

Localisation de la transition bois initial – bois final dans un cerne de chêne par analyse microdensitométrique

Frédéric Mothe*, Delphine Sciama,
Jean-Michel Leban, Gérard Nepveu

Institut national de la recherche agronomique, équipe de recherches sur la qualité des bois,
54280 Champenoux, France

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

Abstract – Localization of the earlywood–latewood transition in oak rings using microdensitometric analysis. The ring widths and the earlywood–latewood limits in 96 annual rings of oak (*Quercus petraea* Liebl.) have been measured by image analysis of cross sections. A microdensitometric analysis has been performed on the same rings. The position of the earlywood–latewood transition has been estimated in each ring by searching the intersection of the density profile with a threshold of density. This threshold has been computed in three ways: 1) a fixed threshold, 2) a floating threshold depending on the minimal and maximal densities in the ring and 3) a floating threshold depending on the mean density in the ring. Each method has been tested with several parameters and the estimated values of the earlywood and latewood widths and ratios have been compared with the anatomical observations. The second and third methods are more accurate than the first method. The second method is preferred because the quality of the results is less dependent on the choice of the parameters. (© Inra/Elsevier, Paris.)

wood anatomy / X-ray densitometry / *Quercus petraea* / wood density / earlywood / latewood

Résumé – Les largeurs de cerne et la position de la transition entre le bois initial et le bois final ont été mesurées par analyse d'image de coupes microscopiques sur 96 cernes de chêne rouvre (*Quercus petraea* Liebl.). Une analyse microdensitométrique a été réalisée sur des éprouvettes jumelles. La position de la transition bois initial – bois final a été estimée sur chaque cerne en recherchant le point d'intersection du profil avec un seuil de densité déterminé de trois façons différentes : (1) un seuil fixe, (2) un seuil flottant fonction des densités minimale et maximale du cerne et (3) un seuil flottant fonction de la densité moyenne. Chaque méthode a été expérimentée avec différents paramétrages, les largeurs de bois initial et final ainsi que leurs proportions étant

* Correspondance et tirés à part
E-mail: mothe@nancy.inra.fr

chaque fois comparées à la référence anatomique. Les méthodes (2) et (3) donnent les estimations les plus précises. La méthode (2) est préconisée en raison de sa plus grande robustesse en cas de paramétrage approximatif. (© Inra/Elsevier, Paris.)

anatomie / analyse microdensitométrique / *Quercus petraea* / densité du bois / bois initial / bois final

Les variations locales de la densité dans une éprouvette de bois sont une conséquence de la disposition et des propriétés des éléments anatomiques. L'analyse microdensitométrique apporte donc, en plus d'une chronologie de la production annuelle de masse ligneuse, des informations précieuses, car peu coûteuses, sur l'organisation anatomique dans l'éprouvette.

La plupart des bois résineux tempérés ont une structure anatomique suffisamment simple pour que la densité soit directement liée à la proportion de parois. Pour des bois plus complexes, comme le chêne, Sciamia, [16] a montré qu'un profil radial de densité suffit pour estimer statistiquement les proportions de différents tissus avec une précision acceptable.

Mais, quelle que soit la nature des informations anatomiques extraites des données microdensitométriques, la délimitation des zones de bois initial et de bois final est une étape incontournable pour beaucoup de bois tempérés (conifères, feuillus à zone initiale poreuse). Les proportions de bois initial et final ainsi que leurs densités moyennes respectives sont même parfois les seules données utilisées pour décrire l'anatomie d'un bois de façon simplifiée dans un but de modélisation (modèles mécaniques basés sur la théorie des matériaux multicouches par exemple).

Dans un bois à zone initiale poreuse comme le chêne, la transition du bois initial au bois final est abrupte. Selon Denne, [4], elle coïncide physiologiquement avec la fin de la période d'élongation des rameaux chez le chêne pédonculé (*Quercus robur*) ; anatomiquement, elle correspond à la fin de la zone de gros vaisseaux.

Pour beaucoup d'autres espèces, le passage du bois initial au bois final est progressif, au point que la limite « anatomique » doit être fixée par convention (critère de Mork, Denne [5], pour les résineux par exemple).

Il en va de même pour la limite « densitométrique » qui, même pour des essences à bois initial bien différencié, doit être placée arbitrairement sur un profil radial continu de densité. Pour cela, on définit usuellement un seuil de densité au delà duquel les données sont supposées appartenir au bois final. Cette méthode remonte aux travaux de Phillips, [14], qui, après avoir constaté que la densité mesurée au point de transition défini par le critère de Mork restait comprise entre 0,50 et 0,59 sur plusieurs cernes de douglas, proposait de vérifier sur un échantillon plus vaste si le seuil moyen de 0,54 ne pourrait pas avoir une valeur universelle.

