



HAL
open science

Etude des contraintes de croissance. Première partie : méthode de mesure sur carottes de sondage

J.C. Ferrand

► **To cite this version:**

J.C. Ferrand. Etude des contraintes de croissance. Première partie : méthode de mesure sur carottes de sondage. Annales des sciences forestières, 1982, 39 (2), pp.109-142. hal-02727030

HAL Id: hal-02727030

<https://hal.inrae.fr/hal-02727030>

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude des contraintes de croissance

Première partie :

méthode de mesure sur carottes de sondage

Jean-Charles FERRAND

*I.N.R.A., Station de Recherches sur la Qualité des Bois,
Centre de Recherches forestières de Nancy, Champenoux, F 54280 Seichamps*

Une partie de ce travail a reçu le soutien financier de la D.G.R.S.T.
(contrat A.C.C. Matériau Bois n° 79 7 0690)

Résumé

On peut estimer les contraintes de croissance des hêtres ou des peupliers et des eucalyptus en mesurant le diamètre tangentiel TG d'une carotte de sondage (à l'état saturé) ; alors que la déformation élastique du bois devrait l'amener à être plus grand, ce diamètre est plus petit en présence d'une forte déformation potentielle longitudinale ε_L . L'étude des caractéristiques anatomiques du bois, réalisée avec un analyseur d'images selon des méthodes originales, montre que c'est la présence de bois de tension qui explique les valeurs prises par le diamètre tangentiel des carottes, même en l'absence de contraintes. L'auteur n'a pu mettre en évidence aucune déformation du biseau de la tarière, et a montré que la mesure du diamètre doit commencer au-delà des 5 premiers millimètres après l'écorce.

La corrélation entre TG et ε_L n'est pas assez élevée ($r = -0,67$ à $-0,77$) pour permettre une prédiction au niveau individuel. En revanche, on peut utiliser TG comme indicateur de la valeur moyenne de ε_L dans un groupe d'arbres (placette, famille, etc.), ce qui permet de faire de manière non destructive des mesures de contraintes de croissance dans les plantations expérimentales de sylviculture ou de génétique.

I. - Présentation

Les contraintes de croissance sont des contraintes qui existent dans les tiges des arbres forestiers. Pour la plupart des espèces — conifères par exemple — elles sont d'un niveau peu élevé et ne provoquent aucun inconvénient pour l'utilisateur du bois. En revanche, certains feuillus sont le siège, dans certaines conditions, de tensions particulièrement fortes. Alors, les grumes éclatent dès l'abattage (photo 1 A) ; de même, les produits obtenus par sciage se déforment et se fendent (photo 1 B). Au pire, on n'obtient plus la moindre pièce de bois d'œuvre, mais uniquement du bois d'industrie. De plus, comme les tiges à fortes contraintes renferment souvent du bois de tension, dont les propriétés physiques et mécaniques sont défavorables, les pièces de bois tirées d'arbres tendus sont de toute façon de qualité inférieure.

A



B

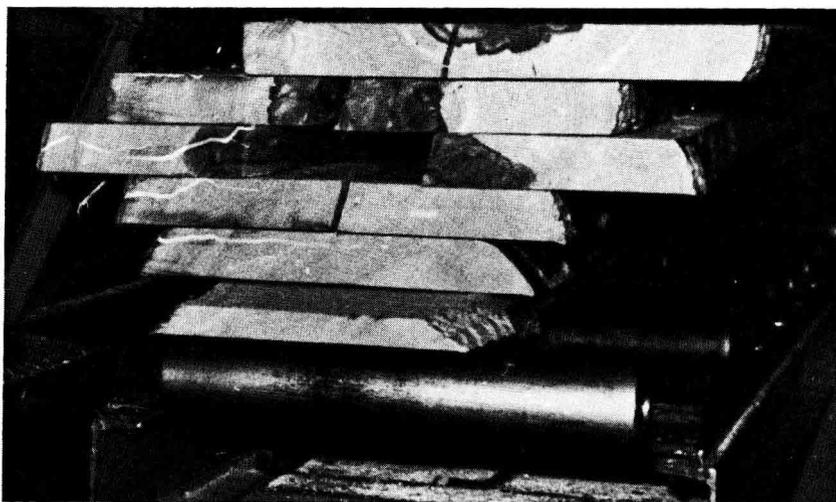


PHOTO 1

A. Eucalyptus. Grume éclatée lors du tronçonnage
B. Hêtre. Plateaux de cœur éclatés lors du sciage

A. Eucalypt. Log split when cut up.
B. Beech. Diametral boards split when sawn

En France, les essences les plus concernées sont le hêtre (*Fagus sylvatica*) et les peupliers (*Populus* sp.p.). Dans les pays chauds, on note les Eucalyptus (*Eucalyptus* sp.p.) et de nombreux autres genres (*Tectonia*, *Terminalia*, etc.). Ces bois sont fréquemment qualifiés de « nerveux », ce qui entraîne des risques de confusion, car le même terme désigne les bois à fort retrait. Pourtant, les deux phénomènes sont de nature totalement différente et s'expriment différemment aussi. Leur point commun est d'entraîner des déformations du matériau. Mais celles liées aux contraintes se produisent brutalement lorsque l'utilisateur découpe le bois, tandis que celles liées au retrait se produisent lentement au fur et à mesure du départ progressif de l'eau.

Depuis JACOBS (1938), BOYD (1950) & KÜBLER (1959), on admet que les contraintes sont :

— dans la direction longitudinale, une tension à la périphérie du tronc, et une forte compression du cœur,

— dans la direction tangentielle, une compression en périphérie, et une forte tension au cœur,

— dans la direction radiale, une tension qui augmente de la périphérie vers le cœur.

La contrainte longitudinale est considérée comme la plus préjudiciable, tant à cause de sa valeur élevée, qu'à cause de son gradient qui est à l'origine de déformations d'autant plus graves que les arbres sont de faible diamètre.

Dans la présente étude, on s'est intéressé aux contraintes accessibles en forêt, c'est-à-dire les contraintes longitudinales et tangentielles à la périphérie du tronc. Le premier article traite en détail d'une méthode de mesure utilisant des carottes de sondage, qui a été décrite pour la première fois par POLGE & THIERCELIN (1979). Le deuxième donnera des résultats obtenus en forêt pour le hêtre grâce à cette méthode, sur l'influence de la forme de l'arbre, de la station et du traitement sylvicole. Le troisième concernera les Eucalyptus.

II. - Méthodes de mesure directes

Dans le passé, les auteurs se sont limités à la mesure d'une déformation longitudinale dont ils ont déduit une valeur approchée de la contrainte longitudinale grâce à la valeur (mesurée ou recherchée dans la littérature) du module d'Young longitudinal du matériau. Pour mesurer les déformations, on utilise soit des micro-mètres mécaniques, selon diverses modalités (LENZ & STRÄSSLER, 1959 ; NICHOLSON, 1971), soit des chaînes de mesure extensométrique dont l'élément sensible est une (ou plusieurs) jauge électrique (GUENEAU & KIKATA, 1973). Les matériels les plus faciles d'emploi sont les capteurs extensométriques, car ils sont réutilisables, au contraire des jauges. Dans tous les cas, la déformation est la différence entre deux mesures de longueur effectuées, l'une avant, l'autre après relaxation des contraintes.

La façon de relâcher les contraintes varie également. Pour obtenir une relaxation totale, on sépare du tronc la portion de bois sur laquelle on veut réaliser la mesure. On inflige alors un traumatisme important à l'arbre. Par ailleurs, l'échantillon s'incurve à cause du gradient de la déformation longitudinale, dont la flèche peut fournir une

mesure. GUENEAU & KIKATA (1973, *op. cit.*) ont proposé d'opérer une relaxation partielle en forant, de part et d'autre de la zone de mesure, deux trous de 30 mm de diamètre et 30 mm de profondeur avec une mèche à bois. La déformation obtenue est de l'ordre de 80 p. 100 de la déformation potentielle totale.

Dans la présente étude, nous avons réalisé des mesures dans la direction longitudinale avec les extensomètres fabriqués par GUENEAU & SAURAT (1974), mais en forant des trous selon la méthode proposée par GUENEAU & KIKATA (1973, *op. cit.*); les résultats ainsi obtenus étaient comparés à ceux fournis par les carottes de sondage.

Note

Nous n'avons donc pas fait de mesure du gradient de la déformation longitudinale.

D'autre part, bien que le capteur ait été conçu pour avoir un gain égal à 1, il est nécessaire de le calibrer pour obtenir une valeur exacte de la déformation. La calibration a été réalisée sur une poutre de bois (de dimensions $1,5 \times 4,5 \times 100$ cm) déformée en flexion circulaire. Le signal du capteur était comparé à celui délivré par des jauges d'extensométrie collées sur la même génératrice. Dans le domaine qui a été testé (déformation longitudinale ϵ_L , comprise entre 0 et $2\,500 \cdot 10^{-6}$), le capteur utilisé ici fournit une réponse parfaitement linéaire; c'est pourquoi les résultats expérimentaux présentés sur les figures 7 et 9 ont été laissés sous leur forme brute. La valeur exacte des déformations serait égale à la valeur indiquée multipliée par 1,066.

III. - Etude d'une méthodologie de mesure sur carottes de sondage

Les mesures extensométriques sont assez longues à réaliser et infligent à l'arbre un traumatisme non négligeable. C'est pourquoi plusieurs chercheurs ont essayé de trouver une méthode de mesure indirecte des contraintes de croissance. La tentative de CHAFE (1979) avec la dureté a été infructueuse. Au contraire, POLGE et THIERCELIN (1979, *op. cit.*) ont obtenu des résultats intéressants en mesurant des carottes de sondage prélevées à la tarière de Pressler. Leur idée était que si l'on mesurait le diamètre des carottes avec suffisamment de précision, on constaterait des différences selon que les carottes seraient extraites d'arbres tendus ou non, à cause de la relaxation des contraintes de croissance.

3.1. Méthodologie de mesure - Résultats antérieurs

Dès leur prélèvement, les carottes (de 5 mm de diamètre) sont placées dans l'eau afin qu'elles restent à l'état saturé. Au laboratoire, on les place sur un appareil qui mesure leurs dimensions dans les directions axiale et tangentielle (voir figure 1). Cet appareil, inventé par PERRIN J.R. (*) comprend un chariot dont le déplacement est commandé par un moteur pas à pas et une vis à bille, tandis qu'un micromètre digital à franges de moiré mesure les dimensions au micron (10^{-6} m) près. L'en-

(*) Station de Recherches sur la Qualité des Bois, C.N.R.F., I.N.R.A., Champenoux, 54280 Seichamps.

semble est commandé par une électronique spécialement conçue qui permet de choisir un pas de mesure de 0,25 à 2 mm et une longueur de la zone de mesure de 0 à 250 mm. Les mesures, ainsi que leur moyenne, sont affichées sur un cadran lumineux et transférées à un télécype qui peut les imprimer et/ou les perforer sur ruban de papier.

