquement les données mesurées avec des logiciels commerciaux qui refusent le tracé des milliers de points que comprennent les courbes densitométriques usuelles. Il est obtenu en plaçant bout à bout tous les quantiles de cerne calculés sur l'éprouvette, en associant à chaque densité de quantile sa coordonnée radiale relative au début de l'éprouvette. À toutes fins utiles, le fichier comprend également des informations sur la localisation de chaque quantile (bois initial, bois final, limite de cerne ou transition).

## 11. COMPARAISON SOMMAIRE AVEC QUELQUES MÉTHODES UTILISÉES DANS D'AUTRES LABORATOIRES

Une étude comparative des méthodologies adoptées par 20 laboratoires exploitant des données microdensitométriques relatives au bois a été commencée en 1994 par I.D. Campbell (résultats à paraître). Nous ne nous référons ci-après qu'à quelques publications (souvent anciennes) décrivant d'autres systèmes de traitement (y compris le système décrit par Ferrand [5] et Perrin et Ferrand [11] utilisé dans notre laboratoire jusqu'en 1990 environ) pour souligner les principales différences

et les points communs avec la procédure décrite dans cet article.

### 11.1. Délimitation des cerne

La détection des limites de cerne est souvent basée sur un seuil de densité caractéristique au delà duquel on admet être toujours dans du bois final [8, 10] avec parfois un test sur la pente du profil [3, 6, 11] et une largeur minimale du cerne [7]. Quelle que soit la méthode de détection employée, tous ces systèmes prévoient prudemment une procédure de correction manuelle permettant d'ajouter une limite non détectée ou de retirer un faux cerne.

### 11.2. Correction de la densité

Des écarts systématiques de densité ayant été observés entre densités mesurées par microdensitométrie et par gravimétrie, Lenz et al. 1976 rectifient les données de microdensité à l'aide d'un coefficient équivalent au RMC décrit au paragraphe 4. Ce coefficient n'est pas ajusté à chaque éprouvette mais fixé pour une essence donnée.

### 11.3. Correction des largeurs de cerne par l'angle d'inclinaison des limites

Dans le système décrit par Parker et al. [10], l'orientation préférentielle des limites de cerne peut être indiquée par l'opérateur au moment de la numérisation. La largeur de cerne est alors corrigée pour représenter la distance orthogonale entre deux limites (cf paragraphe 7).

Certains appareils [7, 8] sont munis d'un dispositif permettant de réorienter la fenêtre de mesure pour l'aligner sur les limites de cerne (fente tournante). L'appareil à numérisation directe de Jonsson et al.

[7] effectue ce travail automatiquement : lorsqu'une limite de cerne est détectée, l'appareil revient de quelques pas en arrière et répète plusieurs fois l'acquisition avec des orientations différentes de la fenêtre. Seul le passage offrant le plus fort contraste de densité est conservé mais l'angle correspondant n'est apparemment pas utilisé pour corriger la largeur de cerne.

Avec le système de Perrin et Ferrand [11] le problème de l'inclinaison des cernes était résolu au moment de la prise des mesures : l'opérateur devait rectifier en permanence l'orientation de la radiographie de façon à ce que la fenêtre d'exploration reste parfaitement parallèle aux limites de cerne. Cette manœuvre, qui nécessitait une attention constante de l'opérateur, était une source d'erreur non négligeable et allongeait considérablement le temps de mesure.

#### **11.4. Données synthétiques calculées sur chaque cerne**

Les données calculées sur chaque cerne sont très similaires à celles que nous présentons au paragraphe 9 : densité et largeur du cerne, du bois initial et du bois final, densités minimale et maximale. La limite entre bois initial et final dans le cerne (transition) est en général placée à un niveau de densité fixe pour une essence donnée [3, 10]. Une représentation simplifiée du cerne sous forme de quantiles est mentionnée par Parker et al. [10] (100 quantiles), Ferrand [5] et Cown et Clement [3] (20 quantiles). Plus anciennement, Echols [4] (in Ferrand [3]) caractérisait le cerne par les proportions de la largeur du cerne comprises entre des niveaux fixes de densité. L'hétérogénéité de densité dans le cerne est en général exprimée par la différence entre les densités maximale et minimale ou par des critères plus sophistiqués tels que l'écart-type des densités de quantile proposé par

Ferrand [5] après analyse critique des critères existants.