Ce chiffre (ou sa variante de 0,55 proposée par Polge [15]), testé notamment par Heger et al., 1974 et De Kort et al., 1991, toujours sur du Douglas, a ensuite été repris par de nombreux auteurs. De Kort et al., 1991 notent cependant que le seuil de 0,55 n'est jamais atteint dans certains cernes de Douglas, tout comme d'ailleurs le critère de Mork.

Le principe de la délimitation du bois final par un niveau fixe et universel de densité a été critiqué par Elliott et Brook [6], Brazier [1] ou Cown et Parker [2] qui remarquent que le seuil de transition varie d'une espèce à l'autre et, au sein de la même espèce en fonction de l'âge du cerne. Les deux premiers auteurs proposaient de s'inspirer plutôt des travaux de

Green et Worrall [8] qui, pour délimiter le bois final dans un profil de cerne obtenu par microphotométrie (mesure de la proportion de vides et de parois sur coupe transversale) se basent sur un seuil égal à la moyenne des valeurs obtenues au début du bois initial et à la fin du bois final. C'est une technique comparable que nous pratiquons depuis une dizaine d'années dans notre laboratoire avec un seuil de densité flottant égal à la moyenne du minimum et du maximum de chaque cerne [11].

Cown et Parker [2], jugeant qu'un seuil critique de densité serait difficile à établir, particulièrement dans le cas des feuillus très hétérogènes, recommandaient plutôt de calculer la proportion de bois final à l'aide du critère de Harris [9]. Ce « *latewood ratio* » se définit pour chaque cerne par le rapport (densité moyenne – densité minimale)/(densité maximale – densité minimale). On peut remarquer qu'il s'agit de la proportion de bois final d'un cerne idéal de même densité moyenne que le cerne mesuré mais constitué de deux couches homogènes de bois initial et final dont les densités sont respectivement la densité minimale et la densité maximale du cerne mesuré.

Un modèle de cerne beaucoup plus sophistiqué a été décrit par Pernestål et al. [12] pour tenir compte de la transition progressive du bois initial vers le bois final que l'on observe sur la plupart des bois résineux. L'ajustement des données mesurées sur le modèle, qui comprend deux fonctions distinctes pour le bois initial et le bois final, permet ainsi de calculer indirectement la position théorique de la transition.

Une telle méthode pourrait probablement être adaptée au bois de chêne en utilisant des modèles de cernes appropriés (modèle segmenté d'Eyono-Owoundi [7] par exemple). Elle paraît particulièrement attrayante dans la perspective d'une modélisation des propriétés du bois liées à la densité, qui pourraient être décrites de façon concise par les paramètres du

modèle de cerne. Cependant, outre sa difficulté à mettre en œuvre pour obtenir simplement la position de la transition, une méthode aussi indirecte a peu de chances de fournir des résultats aussi proches des observations anatomiques qu'un traitement direct des données mesurées.

Notre objectif est ici de rechercher si une méthode simple, basée sur un seuil de densité critique, ne suffirait pas à localiser de façon fiable la fin de la zone initiale poreuse sur un profil de cerne de chêne. Les mesures anatomiques et microdensitométriques soigneusement appariées réalisées par Sciamma [16] sur 96 cernes de chêne rouvre constituent un matériel parfaitement approprié pour identifier ce seuil critique.

Deux techniques peuvent être envisagées pour cela : la plus simple consiste à repérer sur les profils densitométriques la position de la transition et à analyser les densités recueillies (c'est ainsi que Phillips, [14], avait obtenu son seuil de 0,54 sur le Douglas) ; la seconde consiste à choisir a priori une méthode d'estimation du seuil et d'optimiser son paramétrage en confrontant les résultats aux mesures anatomiques. C'est la seconde technique que nous avons adoptée, en considérant que la densité au point de transition anatomique peut difficilement être mesurée avec précision étant donnée la pente de la courbe à cette position.

Nous testerons donc ici trois méthodes arbitraires de calcul de ce seuil critique : un seuil constant prédéterminé, un seuil dépendant de l'hétérogénéité de densité dans le cerne, et un seuil dépendant de la densité moyenne du cerne.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1. Préparation des éprouvettes

L'échantillonnage est constitué de 96 cernes provenant de 24 chênes rouvres (*Quercus petraea* Liebl.). Dans chaque arbre, un barreau

radial a été prélevé à 1,30 m sur lequel quatre cernes ont été analysés : deux cernes consécutifs à l'âge d'environ 50 ans et deux cernes consécutifs à l'âge d'environ 100 ans (l'âge étant ici le nombre de cerne compté depuis la moelle).

Deux éprouvettes jumelles ont été découpées au niveau de chaque couple de cernes consécutifs :

- une barrette de 2 mm d'épaisseur longitudinale, découpée à l'aide de scies fraises jumelées (Perrin, 1983) a été radiographiée pour permettre l'analyse microdensitométrique ;
- un cube, imprégné au polyéthylène glycol (p.m. 1 500), a été utilisé pour réaliser des coupes microscopiques de 12 µm d'épaisseur. Celles-ci ont été colorées à la safranine-bleu astra avant d'être déshydratées et montées sur des lames minces.