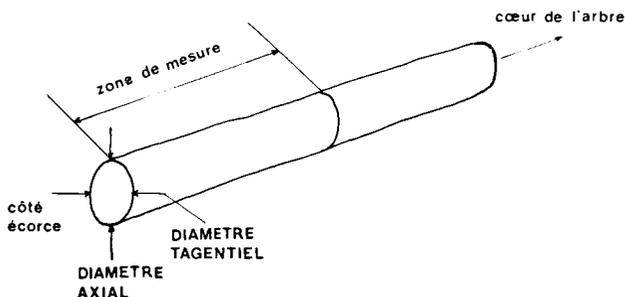


FIGURE 1

Mesures des diamètres des carottes
Measurement of the diameter of the increment cores

En réalisant 100 mesures au pas de 0,25 mm (entre l'écorce et une « profondeur » de 25 mm), POLGE & THIERCELIN (1979, *op. cit.*) ont trouvé un coefficient de corrélation $r = -0,68$ entre la valeur moyenne du diamètre tangentiel et la déformation mesurée par GUENEAU & SAURAT (1974, *op. cit.*) sur des hêtres (430 carottes) lors d'une expérience conjointe. Malheureusement, le signe de r est l'opposé de celui qui semblerait logique. En effet, le bois est tendu dans la direction longitudinale, et comprimé dans la direction tangentielle. La relaxation de ces deux contraintes devrait faire augmenter le diamètre tangentiel de la carotte ; mais on constate au contraire que celui-ci est plus faible lorsque les contraintes sont plus fortes !

Après avoir enlevé un morceau d'écorce, POLGE & THIERCELIN (1979, *op. cit.*) ont collé une toute petite jauge à deux voies sur le tronc d'un hêtre, puis ont posé le biseau d'une tarière de 10 mm de diamètre autour de cette jauge et ont prélevé une carotte. Les mesures extensométriques effectuées avant et après le prélèvement ont montré que le bois de la carotte s'était bien dilaté tangentiellement et contracté longitudinalement. Aussi ont-ils émis l'hypothèse que le biseau de la tarière se déformait.

Bien que reposant sur des bases totalement empiriques, cette méthode a déjà fourni de nombreux résultats (POLGE, 1979 et 1981). Cependant, il est apparu à l'usage que deux tarières différentes fournissent des résultats qui ne sont pas comparables. De plus, on a observé parfois une liaison significative entre le diamètre tangentiel et la densité (infradensité) du bois, dont on ne savait pas s'il fallait l'interpréter comme un phénomène parasite ou comme le signe d'une liaison entre la densité et les contraintes.

Enfin, CHARDIN (communication personnelle, 1978) a fait remarquer que si les contraintes gouvernaient réellement le diamètre tangentiel des carottes, leur gradient devait s'accompagner d'un gradient de ce diamètre.

TABLEAU 1
Présentation du matériel expérimental
Presentation of the experiments

Matériel expérimental	1	2	3	4	5	6
Numéro de l'expérience	hêtre	hêtre	peuplier	<i>eucalyptus delegatensis</i>	hêtre	hêtre
Essence						
Lieu	laboratoire (simulation)	F.C. Epinal (Vosges)	Populetum national de Vineuil et F.D. Chambord (Loir-et-Cher)	Marysville Vic., Australie	F.D. Lyons (Normandie)	Nord-Est de la France
Problèmes à résoudre	1 - 3	1 - 2 - 4	1 - 2 - 4	1	3 - 4	4 - 5 - 6
Modalités étudiées	traction longitudinale	arbres droits de fil	3 clones			2 traitements ; 4 types de station ; 5 placettes/type ; 8 arbres/placette
Nombre total d'arbres	27	25	12	18	66	320
Nombre de carottes par arbre ..	2	2	2	29	3	3
Nombre total de carottes	54	50	24	1 ou 2	198	960
Position dans arbre ; hauteur (cm) (1)		1 ; 130 ; 230	1 et 3 ; 130	1 et 3 ; 130	1, 2 et 8 ; 130	1, 5 et 7 ; 130
Mesures extensométriques						
Mesures extensométriques L et appareil (ϵ_L)	jauges	capteur	capteur	capteur	néant	néant
Mesures extensométriques T et appareil (ϵ_T)	jauges	néant	néant	néant	néant	néant

Mesures physiques							
Diamètres tangential et axial, état saturé	Nombre de zones Coordonnées depuis l'écorce en mm ...	3	1	1	1	4	1
		5-15 ; 15-25 25-35	5-25	5-30	5-30	0-5 ; 5-15 ; 15-25 ; 25-35	5-30
Les mêmes diamètres, état sec à l'air (retraits RT et RL) ...							
Infradensité (Id) ...		+	+			+	+
Densité RX ...		+	+			+	*
Retrait radial (RR) ...							*
Modules d'Young	$\left\{ \begin{array}{l} EL \\ ET \\ ER \end{array} \right.$	+	+				
Coefficients de Poisson	$\left\{ \begin{array}{l} NU (LT) \\ NU (TL) \end{array} \right.$	+					
Mesures anatomiques							
Gros rayons ligneux	R	+					
Vaisseaux	V	+					
Fibres normales	N	+					
Fibres de bois de tension	T	+					
Largeur des cernes		+					
Mesures dendrométriques							
C _{1,30} ...							*
H _T (hauteur totale) ...							+
Hauteur de la base du houppier							+
Inclinaison ...							+
8 rayons du houppier							+
Fibre forse ...							+

(1) Position 1 : côté tendu ; positions 2 à 8 : rotations de 45° dans le sens horaire.

- + Mesures réalisées.
- Relevé approximatif.
- * A réaliser ultérieurement.

3.2. Questions à résoudre

Pour faire de cette méthode empirique un outil scientifique d'approche des contraintes de croissance, il fallait donc approfondir trois questions :

Question 1 : Quelles sont les propriétés du bois qui influent sur les diamètres des carottes ?

En effet, la contrainte longitudinale n'a aucune raison d'être la seule propriété à jouer un rôle !

Question 2 : De quelle manière la tarière influe-t-elle sur ces mêmes diamètres ?

Est-ce bien le biseau qui se déforme ?

Question 3 : Y a-t-il un gradient du diamètre tangentiel lié au gradient des contraintes ?

Si tel est le cas, le résultat de la mesure risquera d'être affecté par ce gradient, et perdra une partie de sa fiabilité.

Pour répondre à ces trois questions, ainsi qu'à celles relatives à l'influence de la conformation de l'arbre (question 4), de la station (question 5) et du traitement sylvicole (question 6), un certain nombre d'expériences ont été réalisées et sont présentées dans le tableau 1.

3.3. Démarche expérimentale

Une expérience, dite de simulation, a été réalisée au laboratoire afin de bien séparer les contraintes des autres sources de variation possibles. Des échantillons parallélépipédiques de hêtre (54 cm × 8 cm × 4 cm dans les directions L, T et R respectivement) étaient soumis dans une presse à une contrainte connue : soit une traction longitudinale, soit une compression tangentielle. On prélevait alors une carotte ; une deuxième carotte, considérée comme témoin, était ensuite prise à une distance fixe de la première, quelques minutes après la suppression de la charge.

Note

La dimension des échantillons a été déterminée principalement par la capacité de la presse et par l'impossibilité de prélever les carottes trop près l'une de l'autre et trop près des extrémités (pour éviter le fendage du bois). Il est certain que des pièces de cette taille tirées d'arbres très tendus renferment encore des contraintes non négligeables. Cependant, la comparaison des diamètres des deux carottes garde tout son intérêt.

On a ensuite fait plusieurs séries de prélèvements en forêt pour vérifier l'intérêt des résultats obtenus au laboratoire et pour répondre aux questions 4 à 6. Trois de ces expériences concernaient le hêtre, une les peupliers de culture, la dernière *Eucalyptus delegantensis*. Une attention particulière a été portée à l'anatomie du bois, qui a fait l'objet de mesures systématiques.

Dans ce premier article, on traitera des problèmes 1, 2 et 3. Un second article sera consacré aux trois autres problèmes dans le cas du hêtre, tandis qu'un troisième sera consacré à l'Eucalyptus.

Les méthodes de mesure utilisées sont expliquées ci-dessous.

3.4. Méthodes de mesure des propriétés physiques et mécaniques

3.4.1. Mesure des déformations, des constantes élastiques et des contraintes

Toutes les mesures de déformation ont été réalisées par des méthodes extensométriques :

— avec les extensomètres de GUENEAU & SAURAT (1974, *op. cit.*) pour les arbres sur pied (voir § 2),

— avec les jauges électriques collées sur l'échantillon dans la simulation. Ces jauges comportaient deux trames perpendiculaires, placées l'une dans la direction longitudinale, l'autre dans la direction tangentielle. Les déformations étaient mesurées entre l'instant qui précédait l'application de la charge et le moment où elles se stabilisaient, c'est-à-dire quelques minutes après la stabilisation de la charge.

Pour les expériences en forêt, les constantes élastiques ont été déduites de la vitesse de propagation des ultrasons dans les carottes de sondage. Cette méthode, proposée par BUCUR (1981), permet d'obtenir des modules d'YOUNG dans les trois directions d'anisotropie sans infliger de traumatisme à l'arbre. Dans la simulation en revanche, on a admis que la contrainte était égale au rapport de l'effort exercé par la presse à la section droite de l'échantillon. On a alors calculé la valeur du module d'YOUNG et du coefficient de POISSON (relatifs à la direction de sollicitation) d'après les déformations mesurées par les jauges.

3.4.2. Mesure des caractéristiques physiques

L'infradensité de toutes les carottes a été obtenue grâce aux valeurs des masses à l'état anhydre (m_0) et à la saturation intégrale (m_s) par la formule de KEYLWERTH (1954) :

$$I_{dt} = \frac{1}{\frac{m_s}{m_0} - 0,347}$$

De plus, la densité et ses composantes ont été mesurées au microdensitomètre sur les radiographies des carottes de peuplier dans l'expérience n° 4.

Les diamètres axial et tangentiel des carottes saturées d'eau ont été mesurés (au pas de 0,25 mm) sur des zones de 5 à 35 mm de long, selon les cas, avec l'appareil décrit au § 3.11. Par différence avec les mesures sur les mêmes carottes conditionnées à l'étuve, on a évalué les retraits longitudinal et tangentiel entre l'état saturé et 10 p. 100 de teneur en eau. Les valeurs de retrait radial ont été obtenues dans les mêmes conditions par des mesures au palmer, au centième de mm.

