

Coloration macroscopique, retraits longitudinaux de maturation et de séchage du bois de tension du peuplier (*Populus x euramericana* cv I.214)

V Grzeskowiak¹, F Sassus¹, M Fournier²

¹Laboratoire de mécanique et de génie civil, équipe Bois, CC 081, université de Montpellier-II, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5 ;

²Engref, BP 5093, 34033 Montpellier cedex, France

(Reçu le 30 mars 1995 ; accepté le 1^{er} décembre 1995)

Summary – Macroscopic staining, longitudinal shrinkage and growth strains of tension wood of poplar (*Populus x euramericana* cv I.214). This study aims at characterizing distribution and properties of tension wood of poplar (clone I.214). First, the use of zinc chloroiodide for the macroscopic staining of tension wood was validated for poplar. Then, longitudinal growth strain and axial shrinkage were measured for both normal and tension wood. The staining revealed fine tangential strips of tension wood, closely corresponding to G fibres on microscopic slides (fig 5). The tension wood content, quantified by the stained surface ratio, was weakly correlated to the measurement of the longitudinal strain (fig 6). Tension wood shrinkage was greater than that of normal wood (5.6 vs 1.7%, table IV). Macroscopic staining evidenced rapid variations of wood structure within the transverse plane; this was confirmed by shrinkage measurements (figs 8 and 9). Moreover, rapid variations of longitudinal shrinkage along the fibre direction was observed, probably due to the location of our samples at the base of a fork.

***Populus x euramericana* cv I.214 / tension wood / growth stresses / drying shrinkage**

Résumé – L'objectif est d'étudier la répartition et les propriétés du bois de tension du clone de peuplier I.214. Dans un premier temps nous avons validé le chloro-iodure de zinc comme colorant macroscopique du bois de tension. Par la suite, nous avons caractérisé la déformation longitudinale de maturation (à l'origine des contraintes de croissance) du bois de tension et étudié les différences de retrait longitudinal au séchage entre bois normal et bois de tension. Le colorant a révélé de fines bandes tangentielles qui correspondent exactement, sur coupes microscopiques, à des zones de fibres G. L'indice de bois de tension (proportion en surface de fibre G) n'est pas corrélé significativement à la mesure de déformation de maturation. Le retrait longitudinal du bois de tension est supérieur à celui du bois normal (5,6 contre 1,7 %). Les colorations macroscopiques témoignent de variations rapides de la structure du bois sur section transverse. Les mesures de retrait confirment ce résultat. Nous avons de plus observé une variation longitudinale rapide de ce retrait.

***Populus x euramericana* cv I.214 / bois de tension / contrainte de croissance / retrait de séchage**

INTRODUCTION

Chez les angiospermes, la face supérieure des branches et des troncs inclinés présente souvent du bois de réaction. Pour la branche, ce bois assure le maintien d'une inclinaison spécifique ; pour le tronc, incliné par des facteurs externes, il permet le retour à la verticalité (Wardrop, 1964 ; Fisher et Stevenson, 1981 ; Kubler, 1987). Ce bois résulte d'une différenciation particulière des cellules cambiales et est appelé bois de tension. Il se forme ainsi dans des secteurs angulaires privilégiés en relation avec les réorientations d'axes (Archer, 1986). Il se caractérise par des propriétés anatomiques, mécaniques, physiques et chimiques différentes du bois dit normal.

Chez environ 50 % des espèces feuillues, le bois de tension se distingue par la présence de fibres gélatineuses. Ces fibres ont une couche interne « G » constituée en majorité de cellulose cristalline (Wardrop, 1964 ; Panshin et De Zeeuw, 1981 ; Keller, 1994).

Les fibres de bois de tension acquièrent un état de précontrainte mécanique spécifique lors de la formation et de la lignification de leur paroi secondaire, dernière étape de la différenciation, qui donne aux fibres leur rigidité et qui est appelée maturation cellulaire.