Les mesures ont été faites sur une surface équivalente (10 mm tangentielle × la largeur du cerne) sur les deux éprouvettes jumelles.

1.2. Mesures anatomiques

L'analyse anatomique a porté sur ces coupes, montées sur un microscope optique équipé d'une caméra CCD noir et blanc. L'image (512 × 512 pixels en 256 niveaux de gris) a été traitée par une routine spécialisée pour les mesures anatomiques (programme Chene de Bruno Zannier) intégrée dans le logiciel d'analyse d'image Visilog (Noesis).

Ce programme, qui automatise les mesures de proportions d'éléments anatomiques [16], demande à l'opérateur de tracer manuellement sur l'image les limites du cerne et la frontière entre bois initial et final. En général, la transition entre les gros vaisseaux du bois initial et les plages de fibre du bois final est suffisamment nette pour que cette démarcation ne pose aucun problème. Il existe cependant quelques cas plus litigieux où la zone de transition comprend des

petits vaisseaux que l'opérateur attribue à sa convenance au bois initial ou au bois final.

L'image étant orientée de façon à ce que l'axe horizontal de l'écran coïncide avec la direction radiale, les largeurs de cerne et de bois initial sont estimées simplement par la distance horizontale moyenne (nombre de pixels × largeur en micron d'un pixel) séparant les limites.

À partir des largeurs de cerne (LgcAna) et de bois initial (LBiAna) les données suivantes ont été calculées sur les 96 cernes analysés.

- Largeur du bois final :
 $LBfAna = LgcAna - LBiAna$;
- fraction de bois initial :
 $fBiAna = LBiAna/LgcAna$;
- fraction de bois final :
 $fBfAna = LBfAna/LgcAna$.

1.3. Analyse microdensitométrique

Pour couvrir une surface équivalente au champ du microscope, 20 profils microdensitométriques radiaux ont été enregistrés avec une fenêtre de mesure haute de 500 µm tangentielle et de 24 µm dans la direction radiale.

Le programme Cerd a été utilisé pour visualiser les profils, placer manuellement les limites de cernes et réduire chaque profil à 20 « quantiles » (moyenne des mesures sur un vingtième de la largeur du cerne). Les quantiles ont ensuite été moyennés sur l'ensemble des profils de façon à ne conserver que 20 valeurs de densité pour chaque cerne.

La position de la transition entre bois initial et bois final a été déterminée sur ces 20 valeurs moyennes avec la procédure décrite par Mothe et al. [11] permettant ainsi de calculer les fractions de bois initial (fBiDen) et final (fBfDen) et d'en déduire les largeurs de bois initial (LBiDen) et final (LBfDen) (figure 1).

Cette procédure* a été appliquée plusieurs fois à l'ensemble des données avec trois modalités de calcul du seuil de densité DTran :

* Une modification mineure ayant été apportée récemment à cette procédure, les estimations microdensitométriques des largeurs de bois initial et final rapportées par Sciama, 1995 ne sont pas exactement identiques à celles que nous présentons ici.

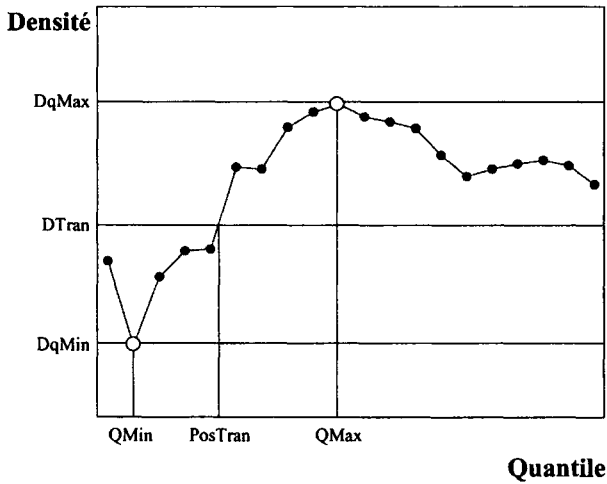


Figure 1. Localisation de la transition BI/BF à partir du profil des quantiles. (Chêne, $Q = 20$, $\beta x = 0,5$, $DTran = 0,5 DqMax + 0,5 DqMin$).

Modalité	Formule utilisée
(1)	$DTran = Df$
(2)	$DTran = \beta x DqMax + (1 - \beta x) DqMin$
(3)	$DTran = k DMoy$

où :

Df , βx et k sont des constantes

$DqMax$, $DqMin$ sont les densités extrêmes de quantile,

$DMoy$ est la densité moyenne du cerne.