Ces retraits mesurés sur carottes ne sont pas identiques à ceux que l'on mesure sur cubes normalisés, qui sont eux-mêmes différents de ceux qui affectent des pièces de grandes dimensions. Cela est dû au fait que, lorsque la taille et la forme d'un échantillon changent, tous les paramètres qui influent sur ses changements de dimensions sont modifiés : le gradient d'humidité n'a plus la même répartition, donc les contraintes de séchage non plus ; la proportion de l'échantillon influencée par les

« conditions aux limites » varie également. Utiliser des carottes de sondage n'est donc qu'une des multiples manières de mesurer le retrait du bois, dont les avantages principaux sont la rapidité et l'absence de traumatisme infligé à l'arbre.

3.43. *Mesure des caractéristiques anatomiques*

On sait que les contraintes de croissance sont souvent associées à des modifications du plan ligneux, et en particulier à la présence de bois de tension chez les feuillus. C'est pourquoi, après la mesure des propriétés physiques, on a réalisé dans les carottes des coupes micrographiques de 20 microns d'épaisseur sur lesquelles les caractéristiques anatomiques suivantes ont été mesurées (en plus de la largeur des cernes) :

- surface occupée par les vaisseaux,
- surface occupée par les fibres normales,
- surface occupée par les fibres gélatineuses (bois de tension),
- éventuellement, surface occupée par les gros rayons ligneux.

Pour cela, on a utilisé un appareil (T.A.S.) spécialement conçu pour l'analyse de texture qui est capable de réaliser des transformations et des mesures des images, conformément à la théorie de la morphologie mathématique (SERRA, 1981).

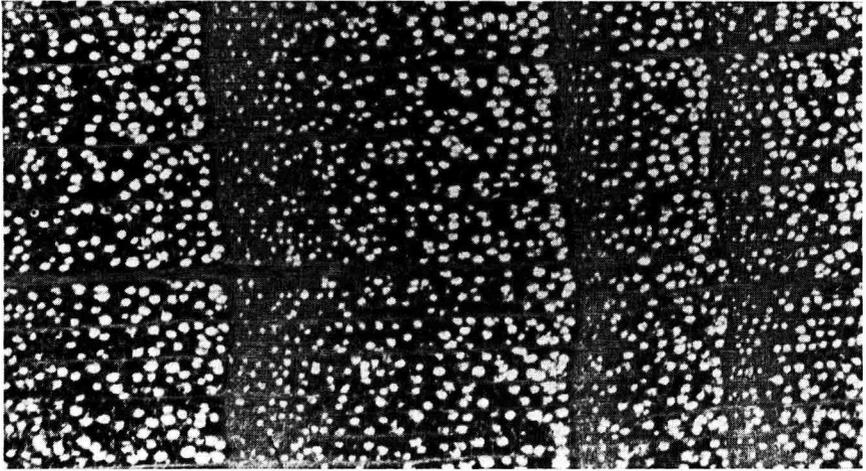
Il comprend une caméra vidéo adaptable sur un microscope doté d'objectifs respectant la planéité de l'image ; celle-ci transmet son signal à une unité de traitement d'image qui peut le digitaliser (possibilité de reconnaître 100 niveaux de gris appelés seuils), le transformer et le mesurer, à l'intérieur d'un masque imposé au choix de l'utilisateur. Les images digitales peuvent être stockées dans des « mémoires-image » de 256×256 points ; on peut alors obtenir une analyse individuelle des particules contenues dans les mémoires et réaliser des fonctions logiques entre les images placées en mémoire. Les images analogique et/ou digitale sont affichées sur un tube cathodique ; un crayon lumineux permet de tracer sur cet écran des lignes qui sont transférées dans une mémoire. Un calculateur commande l'ensemble, et l'utilisateur dispose, pour activer le système, d'un moniteur (console avec des boutons poussoirs), et surtout d'un clavier grâce auquel il programme la machine. Les résultats des mesures sont, au choix, affichés sur l'écran, ou bien transférés à un télétype ou à un ordinateur.

On a systématiquement employé de faibles grossissements afin de pouvoir étudier l'intégralité de la zone sur laquelle avaient été faites les mesures physiques. Ainsi, l'appareil travaillait sur des champs de 4×4 mm², et quatre à huit champs recouvraient l'ensemble de l'échantillon. Dans ces conditions, il n'était plus possible de compter des éléments anatomiques, comme dans les méthodes traditionnelles. C'est pourquoi une méthodologie de mesure a été spécialement étudiée pour chaque essence.

3.431. *Méthodologie pour le hêtre*

A l'échelle où les observations ont été réalisées, on distingue quatre types de tissus dans une coupe transversale de hêtre : vaisseaux, fibres normales, fibres gélatineuses et gros rayons ligneux. On a effectué une double coloration (bleu astra - safranine) qui fait ressortir en bleu la couche G des fibres de bois de tension, en rouge toutes les autres parois cellulaires. En interposant un filtre orange dans le

A



B

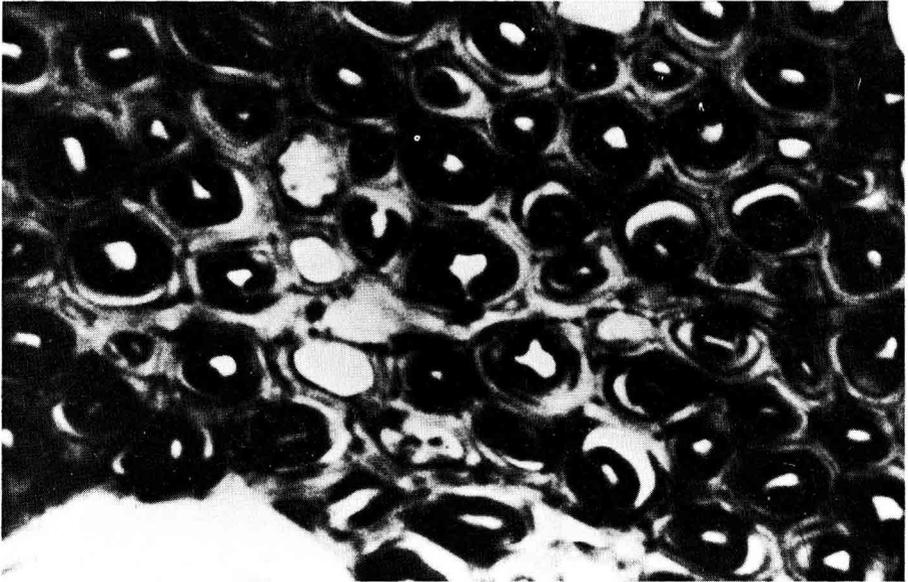


PHOTO 2

*Micrographie de bois de hêtre renfermant du bois de tension (dans bois initial)
Double coloration bleu astra-safranine. Observation avec un filtre orange.
Les parties gélatineuses apparaissent en sombre*

*A. Grossissement utilisé pour la mesure : 1 point image représente $16 \times 16 \mu\text{m}^2$.
Le grand cerne fait 2,3 mm de large*

B. Détail ; observer les décollements, circonvolutions et interruption des couches G

*Section of beech with tension wood (in early wood). Double stain astra blue - safranin.
Observed with an orange filter. The G layers are dark*

*A. Enlargement used for the measurement. 1 picture point is equivalent to $16 \times 16 \mu\text{m}^2$
The largest ring is 2,3 mm wide*

B. Detail (See the shape of the G layers)

système optique, on observe alors trois niveaux de gris différents (photo 2 A) qui peuvent être détectés par la machine : les lumens des vaisseaux sont clairs et les fibres de tension sont très sombres. Il ne reste plus qu'à séparer les fibres normales des gros rayons ligneux qui sont d'un même gris moyen. Pour cela, on place ces derniers en position horizontale sur l'écran et on utilise une mémoire-image (A) contenant alternativement une ligne noire et une ligne blanche. Des opérations logiques permettent alors de reconstituer les seuls rayons ligneux, qui sont ensuite mesurés les premiers.

On doit disposer dans une seconde mémoire (B) de « marqueurs » indiquant la position verticale des rayons. En reconstituant (A) à partir des marqueurs de (B), on obtient des lignes horizontales incluses dans les rayons. On reconstitue également l'inverse de (A) et la réunion des deux systèmes de lignes horizontales recouvre parfaitement les rayons. Les marqueurs peuvent être mis en place, au choix, avec le crayon électronique par l'opérateur, ou par une procédure entièrement automatique. Cette dernière consiste à afficher l'image (digitale) inverse de celle des vaisseaux, puis à compter combien il y a de points blancs sur chaque ligne de l'écran. Ce nombre N passe par un maximum très pointu et très proche de 256 dans chaque rayon ligneux. Le programme place alors dans la mémoire (B) des points blancs sur chaque ligne pour laquelle N est supérieur à une valeur choisie.

Par rapport aux méthodes traditionnelles de dénombrement, cette méthode a l'avantage de faire appel à un champ de mesure qui englobe plusieurs dizaines de milliers de cellules. On a donc la certitude d'échapper aux fluctuations locales très importantes qui affectent en règle générale le plan ligneux des arbres forestiers. De plus, malgré le faible grossissement employé, la machine ne compte pas pour une même surface des paquets de cellules gélatineuses d'une même étendue, mais dans lesquels la couche G a des épaisseurs différentes. Cela est conforme à la réalité de la structure du bois. De même, dans une zone où toutes les fibres sont gélatineuses, elles possèdent néanmoins des parois lignifiées (P et S1) qui occupent une bonne partie du plan ligneux (photo 2 B). Dans ce cas, la mesure à faible grossissement prouve sa fidélité puisqu'elle indique que la surface colorée en bleu (gris foncé sur la photo) occupe seulement 45 p. 100 du champ de mesure.

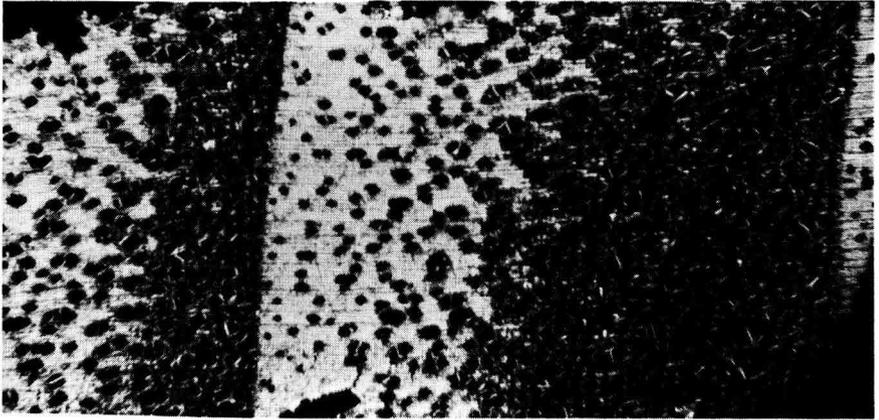
Ainsi utilisé, l'analyseur de texture fournit donc une mesure assez fiable de la proportion de matériau gélatineux renfermé dans les cellules du bois.