#### **11.5. Densitométrie par analyse d'image**

Les systèmes modernes WinDendro et MacDendro (de Regent Instruments Inc., décrits par Guay et al. [6]) et Dendro 2003 (de Walesch Electronic) permettent de numériser entièrement les images radiographiques et d'appliquer des techniques d'analyse d'image pour faciliter la détection des limites de cerne. Le traitement ultérieur reste néanmoins très proche des techniques traditionnelles puisqu'il revient à simuler le comportement d'un microdensitomètre : une fenêtre de mesure virtuelle, allongée tangentiellement, décrit une trajectoire radiale, permettant ainsi de reconstituer un profil en moyennant les pixels inclus dans chaque fenêtre. La relation entre densité du bois et niveau de gris de l'image n'étant pas linéaire, cette méthode a l'avantage de donner une meilleure estimation de la densité moyenne dans les fenêtres incluant à la fois des zones à forte densité et à faible densité (sous réserve que cette moyenne soit calculée sur les densités de chaque pixel et non sur leur niveau de gris). La technique de la fente tournante est elle aussi simulée par la réorientation de la fenêtre virtuelle de façon à obtenir le meilleur contraste possible au niveau des limites de cernes. En définitive, le profil moyen obtenu par ces techniques est probablement très proche de celui que nous obtiendrions en considérant les lignes de pixels comme des profils parallèles et en leur appliquant la méthode décrite précédemment.

## **12. CONCLUSION**

La procédure de traitement des données microdensitométriques décrite ici est

maintenant employée depuis plusieurs années dans notre laboratoire. Rapide et peu onéreuse, la méthode actuelle s'avère parfaitement adaptée à l'analyse de la plupart des bois résineux tempérés. Elle paraît moins efficace pour des bois à cernes annuels peu différenciés ou à forte hétérogénéité tangentielle bien qu'elle ait déjà été utilisée avec succès sur du chêne ou du peuplier.

En comparaison avec les logiciels commerciaux qui sont parfois fournis avec les chaînes modernes d'acquisition de données microdensitométriques, le principal avantage de cette méthode est sa souplesse d'adaptation : les programmes peuvent être modifiés à volonté pour intégrer aux résultats finaux des informations nouvelles concernant par exemple la variabilité tangentielle de la densité dans le cerne.

Le point faible de la procédure actuelle est sa phase initiale, peu conviviale, et qui reste orientée vers le traitement de profils densitométriques radiaux plutôt que vers de véritables images bidimensionnelles de densité. L'intervention manuelle, nécessaire dans la majorité des cas pour localiser les limites de cernes ne pourrait être répétée dans sa forme actuelle sur les centaines de lignes de pixels que peut contenir une image numérisée par un scanner ou une caméra. Une exploitation plus rationnelle des données, inspirée des méthodes d'analyse d'image, fait maintenant partie des objectifs prioritaires pour faciliter la détection et le contrôle des limites de cernes dans les bois à structure anatomique complexe.

## RÉFÉRENCES

- [1] Bouchot L., Recherche des causes pouvant expliquer les écarts systématiques observés entre la densité mesurée par exploration microdensitométrique de clichés radiographiques d'échantillons de bois et la densité mesurée par méthode gravimétrique conventionnelle, maîtrise de biologie végétale, université de Nancy-I, Inra, 1994, 55 p.
- [2] Cameron J.F., Berry P.F., Phillips E.W.J., The determination of wood density using beta rays, *Holzforschung*, 13 (3) (1959) 78-84.
- [3] Cown D.J., Clement B.C., A wood densitometer using direct scanning with X-rays, *Wood Sci. Technol.* 17 (1983) 91-99.
- [4] Echols R.M., Patterns of wood density distributions and growth rate in Ponderosa Pine, *Proceedings of the Symposium on the Effect of Growth Acceleration on the Properties of Wood*, Forest Products Laboratory, Madison, 1972.
- [5] Ferrand J.C., Réflexions sur la densité du bois. 2<sup>e</sup> partie, Calcul de la densité et de son hétérogénéité, *Holzforschung* 36 (3) (1982) 153-157.
- [6] Guay R., Gagnon R., Morin H., A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera, *The Forestry Chronicle* 68 (1) (1992) 138-141.
- [7] Jonsson B., Dissing E., Pernestål K., A high resolution and high speed annual ring analyser with automatic angle alignment. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Biometry and Forest Management, Report 19, 1990, 37 p.
- [8] Lenz O., Schär E., Schweingruber F.H., Methodische Probleme bei der radiographisch-densitometrischen Bestimmung der Dichte und der Jahringbreiten von Holz, *Holzforschung* 30 (4) (1976) 114-123.
- [9] Mothe F., Sciamia D., Leban J.M., Nèveu G. Localisation de la transition bois initial - bois final dans un cerne de chêne par analyse microdensitométrique, *Ann. Sci. For.* 55 (1998) (sous-pression).
- [10] Parker M.L., Bruce R.D., Jozsa L.A., X-ray densitometry of wood at the W.F.P.L., Forintek Canada Corp., Western Forest Products Laboratory, Technical Report 10, 1980, 18 p.
- [11] Perrin et Ferrand., Automatisation des mesures sur carottes de sondage de la densité du bois, de son retrait et des contraintes de croissance, *Ann. Sci. For.* 41 (1) (1984) 69-86.
- [12] Polge H., Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants - Applications dans les domaines technologique et physiologique, thèse de doctorat, université de Nancy-I, Champenoux, 1966, 215 p.
- [13] Sciamia D., Estimation de la proportion et de la répartition des tissus d'un cerne de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) à partir de la connaissance des densités et largeurs de son bois initial et de son bois final, D.E.A., Engref - Inra, 1995, 30 p.