Dans chacune de ces formulations, un paramètre (Df , βx ou k) doit être fixé a priori et appliqué à tous les cerne. Dans les méthodes (2) et (3), le seuil $DTran$ varie néanmoins d'un cerne à l'autre en fonction des densités $DqMax$, $DqMin$ et $DMoy$.

La modalité (1) correspond à la méthode souvent décrite dans la littérature pour les bois résineux (avec $Df = 0,54$ ou $0,55$ selon les auteurs). La modalité (2), avec $\beta x = 0,5$, est celle que nous utilisons traditionnellement dans notre laboratoire.

Dans chaque modalité, nous avons répété les calculs en faisant varier le paramètre propre à chaque formulation :

- (1) Df varie de 0,4 à 1,2 par pas de 0,1,
- (2) βx varie de 0 à 1 par pas de 0,1,
- (3) k varie de 0,5 à 1,5 par pas de 0,05.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Avant de confronter les différentes estimations des largeurs de bois initial et final aux mesures anatomiques, il convient de s'assurer que la largeur de cerne (qui sert de base au calcul des largeurs de bois initial et final) n'est pas elle-même entachée d'un biais. Les moyennes mesurées et estimées diffèrent de moins de 0,5 % (figure 2).

Moyenne des mesures anatomiques :

$$LgcAna = 1,56 \text{ mm} ;$$

moyenne des estimations par microdensitométrie :

$$LgcDen = 1,55 \text{ mm}$$

L'observation des données anatomiques confirme par ailleurs l'existence de relations statistiques entre la largeur de cerne et les largeurs de bois initial et final. Comme cela est bien connu chez le chêne, un accroissement de la largeur du cerne se répercute surtout sur le bois final, mais on observe aussi une relation positive, moins accentuée, avec la largeur du bois initial et donc en définitive une relation négative avec la proportion de bois initial (figure 3).

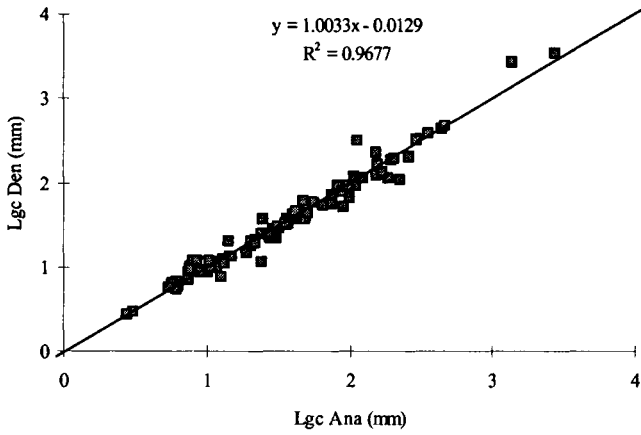


Figure 2. Relation entre la largeur de cerne estimée par microdensitométrie (LgcDen) et mesurée anatomiquement (LgcAna).

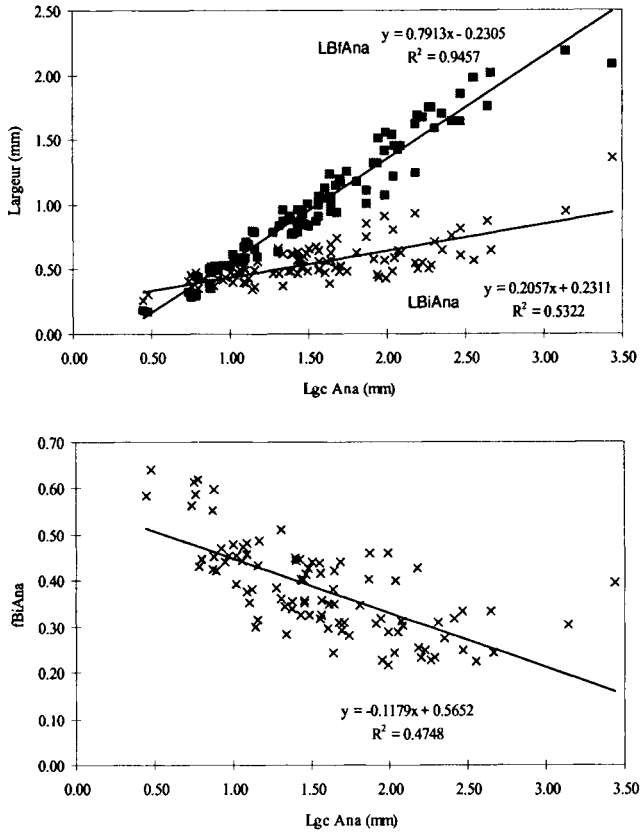


Figure 3. Relations entre la largeur de cerne (LgcAna) et les largeurs de bois initial (LBiAna), de bois final (LBfAna) et la fraction de bois initial (fBiAna).