3.432. *Méthodologie pour le peuplier*

Les peupliers ne possèdent que des rayons ligneux paucisériés et sinueux qui ne sont pas détectables avec les méthodes utilisées ici. Pour les mesures, ce parenchyme radial n'a donc pas été distingué des fibres normales (on pourrait évaluer la proportion de rayons ligneux avec l'analyseur de texture en utilisant une coupe dans un plan longitudinal-tangentiel).

D'autre part, les couches gélatineuses sont beaucoup moins épaisses que celles du hêtre (photo 3 B) et se prêtent très médiocrement à la coloration par le bleu astra. Aussi une méthode complètement différente a-t-elle été mise en œuvre. Les coupes ont été colorées très légèrement au vert d'iode. Leur observation en lumière blanche a fourni la proportion de vaisseaux (lumens et parois) et celle de fibres, grâce à un programme qui ne fait appel à aucune intervention humaine.

A



B



PHOTO 3

*Micrographie de bois de peuplier renfermant du bois de tension.
Coloration légère au vert d'iode. Observation entre nicols croisés.
Les parties gélatineuses sont brillantes*

A. Grossissement utilisé pour la mesure : 1 point image représente $16 \times 16 \mu\text{m}^2$

B. Détail ; les couches G, très minces, sont couchées par la lame du microtome ; elles semblent donc épaisses d'un côté et inexistantes de l'autre

*Section of poplar with tension wood. Light iodine green stain.
Observation between crossed nicols. The G layers are shining*

A. Enlargement used for the measurement : 1 picture point is equivalent to $16 \times 16 \mu\text{m}^2$

B. Detail. The G layers are very thinn and the knife of the microtome lays them down

A cette fin, on fait réaliser par la machine une densitométrie complète de l'image, c'est-à-dire qu'elle mesure, à l'intérieur du masque imposé par l'opérateur, le nombre de points-image situés à chaque niveau de gris (ou seuil). Dans les conditions de l'expérience, le résultat se présente comme sur la figure 2. On identifie clairement trois zones qui coïncident avec les fibres, les parois des vaisseaux et les lumens de ces derniers (on a vérifié cette coïncidence en pratiquant un seuillage manuel). Le programme recherche alors le minimum local m dans la zone 2, et prend comme seuils limites entre les zones les abscisses des points d'intersection de la courbe avec une droite d'ordonnée 1,25 m. Ce nombre (1,25) a été choisi arbitrairement, mais comme m a une valeur faible (0,1 à 1 p. 100), cela n'a guère d'inconvénient. A quelques détails près, la même méthode s'applique à l'Eucalyptus. Ces opérations durent environ 10 secondes par champ de mesure de $4 \times 4 \text{ mm}^2$.

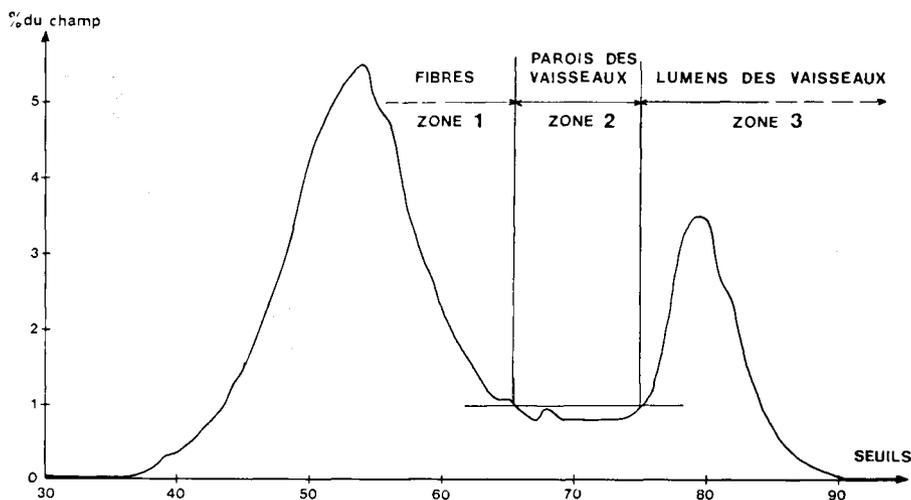


FIGURE 2

*Résultat typique d'une densitométrie optique différentielle
d'une coupe micrographique de peuplier observée en lumière blanche*

*Typical result of an optical densitometry performed on a microscopic section
of poplar observed with white light*

Ensuite, on intercale de part et d'autre de la préparation un polariseur et un analyseur (croisés); les parties gélatineuses du plan ligneux qui sont cellulosiques, donc cristallines, apparaissent en clair sur fond sombre, comme sur la photo 3 A. Il est alors très facile de les détecter et de mesurer leur surface.

Cette méthode est encore plus rapide que celle utilisée avec le hêtre, non seulement grâce à l'automatisation très poussée, mais encore parce que la coloration des coupes est simplifiée. De plus, la double coloration fournit des couleurs assez variables,

qui ne se prêtent pas toutes également bien à la détection. C'est pourquoi il y aurait finalement intérêt à utiliser la méthodologie mise au point pour le peuplier avec toutes les espèces dont le plan ligneux l'autorise.

IV. - Résultats

Les résultats qui ont été obtenus sont regroupés par thèmes qui correspondent aux questions posées au § 3.2.

4.1. *Contraintes de croissance, propriétés du bois et diamètres des carottes*

4.11. *Le hêtre*

4.111. *Résultats de l'expérience de simulation*

Dans l'expérience de simulation, on a étudié séparément l'influence sur les diamètres des carottes des contraintes (longitudinale et tangentielle), et celle de l'ensemble des autres variables. Avec les arbres sur pied, on ne peut que constater des résultats, sans pouvoir les attribuer à une cause déterminée. C'est pourquoi il était nécessaire d'imposer au laboratoire des charges contrôlées et de mesurer l'influence de l'application de ces efforts sur les diamètres des carottes. Le problème était de savoir quelles valeurs choisir pour ces charges. Dans la direction longitudinale, GUENEAU & SAURAT (1974, *op. cit.*) avaient réalisé 430 mesures sur des hêtres en France. Ils avaient trouvé au maximum une déformation relative de $4\,000 \cdot 10^{-6}$ (s.d.). En revanche, la littérature ne fournit pas de valeurs des déformations potentielles dans la direction tangentielle.

Seul THIERCELIN (communication personnelle, 1978) avait réalisé, dans une parcelle de futaie de hêtres des basses Vosges, une vingtaine de mesures avec des jauges croisées ; les résultats en sont présentés sur la figure 3. Les déformations tangentielles atteignent presque $10\,000 \cdot 10^{-6}$ (s.d.) et, à une exception près, sont environ deux fois plus élevées que les déformations longitudinales.

Sur la foi de ces résultats, les déformations imposées avec la presse ont donc été comprises entre 0 et $3\,000 \cdot 10^{-6}$ pour la traction longitudinale, et 0 et $10\,000 \cdot 10^{-6}$ pour la compression tangentielle. Les échantillons provenaient d'arbres fraîchement abattus, immédiatement sciés et rabotés, puis conservés dans l'eau. Dans ces conditions, les contraintes correspondant aux déformations maximales étaient respectivement de 28 MPa et 6,5 MPa environ.

Le tableau 2 donne les valeurs maximales et minimales prises par les diamètres moyens des carottes, ainsi que les coefficients de corrélation avec les variables physiques et anatomiques (diamètres moyens entre 5 et 35 mm de profondeur dans l'échantillon). Le nombre de degrés de liberté n'est pas toujours égal au nombre

d'échantillons moins deux, car certaines mesures n'ont pas pu être réalisées, à cause du décollement des jauges par exemple. Pour alléger la présentation, il n'a été fait mention que des symboles suivants :

- * Significatif au risque 5 pour cent.
- ** Significatif au risque 1 pour cent.
- *** Significatif au risque 1 pour mille.
- NS Non significatif.

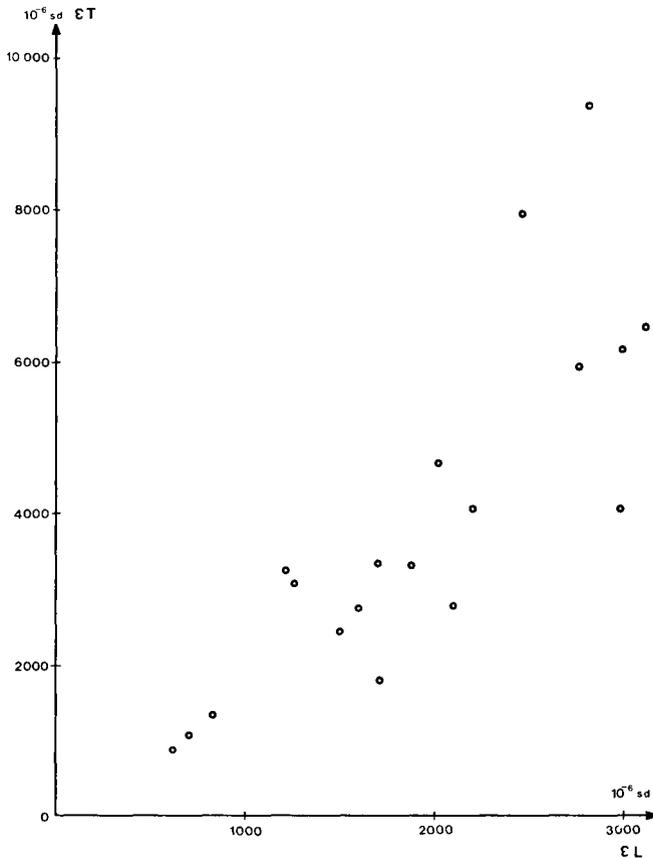


FIGURE 3

Valeurs des déformations potentielles longitudinales et tangentielles mesurées en un même point sur des hêtres
(THIERCELIN, communication personnelle, 1978)

Values of the tangential and longitudinal growth strains measured in the same point on beech trees
(THIERCELIN, personal communication, 1978)

TABLEAU 2

Expérience n° 1. Diamètres des carottes témoins. (Voir texte; valeurs de $r \times 1000$)
 Experiment no. 1. Diameter of the « control » cores. (See text; r values $\times 1000$)

Dia- mètre étudié (++)	mini- mum (μm)	maxi- mum (μm)	Infra- densité Id	Retrait tangential RT	Retrait longitudi- nal RL	Module d'Young E (+)	Coeffi- cient de Poisson NU (+)	% de rayons ligneux R	% de vais- seaux V	% de fibres normales N	% de fibres de tension T	Direction d'applica- tion de la charge (+++)	Nombre d'échan- tillons
	4 902	4 959	-429 **	-474 **	-646 ***			444 **	436 **	373 *	-752 ***	Néant	38
TG.O						-484 (l) * NS (t)	-434 (l) * NS (t)					(l) (t)	27 21
	4 942	4 984	-737 ***	-679 ***	-565 *			246 NS	710 ***	-294 NS	-291 NS	Néant	38
AX.O						NS (l) NS (t)	NS (l) NS (t)					(l) (t)	27 21

(+) Variable mesurée par rapport à la direction d'application de la charge.