Toutes les fibres ont tendance à se déformer au cours de leur maturation : « isolées », elles subiraient une contraction longitudinale et un gonflement tangentiel. Ces déformations sont appelées déformations de maturation.

Adhérente au bois plus ancien, une cellule ne peut se déformer et se retrouve en tension longitudinale et en compression tangentielle (Archer, 1986 ; Fournier et al, 1989). Les valeurs des déformations longitudinales de maturation mesurées sur la face supérieure des arbres penchés et des branches sont souvent plus fortes que celles observées sur la face inférieure. Cette dissymétrie est alors le moteur d'une réorientation active (Chanson, 1993 ; Four-

nier et al 1994). Le bois de tension a été de nombreuses fois associé aux fortes valeurs de déformations longitudinales de maturation (Trénard et Guéneau, 1974 ; Mariaux et Vitalis-Brun, 1983 ; Okuyama et al, 1990 ; Baillères et al, 1995).

Le bois de tension a aussi des propriétés physiques particulières. Sa densité est supérieure à celle du bois normal. Son retrait au séchage est également supérieur dans le sens longitudinal mais aussi dans les autres directions (Wicker, 1979 ; Panshin et De Zeeuw, 1981).

Les hétérogénéités dues à la présence de ce bois entraînent des problèmes majeurs lors de l'exploitation et de la transformation : fentes à l'abattage, déformations des débits au sciage et au séchage, état de surface ou couleur particulière... (Kubler, 1987).

La relation entre la gravité des défauts et la présence de bois de tension dépend notamment :

- de la quantité et de la distribution spatiale du bois de tension,
- des propriétés à l'origine de ces défauts (déformation de maturation, caractéristiques rhéologiques...) qui continuent de varier fortement au sein de ce bois.

La compréhension de cette relation nécessite d'étudier la répartition et les propriétés technologiques du bois de tension, pour chaque essence, en fonction du génotype, des conditions de croissance...

L'objectif de cet article est de présenter des outils méthodologiques et quelques résultats sur le bois de tension du clone de peuplier I.214. Ce bois sera repéré par un marquage macroscopique (coloration au chloro-iodure de zinc) qui permettra l'échantillonnage préliminaire à l'étude de ses propriétés technologiques.

MATÉRIEL

L'essence utilisée pour cette étude est un arbre de la famille des salicacées, le peuplier (genre *Populus*).

Nous avons travaillé sur le cultivar I.214 (*Populus x euramericana* cv I.214), réputé avoir des quantités non négligeables de bois de tension, caractéristique par l'aspect pelucheux qu'il donne aux placages issus de déroulage. À l'échelle cellulaire, le bois de tension de ce cultivar présente une couche G qui remplace la couche S₃ de la paroi secondaire (Wicker, 1979), et qui distingue facilement la fibre de bois normal de celle du bois de tension.

Les arbres étudiés appartiennent à deux localités de France, Bourret (Tarn-et-Garonne), Bourges (Cher), et à une d'Espagne (Valence). Ces arbres étaient en âge d'être exploités (environ 20 ans). Les résultats présentés ici concernent quatre arbres : un de Bourges, deux de Bourret et un de Valence (tableau I).

Méthode

Coloration du bois de tension

Coloration microscopique

Le bois de tension à fibres G se détecte facilement sur coupes minces transversales (15 µm) de bois. La double coloration bleu astra-safran-

nine est couramment utilisée. Le bleu astra (spécifique de la cellulose) colore la couche G (constituée à 98 % de cellulose) en bleu. Les parois lignifiées apparaissent rouges.