Nous pouvons considérer qu'une analyse microdensitométrique ne peut se justifier pour estimer ces variables que si elle apporte un gain appréciable dans la qualité des estimations ($R^2 > 0,95$ pour LBFAna, $R^2 > 0,54$ pour LBiAna et $R^2 > 0,48$ pour fBiAna et fBfAna).

Pour évaluer l'efficacité des trois modes de calcul du seuil de transition DTran nous comparons les fractions et largeurs de bois initial et final estimées avec chaque formulation à la référence anatomique*. La partie inférieure des figures 4, 5 et 6 présente l'évolution des moyennes estimées lorsque l'on fait varier le paramètre unique des relations (1), (2) et (3).

On pourra noter que les extrémités droite et gauche des courbes coïncident. En effet, quelle que soit la formule retenue, les seuils DTran obtenus avec des valeurs extrêmes des paramètres (Df, β_x ou k) atteignent ou dépassent les extrêmes de densité (DqMin et DqMax) sur tous les cerne (à quelques exceptions près pour Df = 0,4). L'algorithme conduit alors au même résultat : la limite bois initial/bois final est placée au milieu du quantile contenant l'extremum (QMin à gauche, QMax à droite).

Entre les deux extrêmes, l'ajustement du paramètre de chaque formulation permet de minimiser le biais entre les valeurs moyennes estimées et mesurées (tableau I). Il serait possible de réduire encore les biais d'estimation en affinant le pas entre deux itérations, mais, du fait que les largeurs totales de cerne anatomiques et densitométriques diffèrent légèrement, l'optimum ne pourrait être identique pour toutes les variables.

La partie supérieure des figures 4, 5 et 6 présente les coefficients de détermination (R^2) de la régression entre les variables estimées et mesurées. Les paramètres cor-

respondants aux maxima de ces courbes, atteints parfois au prix d'une distorsion assez importante des résultats, sont récapitulés dans le tableau II.

Le calage des paramètres sur le maximum des R^2 serait possible en théorie à condition de rajouter des coefficients correcteurs aux résultats des estimations : la fraction de bois initial estimée par la méthode (1) avec Df = 0,95 devrait par exemple être divisée par 1,233 pour que les moyennes estimée et mesurée soient identiques.

Notre objectif étant de minimiser le nombre de paramètres à ajuster, nous avons préféré rechercher un compromis raisonnable entre les maxima de R^2 et les minima d'écarts, qui soit valable à la fois pour les proportions et les largeurs de bois initial et final (tableau III).

Au vu de ces résultats, la méthode (1) apparaît comme la moins performante. En comparaison des ajustements statistiques obtenus avec la largeur de cerne (figure 3), le gain d'information apparaît bien faible avec cette méthode d'exploitation des données microdensitométriques.

De meilleurs résultats sont obtenus avec les méthodes (2) et (3), globalement équivalentes, avec un léger avantage pour la méthode (3) qui offre les estimations les plus proches des moyennes mesurées.

Les formules (1) et (3) ont toutes deux l'inconvénient d'autoriser le seuil de densité DTran à sortir de l'intervalle [DqMin, DqMax] lorsque le paramètre (Df ou k) est mal ajusté. Ceci se produit pour un nombre de cerne croissant lorsque l'on s'éloigne des valeurs « raisonnables » du tableau III, ce qui explique la forme tourmentée des courbes de variation du R^2 correspondantes.

* La fraction de bois final (fBf), non représentée, se déduit de la fraction de bois initial (fBi) par la relation $fBf = 1 - fBi$.