(++) AX = diamètre axial; TG = diamètre tangential; O = hors charge (carotte témoin).

(+++) l = traction longitudinale, 27 échantillons; t = compression tangentielle, 21 échantillons; néant = carottes « témoin », 38 carottes.

4.1111. *Diamètre hors charge*

Dans les expériences antérieures, on ne pouvait pas comprendre le signe de la corrélation entre le diamètre tangentiel de la carotte et de la déformation potentielle mesurée sur l'arbre. Mais, autant que ce signe, l'amplitude des valeurs prises par les diamètres était inexplicable : 100 à 150 μm pour le diamètre tangentiel et 40 à 50 μm pour le diamètre axial, alors qu'un calcul rapide avec les plus grandes valeurs mesurées par THIERCELIN, et GUENEAU & SAURAT donne comme déformations maximales 60 μm et 20 μm (dans les directions T et L respectivement) pour le bois d'une carotte lorsqu'il est soustrait à l'effet des contraintes de croissance par une tarière de 5 mm de diamètre.

Le tableau 2 montre que, même en l'absence de charge sur les échantillons, les diamètres des carottes varient beaucoup. Les coefficients de corrélation renseignent sur l'origine de ces variations :

— pour le diamètre tangentiel, c'est principalement la proportion de fibres gélatineuses ($r = -0,752^{***}$),

— pour le diamètre axial, c'est surtout la proportion de vaisseaux ($r = 0,710^{***}$).

De plus, on note d'autres liaisons significatives, en particulier avec les variables physiques (Id, RT, RL). Les plus étroites d'entre elles peuvent être interprétées comme des conséquences des corrélations qui existent entre les propriétés anatomiques et physiques (tableau 3).

TABLEAU 3

Expérience n° 1. Corrélations entre caractéristiques physiques et anatomiques ($r \times 1\ 000$)
Experiment no. 1. Correlations between physical and anatomical properties ($r \times 1\ 000$)

	Id Infra- densité	RT Retrait tangentiel	RL Retrait longitudinal	E (+) Module d'Young	NU (+) Coefficient de Poisson
R % rayons ligneux	— 336*	— 286 NS	— 391*	l : — 135 NS t : 237 NS	l : — 205 NS t : + 252 NS
V % vaisseaux	— 754***	— 583***	— 365*	l : — 245 NS t : — 257 NS	l : — 77 NS t : — 16 NS
N % fibres normales	249 NS	— 33 NS	— 515***	l : — 31 NS t : 599**	l : — 445* t : + 13 NS
T % fibres de tension	373*	523***	839***	l : 271 NS t : — 465*	l : + 522** t : — 3 NS
Nombre de carottes (+++)	38	38	38	l : 27 t : 21	l : 27 t : 21

Notations (+) et (+++) : voir tableau 2.

Ainsi la présence de fibres gélatineuses apparaît-elle comme le facteur qui explique à la fois l'amplitude et le signe des variations du diamètre tangentiel (voir figure 4). Malheureusement, le matériel expérimental ne comportait que cinq échantillons renfermant du bois de tension, ce qui empêche de réaliser une analyse statistique plus élaborée.

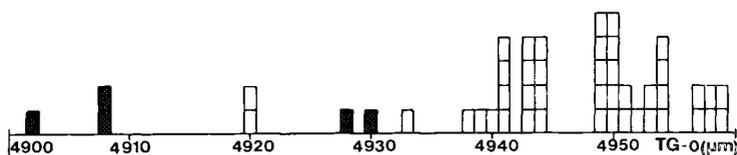


FIGURE 4

Expérience n° 1 (hêtre). Valeurs du diamètre tangentiel TG.O (en l'absence de charge)

En noir : échantillons renfermant du bois de tension.

En blanc : échantillons sans bois de tension.

Experiment no. 1 (beech). Value of the tangential diameter TG.O (without external stress)

In black : samples with tension wood.

In white : samples without tension wood.

4.1112. Différence entre diamètres avec et sans charge

Pour chaque direction d'application de l'effort, les diamètres des deux carottes (prélevées en charge et hors charge dans chaque échantillon) ont été comparés grâce au test dit des « moyennes appariées », dont la statistique est un aléa de Gauss (tableau 4).

L'amplitude et le sens des variations sont parfaitement conformes à ce que laisse prévoir un raisonnement simple sur le comportement élastique du bois. De plus, l'examen des corrélations montre que le diamètre tangentiel réagit fortement aux sollicitations tangentielles, un peu aux sollicitations longitudinales. En revanche, le diamètre axial n'est influencé que par la tension longitudinale. Ces différences sont certainement à mettre en relation avec les valeurs moyennes mesurées des modules d'Young d'une part ($E_L = 12\,550$ MPa ; $E_T = 735$ MPa) et des coefficients de Poisson d'autre part ($\nu_{L,T} = 0,590$; $\nu_{T,L} = 0,075$).

4.112. Résultats de l'expérience n° 2 en forêt

En forêt, les contraintes de croissance ne peuvent être séparées des autres propriétés du bois comme dans l'expérience dont il vient d'être rendu compte. On sait en particulier que le bois de tension est souvent associé à des contraintes élevées. L'expérience n° 2, réalisée sur 50 hêtres en forêt d'Epinal, était donc le complément nécessaire à la simulation effectuée au laboratoire, afin de vérifier les résultats obtenus.

En forêt, pour obtenir des valeurs comparables des déformations potentielles d'une part, et des diamètres des carottes d'autre part, on procède dans cet ordre :

- collage du capteur d'extensométrie. Mesure du « zéro » de la déformation,
- prélèvement d'une carotte quelques centimètres au-dessus du capteur,

TABLEAU 4

Expérience n° 1. Différence entre les diamètres des carottes prises en charge et ceux des carottes témoins

Experiment no. 1. Difference between diameters of the increment cores taken with and without external stress

Diamètres étudiés (+ +)	Sollicitation longitudinale (27 échantillons)				Sollicitation tangentielle (21 échantillons)							
	Moyenne (μm)	Valeur absolue maximum (μm)		Test de moyennes appariées	Corrélations $r \times 1000$		Moyenne (μm)	Valeur absolue maximum (m)		Test de moyennes appariées	$r \times 1000$ Corrélations	
		expéri- mentale	calculée	ϵ_L	ϵ_T			expéri- mentale	calculée		ϵ_L	ϵ_T
TG:CH-0	6,5	34	9	3,97***	381*	373 NS	31,8	57	50	11,52***	759***	804***
AX:CH-0	— 4,1	17	15	— 2,96**	— 504**	— 353 NS	0,3	15	4	0,22 NS	— 81 NS	— 212 NS

Notations (+ +) : voir tableau 2.

CH = en charge (carotte prise dans l'échantillon en charge).

CH-O = différence entre la carotte CH et la carotte O.

TABLEAU 5

Expérience n° 2. Corrélations ($r \times 1\ 000$). 50 échantillons
 Experiment no. 2. Correlations ($r \times 1\ 000$). 50 samples

	ϵ_L	R	V	N	T	Id	RT	RL	TG
Déformation longitudinale (ϵ_L)	1 000								
% de rayons (R)	-457 **	1 000							
% de vaisseaux (V)	-311 *	-336 *	1 000						
% de fibres normales (N)	-338 *	310 *	-244 NS	1 000					
% de fibres de tension (T)	640 ***	-476 ***	-241 NS	-807 ***	1 000				
Infradensité (Id)	242 NS	50 NS	-694 ***	58 NS	335 *	1 000			
Retrait tangentiel (RT)	144 NS	176 NS	-397 **	18 NS	142 NS	223 NS	1 000		
Retrait longitudinal (RL)	677 ***	-232 NS	-479 ***	-237 NS	569 ***	391 **	301 *	1 000	
Diamètre tangentiel (TG)	-672 ***	426 **	234 NS	261 NS	-527 ***	-223 NS	-90 NS	-463 ***	1 000
Diamètre axial (AX)	-560 ***	106 NS	302 *	430 **	-572 ***	-267 NS	-257 NS	-397 ***	520 ***

- forage des deux trous de 30 mm de diamètre, dont l'un englobe de trou de carottage,
- mesure de la déformation.

Le tableau 5 donne les coefficients de corrélation entre les diamètres des carottes, les variables anatomiques et physiques, ainsi que la déformation longitudinale.

Il apparaît que le diamètre tangentiel, le retrait longitudinal et le pourcentage de fibres des tensions (ainsi que le diamètre axial, mais à un moindre degré) sont très liés à la déformation longitudinale. Les variables anatomiques reliées significativement au diamètre tangentiel sont les fibres de tension et les rayons ligneux ; avec le diamètre axial, ce sont les fibres de tension et les fibres normales. La seule variable physique corrélée avec les diamètres des carottes est le retrait longitudinal. (Parmi les trois modules d'YOUNG, qui n'apparaissent pas dans le tableau, seul E_L est lié au diamètre tangentiel : $r = -0,403^{**}$.)

La figure 5 montre les variations du diamètre tangentiel TG en fonction de la déformation longitudinale ϵ_L ; malgré un coefficient de corrélation significatif au risque un pour mille, la dispersion est assez importante.