Coloration macroscopique

Pour une coloration sur rondelle entière, nous avons testé des colorants utilisés pour la mise en évidence de la cellulose sur coupes microscopiques (réactif de Wiessner, Mangin ; acide iodhydrique fumant, bleu astra-safranine). Casperson (1968) a fait l'essai de 39 colorants et 25 associations entre colorants. Dans la majorité des cas, le contraste n'est pas suffisant pour différencier le bois de tension du bois normal. La méthode qui semble la plus efficace est la coloration au chloro iodure de zinc ou réactif de Herzberg (préparation tableau II). Il est facilement utilisable pour des bois clairs dont le bois de tension est à fibre G (peuplier et hêtre).

Ce réactif attaque les liaisons hydrogènes situées entre les chaînes de cellulose. L'iode responsable de la coloration pourra alors s'accumuler entre ces chaînes (Jensen, 1962).

Le bois normal est révélé en jaune, le bois de tension en mauve. La coloration est fugace (une dizaine de minutes), mais reproductible.

Tableau I. Matériel de l'étude.

	<i>Bourges (1 arbre)</i>	<i>Bourret (2 arbres)</i>	<i>Valence (1 arbre)</i>
Âge	20 ans	25 ans environ	14 ans
Hauteur	30 m	28 m	24 m
Diamètre	48 cm	45 cm	44 cm
Description sommaire		Tronc sinueux, fourche à 6 m, inclinaison (1,3 m) : 3° et 6°	Tronc légèrement sinueux, fourche à 6 m
Type de prélèvement	2 rondelles (épaisseur 1 cm) à 1,3 m de hauteur	5 billons (épaisseur : 20 cm) à 5 hauteurs ≠ (environ tous les mètres de 1 à 5 m de hauteur)	1 billon (épaisseur : 20 cm dans la fourche)
Utilisation dans l'étude	Validation du colorant	Relation indice de bois tension / déformation longitudinale de maturation	Comparaison du retrait longitudinal de bois de tension et de bois normal

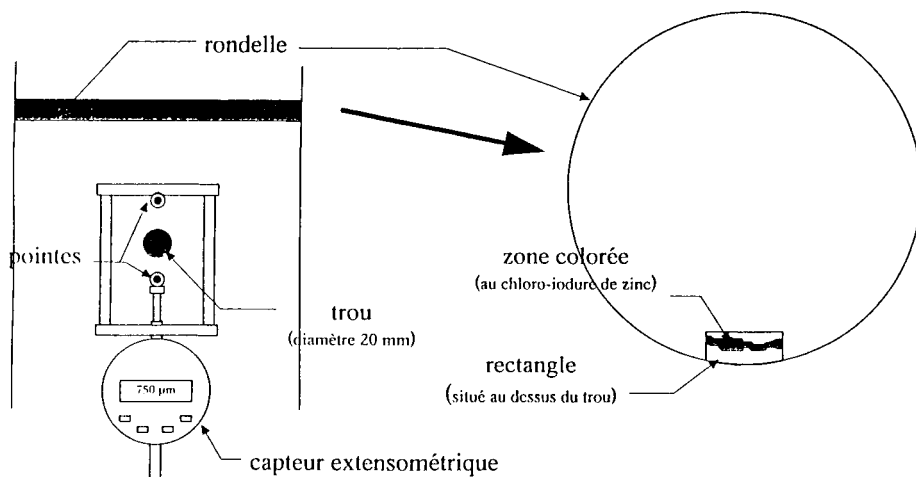


Fig 1. Mesure de la déformation longitudinale par la méthode Cirad et indice de bois de tension associé à cette mesure par coloration d'un rectangle situé au-dessus du trou de mesure.

Pour valider ce colorant, nous avons vérifié, par coupes et colorations microscopiques :

- si les zones colorées correspondent à du bois de tension,
- si les zones non colorées correspondent à du bois normal,
- si la coloration est suffisamment précise (mise en évidence de petites plages de bois de tension),
- l'influence de l'état de surface sur la coloration.

Pour cela, nous avons procédé de la façon suivante :

- prélèvement sur un billon de deux rondelles successives à la scie à ruban,
- badigeonnage avec le réactif de Herzberg de la face inférieure de la première rondelle (à l'état vert),
- vérification sur la face supérieure de la seconde rondelle pour validation.