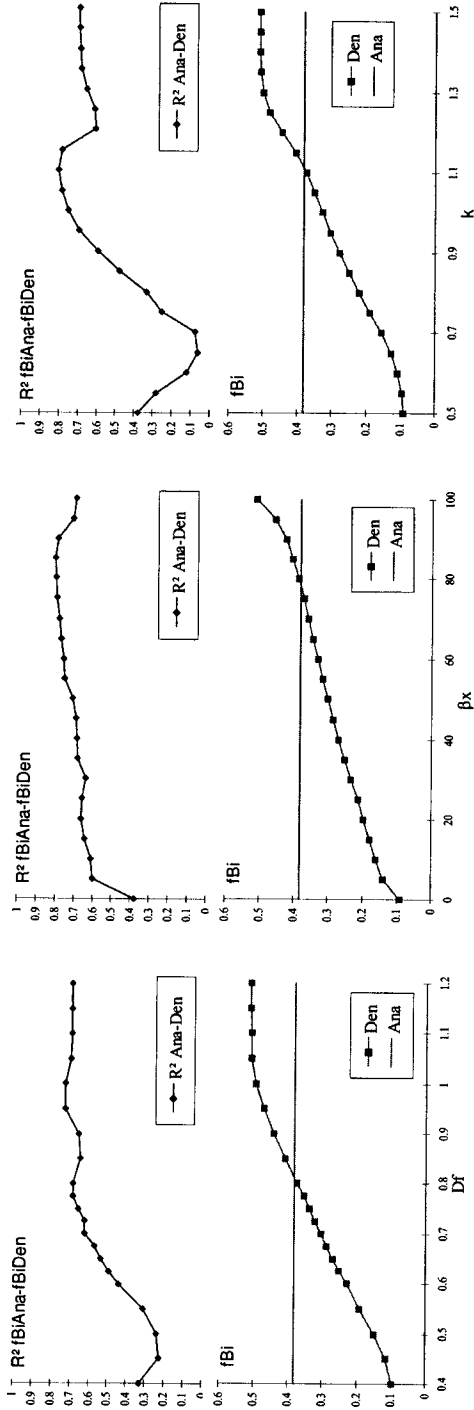


Figure 4. Moyennes des fractions de bois initial (f_{Bi}) mesurées anatomiquement et estimées par microdensitométrie à l'aide des relations (1), (2) et (3) appliquées avec différents paramètres. Coefficients de détermination respectifs (R^2) obtenus entre les 96 données anatomiques et densitométriques.

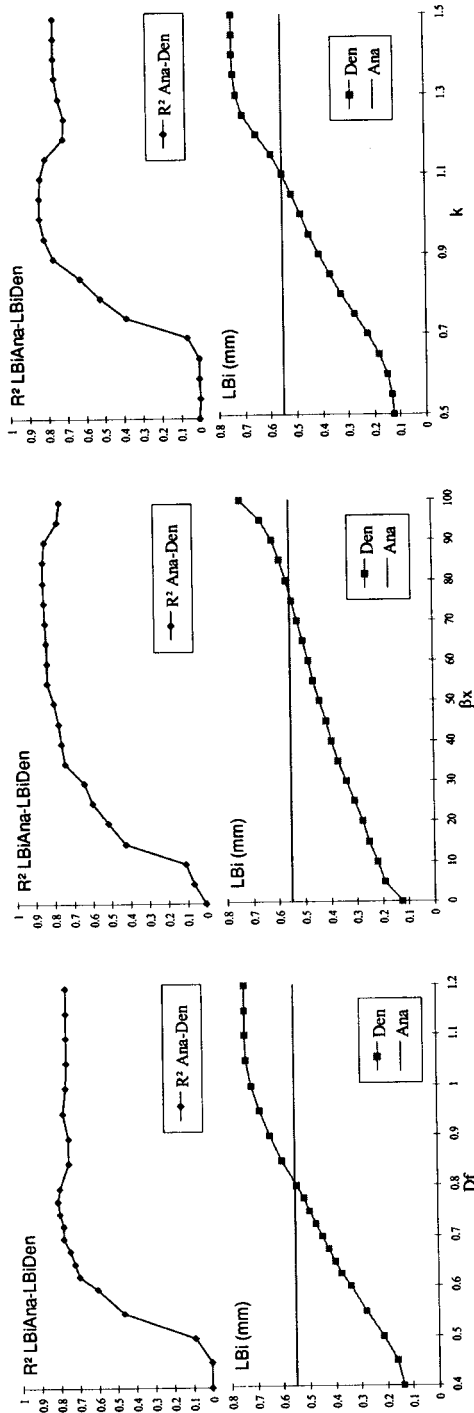


Figure 5. Moyennes des largeurs de bois initial (LBi) mesurées anatomiquement et estimées par microdensitométrie à l'aide des relations (1), (2) et (3) appliquées avec différents paramètres. Coefficients de détermination respectifs (R^2) obtenus entre les 96 données anatomiques et densitométriques.