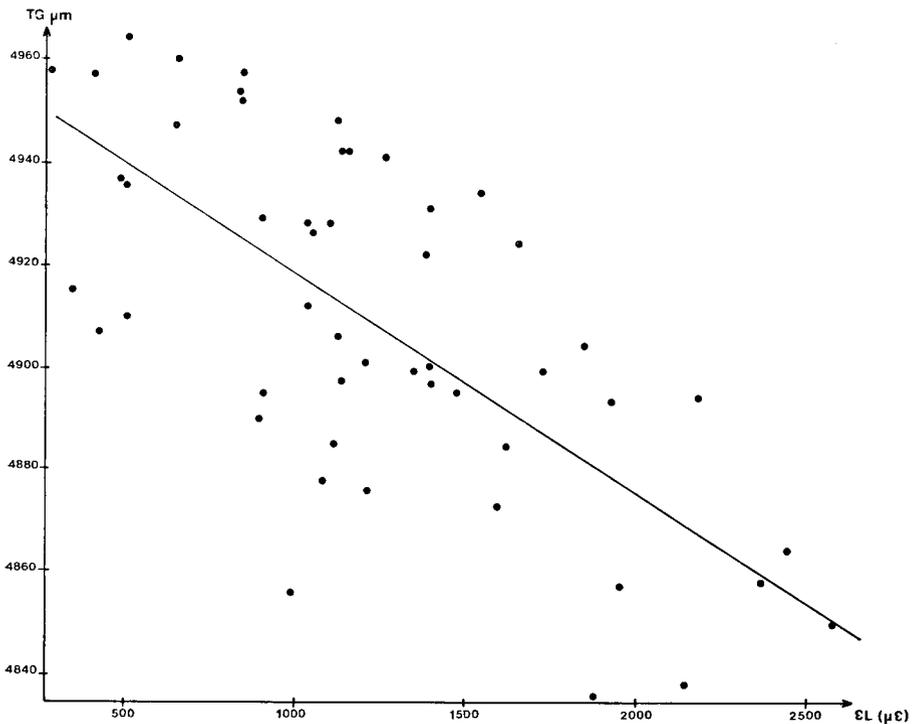


FIGURE 5

Expérience n° 2 (hêtre). Liaison entre déformation potentielle longitudinale (ϵ_L) et diamètre tangentiel des carottes (TG) ; $r = -0,672$

Experiment no. 2 (beech). Liaison between ϵ_L and TG ; $r = -0.672$

On pourrait donc redouter que TG ne soit largement influencé par un ensemble d'autres paramètres que ε_L , ce qui enlèverait de l'intérêt à cette méthode pour estimer les contraintes de croissance. Pour s'assurer de l'absence d'un tel risque, on a entrepris deux démarches. La première consiste à étudier quelle amélioration de l'estimation de ε_L apporte un calcul en régression progressive. Il s'avère que cette amélioration est faible : la variance résiduelle n'est que peu diminuée. De plus, si le coefficient de corrélation simple reliant ε_L à TG garde la même valeur dans des expériences différentes ($r = -0,68$ au § 3.1 ; $r = -0,67$ ici), en régression progressive les autres variables n'interviennent pas de la même manière dans tous les cas. Cela enlève toute généralité à chaque formule de régression multiple, même si elle est la meilleure possible dans le cadre d'une étude particulière. Il ne semble donc pas adéquat de fonder une méthode générale d'estimation des contraintes sur une équation de régression multiple.

La seconde démarche a été de réaliser une analyse en composantes principales (ACP) afin d'obtenir une représentation synthétique de toutes les liaisons. Dans l'espace des variables, TG, AX, T et ε_L sont toutes très significativement corrélées avec la première composante qui absorbe une grande partie de l'inertie, et très indépendantes des composantes suivantes. Cela permet de penser qu'aucune des autres variables mesurées ne risque d'entraîner de grosses fluctuations de TG. En d'autres termes, on peut dire que rien ne vient infirmer l'interprétation donnée plus haut pour le tableau 5.

Enfin, on a représenté séparément sur la figure 6 les échantillons avec et sans bois de tension : lorsqu'il n'y a pas de bois de tension (16 des 50 carottes), la valeur de ε_L est toujours faible et celle de TG toujours forte ; de plus, pour ces 16 carottes, la corrélation entre ε_L et TG n'est pas significative. Cela confirme bien le rôle du bois de tension.

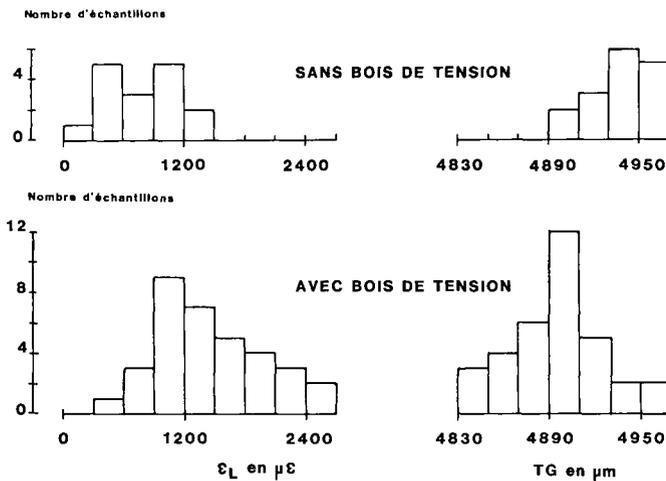


FIGURE 6

Expérience n° 2 (hêtre). Diamètre tangentiel (TG) et déformation potentielle longitudinale (ε_L) des échantillons avec et sans bois de tension

Experiment no. 2 (beech). Values of TG and ε_L for the samples with and without tension wood

Ainsi, l'ensemble des données recueillies sur le bois de hêtre au cours des expériences n^{os} 1 et 2 permet de dégager les conclusions suivantes :

— parmi les grandeurs mesurables sur carottes de sondage, le meilleur indicateur de la déformation potentielle longitudinale (ε_L) est le diamètre tangentiel (TG), suivi de près par le retrait longitudinal (RL), et de beaucoup plus loin par le diamètre axial (AX),

— l'amplitude importante des variations des diamètres des carottes et le signe négatif de leurs corrélations avec ε_L sont dus aux liaisons étroites qui existent entre la quantité de bois de tension et la valeur de ε_L d'une part, celles de TG et AX d'autre part.

Au cours de cette étude, les caractéristiques anatomiques du bois se sont affirmées comme des variables très explicatives de l'ensemble des propriétés du matériau. LECLERCQ (1979) et ORS (1977) avaient déjà mis ce fait en évidence avec le hêtre. Il est plus que probable qu'il en aille de même avec les autres essences ; la prise en compte de l'anatomie, rendue possible par des appareils tels que l'analyseur de texture, est donc de nature à faire progresser rapidement les connaissances sur le bois.

4.12. *Le peuplier*

Le peuplier est en France la deuxième essence concernée par les contraintes de croissance. Celles-ci atteignent un niveau élevé, surtout du côté tendu (1), chez les clones à phototropisme marqué par exemple. Les arbres tendus se rencontrent donc le plus souvent en bordure des plantations, ou en alignement lorsqu'un écran latéral intercepte la lumière. D'autre part, le bois de tension du peuplier est particulièrement pelucheux, et par là même impropre à tous les usages où l'état de surface possède une certaine importance.

Enfin, l'intérêt d'une méthode de mesure indirecte des contraintes est d'autant plus grand pour cette essence que son bois tendre se prête fort mal au collage des appareils d'extensométrie ; celui-ci est vraiment impossible pendant toute la période de croissance, et demeure peu pratique aux autres saisons.

L'expérience n^o 3, réalisée dans deux populeta du Loir-et-Cher a permis de tester la méthode d'estimation des contraintes sur carottes de sondage. On observe des liaisons encore meilleures que pour le hêtre ($r = -0,76$ entre ε_L et TG) et le rôle du bois de tension apparaît comme étant encore plus marqué avec le peuplier car les coefficients de corrélation sont encore plus élevés (tableau 6). De plus, l'amplitude de variation du diamètre tangentiel est très grande : 175 μm pour une déformation relative de moins de $2\,000 \cdot 10^{-6}$ s.d. (figure 7).

Comme pour le hêtre, on a effectué des régressions linéaires multiples dont l'intérêt s'est avéré faible. De plus, une analyse en composantes principales a montré que les caractéristiques du bois de peuplier s'organisent en deux grands groupes largement indépendants, l'un s'apparentant à la densité du bois, l'autre aux contraintes de croissance et incluant TG et T. Enfin, on a réalisé une analyse des corrélations canoniques pour savoir si certaines caractéristiques anatomiques permettaient de prévoir

(1) Chez les feuillus, lorsqu'un arbre penche, on appelle « côté tendu » la partie supérieure du tronc.

TABLEAU 6

Expérience n° 3. Corrélations ($r \times 1\ 000$). 24 échantillons
 Experiment no. 3. Correlations ($r \times 1\ 000$). 24 samples

	TG	RT	AX	RL	ϵ_L	T	V	PV	N	D. EST
Diamètre tangentiel (TG)	1 000									
Retrait tangentiel (RT)	- 92 NS	1 000								
Diamètre axial (AX)	348 NS	193 NS	1 000							
Retrait longitudinal (RL)	- 729 ***	412 *	116 NS	1 000						
Déformation longitudinale (ϵ_L)	- 768 ***	390 NS	- 34 NS	868 ***	1 000					
Proportion de fibres de tension (T)	- 759 ***	303 NS	- 73 NS	785 ***	766 ***	1 000				
Proportion de lumens de vaisseaux (V)	366 NS	- 190 NS	- 18 NS	- 498 *	- 471 *	538 **	1 000			
Proportion de parois de vaisseaux (PV)	446 *	- 154 NS	150 NS	- 428 *	- 531 **	- 364 NS	318 NS	1 000		
Proportion de fibres normales (N)	687 ***	- 266 NS	59 NS	- 632 ***	- 645 ***	- 937 ***	261 NS	116 NS	1 000	
Densité moyenne (D. EST) (19 échantillons seulement)	- 91 NS	261 NS	373 NS	196 NS	135 NS	207 NS	- 638 **	- 153 NS	- 30 NS	1 000

certaines caractéristiques physiques du bois. On a trouvé qu'une combinaison linéaire des variables anatomiques (où T joue le rôle principal) permet de prédire avec une corrélation de $r = 0,973$ une combinaison linéaire des variables physiques (où TG et RL jouent le rôle principal). Il est intéressant de noter que ϵ_L , qui ne faisait pas partie de l'analyse, est très fortement corrélé ($r = 0,790$ et $0,808$) avec ces deux combinaisons linéaires.