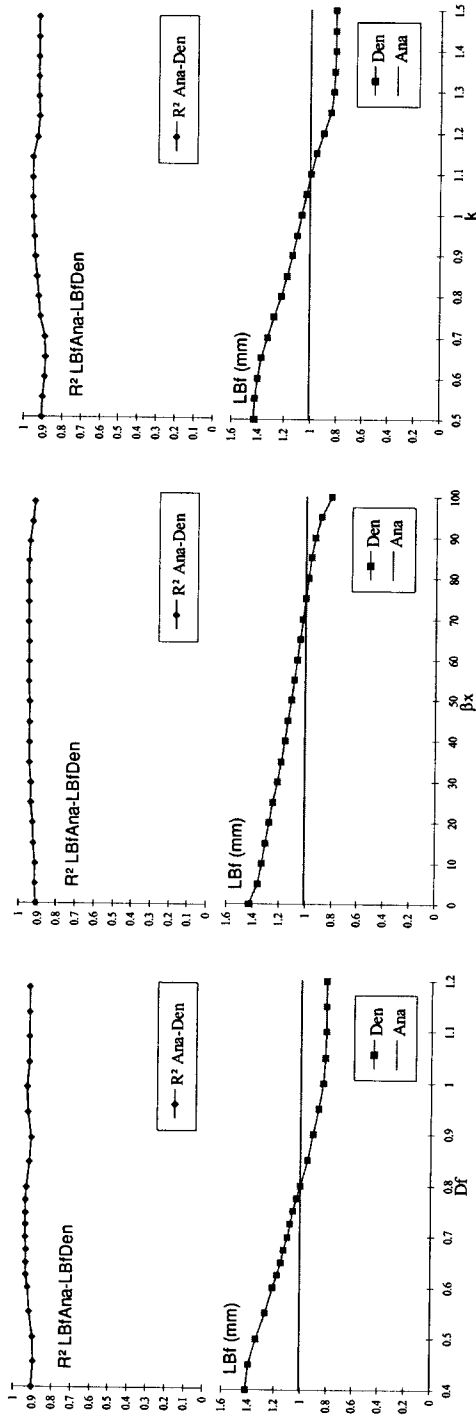


Figure 6. Moyennes des largeurs de bois final (LBF) mesurées anatomiquement et estimées par microdensitométrie à l'aide des relations (1), (2) et (3) appliquées avec différents paramètres. Coefficients de détermination respectifs (R^2) obtenus entre les 96 données anatomiques et densitométriques.

Tableau I. Paramètres (Df, βx ou k) des relations (1), (2) et (3) offrant les plus faibles écarts relatifs (Écart %) entre les fractions de bois initial (fBi), les largeurs de bois initial (LBi) et de bois final (LBf) estimées par microdensitométrie et mesurées anatomiquement. Coefficients de détermination (R^2) obtenus entre les données densitométriques et anatomiques.

Modalité	fBi			LBi			LBf		
	Paramètre	R ²	Écart %	Paramètre	R ²	Écart %	Paramètre	R ²	Écart %
(1) Df	0,800	0,684	-2,0	0,800	0,798	-1,1	0,800	0,938	+0,2
(2) βx	0,80	0,801	+1,8	0,75	0,847	-1,3	0,75	0,955	+0,3
(3) k	1,10	0,805	-1,4	1,10	0,838	-0,1	1,10	0,957	-0,2

Tableau II. Paramètres (Df, βx ou k) des relations (1), (2) et (3) offrant les meilleurs coefficients de détermination (R^2) entre les fractions de bois initial (fBi), largeurs de bois initial (LBi) et de bois final (LBf) estimées par microdensitométrie et mesurées anatomiquement. Écarts relatifs (Écart %) obtenus entre les moyennes densitométriques et anatomiques.

Modalité	fBi			LBi			LBf		
	Paramètre	R ²	Écart %	Paramètre	R ²	Écart %	Paramètre	R ²	Écart %
(1) Df	0,950	0,727	+23,3	0,775	0,809	-6,1	0,700	0,942	+9,9
(2) βx	0,85	0,803	+6,2	0,85	0,854	+7,1	0,80	0,955	-1,8
(3) k	1,10	0,805	-1,4	1,05	0,840	-6,3	1,15	0,958	-4,6

Tableau III. Paramètres (Df, βx ou k) choisis pour les relations (1), (2) et (3). Coefficients de détermination (R^2) et écarts relatifs moyens (Écart %) obtenus entre les données densitométriques et anatomiques.

Modalité	Paramètre	fBi		LBi		LBf		Moyenne	
		R ²	Écart %	R ²	Écart %	R ²	Écart %	R ²	Écart %
(1) Df	0,800	0,684	-2,0	0,798	-1,1	0,938	+0,2	0,807	1,1
(2) βx	0,80	0,801	+1,8	0,852	+2,7	0,955	-1,8	0,869	2,1
(3) k	1,10	0,805	-1,4	0,838	-0,1	0,957	-0,2	0,867	0,6

Un mauvais ajustement de βx (méthode (2)) conduit certes à des résultats biaisés, mais sans perte excessive d'information sur la variabilité. En fixant arbitrairement βx à 0,5, la formule (2), telle que nous

l'avons appliquée dans le passé sur du chêne, conduit ainsi à sous-estimer largement la largeur du bois initial (de 20 % environ) mais les estimations restent néanmoins bien corrélées aux valeurs mesu-

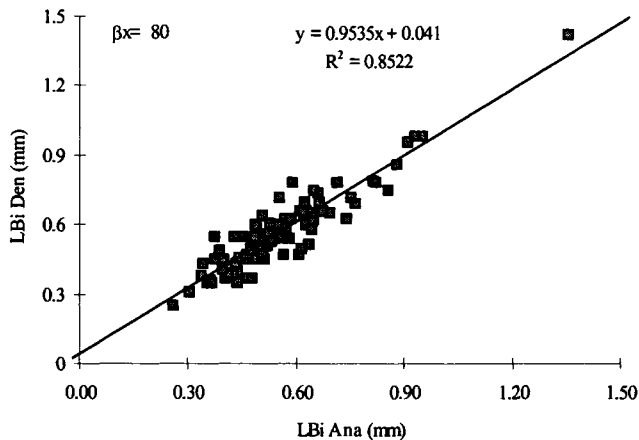


Figure 7. Relation entre la largeur de bois initial mesurée anatomiquement (LBiAna) et estimée par la formule (2), avec $\beta_x = 0,8$ (LBiDen).

rées ($R^2 = 0,8$). Une bien meilleure estimation – non biaisée – de la largeur de bois initial peut cependant être obtenue avec $\beta_x = 0,8$ (figure 7).

3. CONCLUSION

La position de la transition bois initial/bois final dans un cerne de chêne peut être estimée avec une précision acceptable sur un profil microdensitométrique en recherchant le premier point suivant le minimum du cerne dont la densité atteint un seuil donné. Un seuil « flottant », basé sur la densité moyenne ou l'écart entre les densités minimale et maximale dans le cerne, donne des résultats plus fiables qu'un seuil constant.

Pour le jeu de données analysé ici, la meilleure formulation de ce seuil de densité DTran semble être :

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

avec $\beta_x = 0,8$

(*DqMax et DqMin étant les maximum et minimum de densité dans le cerne*)

Faute d'expérience complémentaire pour la valider sur un autre ensemble de données, cette optimisation effectuée sur un échantillonnage réduit s'avère suffisamment « robuste » (dans la mesure où une faible erreur sur le paramètre β_x n'engendre qu'une faible erreur d'estimation) pour qu'on puisse envisager de l'exploiter sur d'autres données concernant le chêne rouvre.

Ce paramétrage ne peut cependant pas être généralisé à d'autres espèces. Pour garantir la fiabilité des estimations microdensitométriques des largeurs de bois initial ou final concernant une autre essence, des mesures anatomiques et un travail analogue devront être conduits sur une partie au moins de l'échantillonnage.

RÉFÉRENCES

- [1] Brazier J.D., Some considerations in appraising within-ring density, Second World Consultation on Forest Tree Breeding, Washington, 7 – 16 August 1969, Invited paper, 1969, 9 p.

- [2] Cown D.J., Parker M.L., Comparison of annual ring density profiles in hardwoods and softwoods by X-ray densitometry, *Can. J. For. Res.* 8 (1978) 442–449.
- [3] De Kort I., Loeffen V., Baas P., Ring width, density and wood anatomy of Douglas fir with different crown vitality, *IAWA Bull.* 12 (4) (1991) 453–465.
- [4] Denne M.P., Wood production and structure in relation to bud activity in some softwood and hardwood species, *Leiden Bot. Ser.* 3 (1976) 204–211.
- [5] Denne M.P., Definition of latewood according to Mork (1928), *IAWA Bull.* 10 (1) (1988) 59–62.
- [6] Elliott G.K., Brook S.E.G., Microphotometric technique for growth-ring analysis, *J. Inst. Wood Sci.* 18 (1967) 24 – 43.
- [7] Eyono Owoundi R., Modélisation de la rétractibilité du bois en relation avec des paramètres de la structure de l'accroissement annuel et de la position dans l'arbre chez *Quercus robur* L. et *Q. petraea* Liebl. Application à l'intégration de la rétractibilité du bois dans les modèles de croissance de peuplements et d'arbres. Thèse ENGREF, station de recherches sur la qualité des bois, Inra-CRF, Nancy-Champenoux, 233 p, 1992.
- [8] Green H.V., Worrall J., Wood quality studies. 1 : A scanning microphotometer for automatically measuring and recording certain wood characteristics. *TAPPI* 47 (7) 419 – 427 (in: Elliott et Brook, 1964).
- [9] Harris J.M., The use of beta rays in determining wood properties. Part 3 : Summarizing radial variations in wood density, *N. Z. J. Sci.* 12 (1969) 419–431.
- [10] Heger L., Parker M.L., Kennedy R.W., X-ray densitometry: a technique and an example of application, *Wood Sci.* 7 (2) (1974) 140–148.
- [11] Mothe F., Duchanois G., Zannier B., Leban J.M., Analyse microdensitométrique appliquée au bois : méthode de traitement des données utilisée à l'Inra-ERQB (programme Cerd), *Ann. Sci. For.* 55 (3) (1998) 301 – 313.
- [12] Pernestål K., Jonsson B., Larsson B., A simple model for density of annual rings, *Wood Sci. Technol.* 29 (1995) 441–449.
- [13] Perrin J.R., Dispositif de sciage de carottes de sondage de 5 mm sans collage préalable sur un support. *Ann. Sci. For.* 40 (4) (1983) 399 – 406.
- [14] Phillips E.W.J., The beta-ray method of determining the density of wood and the proportion of summer wood, *J. Inst. Wood Sci.* 5 (1960) 16–28.
- [15] 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 ès-Sciences Appliquées, Université de Nancy I, station de recherches sur la qualité des bois, Inra - CRF, Nancy-Champenoux, 215 p, 1966.
- [16] 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, 30 p, 1995.