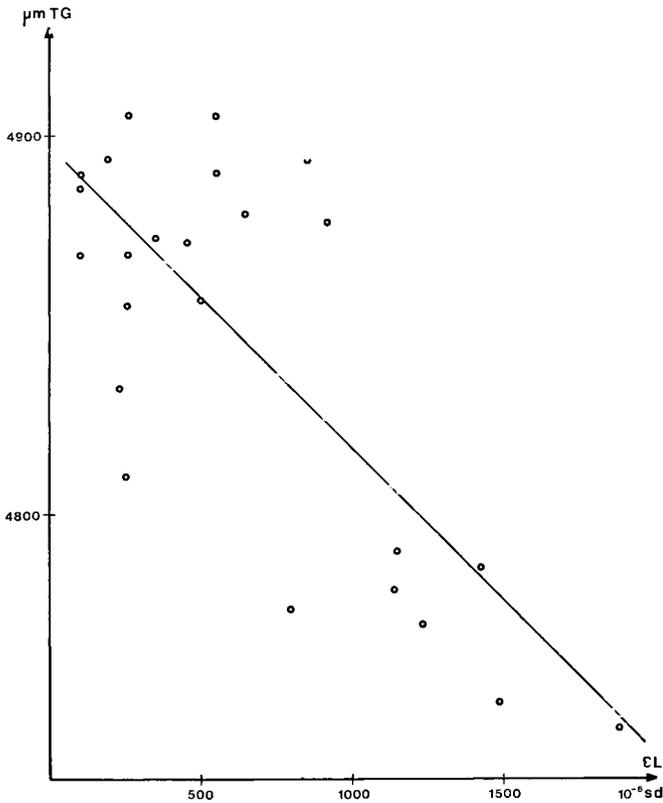


FIGURE 7

Expérience n° 3 (peuplier). Liaison entre déformation potentielle longitudinale (ϵ_L) et diamètre tangentiel des carottes (TG); $r = -0,768$

Experiment no. 3 (poplar). Liaison between ϵ_L and TG; $r = -0.768$

Tout cela confirme l'analyse du tableau 6 faite plus haut, ainsi que l'impression qui se dégage de la figure 7 où les échantillons à faibles valeurs de TG et à fortes valeurs de ϵ_L sont justement ceux qui renferment beaucoup de bois de tension. L'association « contraintes de croissance - bois de tension - faible diamètre tangentiel » est véritablement très étroite chez le peuplier.

4.13. *L'Eucalyptus*

L'Eucalyptus n'a qu'une extension minimale en France. Cependant, ce genre possède une importance économique énorme dans le monde et connaît de graves problèmes de contraintes de croissance. Il était donc intéressant de vérifier que la méthode s'appliquait également aux Eucalyptus, d'autant plus que la structure de leur bois est différente ; en particulier, on observe une sorte de transition (fibres normales — fibres à parois épaisses — fibres gélatineuses) qui n'existe pas chez d'autres espèces (NICHOLSON *et al.*, 1965). De plus, la couche G n'est jamais aussi séparée des autres couches que chez le peuplier ou le hêtre.

Cependant, un premier résultat expérimental obtenu en Australie dans un jeune peuplement naturel d'*Eucalyptus delegatensis* s'avère très semblable à ceux obtenus en France avec le hêtre : amplitude des variations du diamètre tangentiel de $106 \mu\text{m}$ (pour $\varepsilon_L \leq 1\,600 \mu\text{E}$) et $r = -0,759^{***}$ entre ces deux variables (29 échantillons). La méthode semble donc s'appliquer parfaitement à cette espèce.

4.2. *Influence des propriétés de la tarière sur les diamètres des carottes*

La deuxième question qu'on se proposait d'aborder était celle de l'influence des propriétés de la tarière sur les diamètres des carottes. En particulier, l'hypothèse de déformation du biseau avancée par POLGE & THIERCELIN, 1979 (*op. cit.*) est-elle valable ?

On vient de voir que, plutôt que cette hypothèse, la présence de bois de tension permet d'expliquer le signe de la liaison entre le diamètre tangentiel des carottes et la déformation potentielle mesurée sur l'arbre. Néanmoins, l'expérimentation a été poussée plus loin, puisque dans les expériences n° 2 et 3, on a utilisé une tarière nitrurée. La nitruration est un traitement thermique effectué en présence d'azote, dont le résultat est de conférer une dureté très grande à l'acier, sur une profondeur de quelques centièmes de millimètres. Si le biseau d'une tarière ordinaire se déformait vraiment lors du prélèvement des carottes, on observerait une différence avec les résultats fournis par la tarière nitrurée, dont le biseau possède une rigidité bien supérieure. Or tel n'est pas le cas.

50 carottes ont été prélevées dans les hêtres de l'expérience n° 2, à 2,30 m, soit un mètre au-dessus du niveau des mesures des déformations longitudinales, sur la même génératrice. L'étendue de la variation du diamètre tangentiel est exactement la même qu'avec la tarière ordinaire utilisée à 1,30 m, et la corrélation avec la déformation mesurée à 1,30 m prend une valeur à peine plus faible : $r = -0,614$ (on peut expliquer cette diminution par le fait que le prélèvement a été fait plus loin de la mesure de déformation).

D'autre part, les résultats de l'expérience n° 3 ont tous été obtenus avec cette même tarière nitrurée, et montrent une variabilité encore supérieure des diamètres tangentiel et axial des carottes de peuplier ($175 \mu\text{m}$ pour TG, soit 3,5 p. 100 du diamètre qui vaut environ 5 mm).

Par conséquent, il faut considérer que la déformation éventuelle du biseau de la tarière ne joue aucun rôle dans la formation des diamètres des carottes de sondage. C'est plutôt le bois qui se déforme en avant du biseau avant d'être sectionné

par celui-ci. Cela explique que le peuplier, dont le bois est plus tendre que celui du hêtre, fournisse une amplitude de variation des diamètres supérieurs. La forme générale de l'extrémité de la tarière doit influencer aussi sur cette déformation du bois, puisqu'on observe des différences de résultats entre des tarières différentes utilisées dans des conditions expérimentales comparables (POLGE & THERCELIN, 1979, *op. cit.*).

4.3. *Influence de la profondeur dans l'arbre sur les diamètres des carottes*

La troisième question à aborder pour obtenir la certitude que le diamètre tangentiel des carottes de sondage fournit une estimation intéressante de la déformation potentielle longitudinale est liée au gradient des contraintes de croissance. En effet, les contraintes varient beaucoup lorsqu'on s'enfonce dans le tronc. Or on a vu que, même si le bois de tension est la première cause de variation du diamètre tangentiel des carottes, l'application d'une charge peut modifier ce même diamètre (§ 4.1112). On peut donc redouter un effet parasite du gradient des contraintes, puisqu'on mesure habituellement le diamètre tangentiel sur une profondeur de 20 à 25 mm.

Pour tester un éventuel effet de la profondeur entre 0 et 35 mm depuis l'écorce, on a réalisé des mesures du diamètre tangentiel sur quatre zones différentes :

- zone 1, de 0 à 5 mm depuis l'écorce (soit 20 mesures au pas de 0,25 mm),
- zone 2, de 5 à 15 mm depuis l'écorce (soit 40 mesures au pas de 0,25 mm),
- zone 3, de 15 à 25 mm depuis l'écorce (soit 40 mesures au pas de 0,25 mm),
- zone 4, de 25 à 35 mm depuis l'écorce (soit 40 mesures au pas de 0,25 mm).

Puis on a testé l'égalité du diamètre tangentiel moyen dans ces quatre zones avec le test des moyennes appariées. Le matériel d'expérimentation comportait les 48 carottes « témoin » de l'expérience de simulation d'une part, et trois séries de 49 carottes prélevées en forêt dans l'expérience n° 5. Ces dernières ont été prises dans 49 hêtres, du côté tendu (carotte B), et à 45° de part et d'autre (carottes A et C).

Le tableau 7 montre que, en l'absence de charge, les diamètres tangentiels moyens des zones 2 à 4 ne sont pas significativement différents. Il n'y a donc pas, à ces profondeurs, d'influence de la pénétration de la tarière sur le diamètre tangentiel.

D'autre part, la zone 1 est toujours très différente des autres : un examen rapide des vingt mesures individuelles dans cette zone révèle presque systématiquement une forte diminution du diamètre tangentiel quand on progresse de l'écorce vers le cœur. La différence de diamètre, environ 40 μm , entre les zones 1 et 2, est énorme : on peut penser qu'il s'agit d'un effet de bord affectant le processus de coupe au début de la pénétration de la tarière.

Lorsqu'on s'enfonce plus avant dans la carotte, la zone 4 n'est jamais différente de la 3, et une seule fois de la 2. En revanche, les zones 3 et 2 se distinguent deux fois sur trois. De plus, la zone 1 est d'autant plus inintéressante à mesurer qu'elle fournit des valeurs presque constantes du diamètre tangentiel : elle ne permet pas de distinguer les trois carottes prises dans deux situations différentes. Il n'en va pas de même de la zone 2 qui discrimine très bien ces deux situations. La zone 3 les différencie également, et la zone 4 ne les distingue plus que dans un cas sur deux (au sens du test statistique utilisé ici. Mais l'écart de 11 μm entre les zones 4 des carottes A et B possède bien le signe attendu).

TABLEAU 7

Variations du diamètre tangentiel avec la profondeur

Variation of the tangential diameter with the depth (distance from bark)

N° Expérience	5						
	1	2	3	4	5		
	Carotte « témoin »	Carotte A	Différences significatives entre A et B	Carotte B	Différences significatives entre B et C	Carotte C	Différences significatives entre C et A
Diamètre tangentiel moyen zone 1 (µm)	non mesuré	4 944	NS	4 937	NS	4 945	NS
Diamètre tangentiel moyen zone 2 (µm)	4 947	4 904	**	4 890	***	4 909	NS
Diamètre tangentiel moyen zone 3 (µm)	4 945	4 896	*	4 882	*	4 899	NS
Diamètre tangentiel moyen zone 4 (µm)	4 940	4 895	NS	4 884	*	4 899	NS
		Carotte A		Carotte B		Carotte C	
	2 3	1 2 3		1 2 3		1 2 3	
	3 NS	***		2 ***		2 ***	
	4 NS	*** *		3 ***	NS	3 ***	***
		*** NS NS		4 ***	NS	4 ***	*
Différences significatives entre zones		4 905	*	4 895	**	4 907	NS
Moyenne des 4 zones							

En conclusion, on peut donc dire que :

- le diamètre tangentiel des carottes est très élevé et peu variable dans les cinq premiers millimètres à partir de l'écorce,
- il offre une bonne sensibilité aux variations de ε_L lorsqu'on réalise la mesure sur un tronçon de carotte de 20 à 30 mm en commençant à 5 mm de l'écorce.

Les différences mesurées à ces profondeurs entre les zones 2, 3 et 4 sont inférieures à 10 microns et ne présentent pas d'inconvénient majeur, puisqu'elles vont systématiquement dans le même sens : légère diminution du diamètre quand la profondeur augmente. Elles ne risquent donc pas de changer le classement que l'on cherche à mettre en évidence. Signalons enfin que, faute d'avoir réalisé des mesures anatomiques, on ne peut rejeter l'hypothèse selon laquelle ces fluctuations seraient le reflet de celles de la proportion de bois de tension.

4.4. - Bilan récapitulatif

Le bilan des résultats exposés au chapitre 4 est globalement positif, puisque :

- on a confirmé l'existence de la liaison découverte par POLGE & THIERCE-LIN (1979, *op. cit.*) entre le diamètre tangentiel des carottes et la déformation potentielle longitudinale,
- on a montré que son signe négatif est dû à la présence du bois de tension associé aux contraintes de croissance,
- on a trouvé avec le hêtre et le peuplier qu'une deuxième variable est très étroitement corrélée avec la déformation longitudinale. Il s'agit du retrait longitudinal mesuré sur carotte de sondage, qui est lui aussi commandé par la proportion de bois de tension,
- rien ne permet de penser que le biseau de la tarière se déforme pendant le prélèvement des carottes,
- enfin, on a défini la zone optimale pour réaliser la mesure : 20 à 30 mm de long en commençant à 5 mm de l'écorce.

V. - Discussion

5.1. *Champ d'application*

La démarche expérimentale était orientée vers la mise au point d'une méthode d'estimation des contraintes rapide, économique et peu traumatisante pour l'arbre. Pour remplir ces objectifs, il était naturel de faire appel à la mesure d'une caractéristique physique sur carotte de sondage. Cependant cette méthode est très indirecte. C'est pourquoi une attention particulière a été portée à l'anatomie du bois, qui a permis d'expliquer les relations observées.

S'il fallait avancer une hypothèse pour expliquer pourquoi les carottes renfermant du bois de tension ont un diamètre tangentiel plus faible, il semblerait logique de considérer que la fragilité de la liaison entre la couche G et la couche S (voir photos 2 B et 3 B) joue un rôle primordial dans la déformation et la fissuration du bois en avant du biseau de la tarière. A cause de cette fragilité, et de la rigidité de la couche G elle-même, les déformations et les efforts mis en jeu lors du processus de coupe doivent être très différents, ce qui pourrait expliquer la différence du diamètre tangentiel par rapport au bois normal.

Le champ d'application de cette méthode mérite d'être bien précisé en fonction de ses avantages et de ses limites. La limite principale est la dispersion des résultats (voir figures 5 et 7) qui n'autorise en aucun cas la prédiction d'une valeur individuelle de la déformation potentielle ε_L à partir d'une mesure du diamètre tangentiel TG. En revanche, on met très bien en évidence de différences de niveau moyen de déformation entre lots de quelques arbres, ainsi que les liaisons linéaires entre ε_L et d'autres facteurs comme on le verra dans le deuxième article de cette série. POLGE (1981, *op. cit.*) a même trouvé statistiquement significative une différence de diamètre tangentiel moyen inférieure à 2 μm entre deux modalités expérimentales.

La deuxième limite à ne pas oublier est que, à ce jour, on ne sait pas comparer les résultats obtenus avec deux tarières différentes. Là encore, la cause de ces différences entre les résultats est à rechercher dans le phénomène de coupe lui-même car deux tarières sont toujours de forme différente, et cela modifie les conditions de contraintes/déformations en tête d'outil, donc l'endroit où se produit la rupture. D'autre part (comme pour les mesures faites avec un torsiomètre : KELLER *et al.*, 1976), on peut redouter un effet saison sur le diamètre des carottes car le bois gorgé de sève possède certainement des propriétés élastiques et plastiques différentes de celles d'un bois moins imbibé d'eau. A défaut d'avoir étudié ce problème en détail, nous avons choisi une attitude de bon sens, qui consiste à réaliser chaque expérience en un temps très limité ; cela est facilité par la rapidité du prélèvement des carottes. Enfin, comme on a décidé de ne mesurer le diamètre des carottes qu'à partir de 5 mm de l'écorce, on ne doit pas redouter la présence dans la zone de mesure de bois non encore lignifié.

En conclusion, on peut donc dire que dans les deux limites exposées ci-dessus (étudier des groupes d'arbres, utiliser une seule tarière), les objectifs sont parfaitement atteints :

- le traumatisme infligé à l'arbre et le coût matériel de la mesure sont négligeables,
- une seule personne peut prélever 60 à 120 carottes un jour et mesurer leur diamètre tangentiel à l'état saturé le lendemain,
- cette mesure n'impose aucun travail supplémentaire si l'on avait l'intention de mesurer les retraits du bois sur carottes de sondage. De plus, la même carotte reste disponible pour des mesures de densité, d'infradensité, de modules d'Young (BUCUR, 1981, *op. cit.*), et éventuellement de caractéristiques anatomiques,
- on s'affranchit complètement du problème du vent qui n'autorise les mesures extensométriques que dans des conditions exceptionnellement calmes,
- enfin, la méthode a déjà été éprouvée pour trois genres majeurs (*Fagus*, *Populus*, *Eucalyptus*) et peut être facilement testée avec n'importe quelle autre espèce.

5.2. *Autres développements des études sur les contraintes de croissance*

On vient de voir que bien que cette méthode soit très efficace (et qu'elle permette des progrès rapides dans les connaissances pratiques sur les contraintes de croissance, comme le montreront les articles n^{os} 2 et 3 de cette série), il est des domaines qu'elle ne permet pas d'aborder. Tel est le cas des mesures individuelles de ε_L , et des mesures de ε_T en général. Or de telles mesures seraient très utiles, par exemple pour toutes les études sur l'utilisation (abattage, sciage, etc.) des bois tendus. C'est pourquoi nous présenterons dans une note technique (in *Annales des Sciences Forestières*) un nouveau capteur extensométrique miniature à deux voies qui permettra de mesurer simultanément ε_L et ε_T sur n'importe quelle pièce de bois, aussi bien en forêt qu'en usine ou au laboratoire.

Reçu pour publication le 7 juillet 1981.

Remerciements

Ce travail n'a été possible que grâce à la collaboration de nombreuses personnes qui sont sincèrement remerciées ici :

— J.R. PERRIN, pour son aide quotidienne pour les problèmes mécaniques et électroniques ;

— MM. KAUMAN (C.T.B., Paris), GUITARD (L.E.M.T.A., Nancy), MICHEL (E.N.S.M.I.M., Nancy) et les Ets THANRY (Favières) qui ont mis du matériel à notre disposition ;

— MM. CORBEL, TEISSIER DU CROS, SOULÈRES, BIROT et INCOLL qui nous ont donné accès aux peuplements forestiers ;

— les nombreux membres du personnel de la Station de Recherches sur la Qualité des Bois et de la Station de Biométrie qui ont participé aux différentes étapes du travail.

Summary

Study of growth stresses. 1st Part : Measurement method on increment cores

One can estimate growth strains of beeches, poplars and eucalypts from the measurement of the tangential diameter TG of an increment core (wet condition). Although the elastic deformation of wood should bring it to a larger dimension, TG is smaller for the samples taken out highly stressed trees. Studying the anatomy of the wood of the cores with an image processor, the author showed that the presence of tension wood is associated to this smaller tangential diameter. It appeared too that the measurements must begin at least at 5 millimeters from the bark.

The correlation between TG and the longitudinal growth strain ε_L is not high enough ($r = -0.67$ to -0.77) to authorize any prediction at individual level. But TG can be used as an indicator of the mean level of ε_L for a group of trees (plot, family, etc.). This allows to perform non destructive measurements of growth strain in experimental plantations (silviculture, genetics, etc.).

Références bibliographiques

- BOYD J.D., 1950. Tree Growth Stress. I. Tree growth stress evaluation. *Aust. J. sci. Res.*, Series B, **3** (3), 270-293.
- BUCUR V., 1981. Détermination du module d'Young dynamique du bois sur carottes de sondage. *A paraître dans Ann. Sci. for.*, vol. 38, n° 2.
- CHAFE S.C., 1979. Wood hardness as a poor indicator of growth stress. *Aust. For. Res.*, **9**, 147-148.
- GUENEAU P., KIKATA Y., 1973. Contraintes de croissance. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 149 mai-juin, 21-30.
- GUENEAU P., SAURAT J., 1974. Contraintes de croissance. Rapport n° 1 : Mesures en forêt. *Document C.T.B.*, Paris.
- JACOBS M.R., 1938. The fiber tension of woody stems, with special reference to the genus *Eucalyptus*. *Commonwealth Forestry Bureau*, Bulletin n° 22, Canberra, Australia.
- KEYLWERTH R., 1954. Studien über die Anwendung mathematischstatistischer Methoden in Holzforschung und Holzwirtschaft. Dritte Mitteilung : Ein Beitrag zur qualitativen Zuwachsanalyse. *Holz als Roh und Werkstoff*, **12**, Heft 3, 77-83.
- LECLERCQ A., 1979. Influence du milieu et du traitement sur la qualité du bois de hêtre. Thèse Docteur en Sciences Agronomiques, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux.
- LENZ O., STRASSLER H.J., 1959. Contribution à l'étude de l'éclatement des billes de hêtre. *Mémoires de l'Institut Suisse de Rech. for.*, vol. 35, fasc. 5.
- NICHOLSON J.E., HILLIS W.E., DITCHBURNE N., 1965. Growth stresses and anatomical characteristics in *Eucalyptus regnans* wood. Topic 1/6. Congrès I.U.F.R.O., section 41, Melbourne.
- NICHOLSON J.E., 1971. A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs. *Wood Sci. and Technology*, vol. 5, 40-48.
- ORS Y., 1977. Sélection des variables pertinentes qui agissent sur le comportement rhéologique du bois de *Fagus sylvatica* au moyen d'essais mécaniques, physiques et anatomiques. Thèse Docteur Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- POLGE H., 1979. Les contraintes de croissance sur le hêtre. Résultats préliminaires sur l'influence de l'éclaircie. Document à distribution limitée, *Station de Recherches sur la Qualité des Bois*, n° 1979/1.
- POLGE H., THIERCELIN F., 1979. Growth stress appraisal through increment core measurement. *Wood Sci.*, **12** (2), 86-92.
- POLGE H., 1981. Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du hêtre. *A paraître dans Ann. Sci. for.*, vol. 38.
- SAURAT J., GUENEAU P., 1976. Growth stress in beech. *Wood Sci. and Technology*, **10** (2), 111-123.
- SERRA J., 1981. Image analysis by mathematical morphology. Academic Press, London.