Ce protocole a été validé sur rondelle brute (peuplier Bourges) ; répété sur deux rondelles

brutes (peuplier Bourret) et une rondelle rabotée (peuplier Valencia).

Mesure des déformations de maturation et indice de bois de tension

Toutes les méthodes sont basées sur le même principe : on mesure un déplacement ou une déformation entraîné par une découpe en périphérie de l'arbre qui libère une partie des contraintes (Archer, 1986). Nous avons utilisé une méthode maintenant courante (dite méthode Cirad) pour mesurer les déformations longitudinales de maturation (Fournier et al, 1994 ; Baillères et al, 1995). L'arbre est préalablement écorcé, deux pointes sont plantées sur une même génératrice. Elles supportent un capteur extensométrique qui mesure le déplacement entraîné par la réali-

Tableau II. Préparation du chloro-iodure de zinc (Casperson, 1968).

1 ^{re} solution	2 ^e solution
80 g de chlorure de zinc	8,4 g d'iodure de potassium
40 g d'eau	0,4 g d'iode
	20 g d'eau
Refroidie à 20 °C (fortement exothermique)	Réchauffée à 20 °C

Les deux solutions sont mélangées à 20 °C, puis conservées à l'abri de la lumière

sation entre ces deux pointes d'un trou de diamètre 20 mm sur une profondeur de 15 mm (fig 1).

Une étude mécanique (Baillères, 1994) montre que l'écartement des deux pointes, suite au perçage du trou est proportionnel à la déformation longitudinale de maturation. Le facteur de proportionnalité dépend de l'anisotropie élastique du bois, et varie suivant les espèces entre 9 et 15. Pour le peuplier il est estimé à 12 microdéformations par micromètre. Par la suite les déformations de maturation seront données en micromètres du capteur Cirad.

Les mesures de déformations longitudinales de maturation sont classiquement réalisées sur huit points d'une circonférence (Fournier et al, 1994). Au-dessus de chaque couronne (à une distance variant de 1 à 4 cm), nous avons débité une rondelle de bois que nous avons ensuite colorée au chloro-iodure de zinc. Nous avons utilisé comme indice de bois de tension la proportion de surface colorée dans le rectangle de dimensions 20 mm dans le sens tangentiel par 15 mm dans le sens radial, situé au-dessus du trou de mesure (fig 1). L'indice 0 est ainsi associé à l'absence de bois de tension, 1 à une coloration complète du rectangle.

Nous avons testé une moyenne pondérée par une fonction géométrique décrivant mieux le problème mécanique de notre mesure (Sassus, 1994 ; Delavault, 1994). Pour nos observations,

cette modification n'apporte pas d'amélioration sensible dans la description de la relation entre indice de bois de tension et déformation longitudinale de maturation.

Mesure du retrait longitudinal

Un billon (arbre de Valence) a été dans un premier temps coloré sur une de ses sections, puis déroulé. Nous avons débité dans le sens longitudinal des éprouvettes de forme parallélépipédique. Leurs dimensions étaient de 80 mm dans le sens longitudinal, 10 mm dans le sens tangentiel et 2 mm dans le sens radial (fig 2). Les éprouvettes dont plus de la moitié de la section était colorée ont été dénommées « éprouvette de bois de tension », les autres « éprouvette de bois normal » (fig 3). Nous avons ainsi obtenu 41 éprouvettes de bois normal et 23 de bois de tension.

Un trait au crayon a été tracé dans le sens des fibres. Proche de la section colorée de l'éprouvette un premier trait de cutter est tracé perpendiculairement au trait de crayon : il matérialise un point sur l'éprouvette. Un second trait de cutter est réalisé 4 cm plus loin dans la direction longitudinale (fig 3). La distance entre les deux points de repère ainsi obtenus est mesurée :

- à l'état « vert »,
- à l'état anhydre.

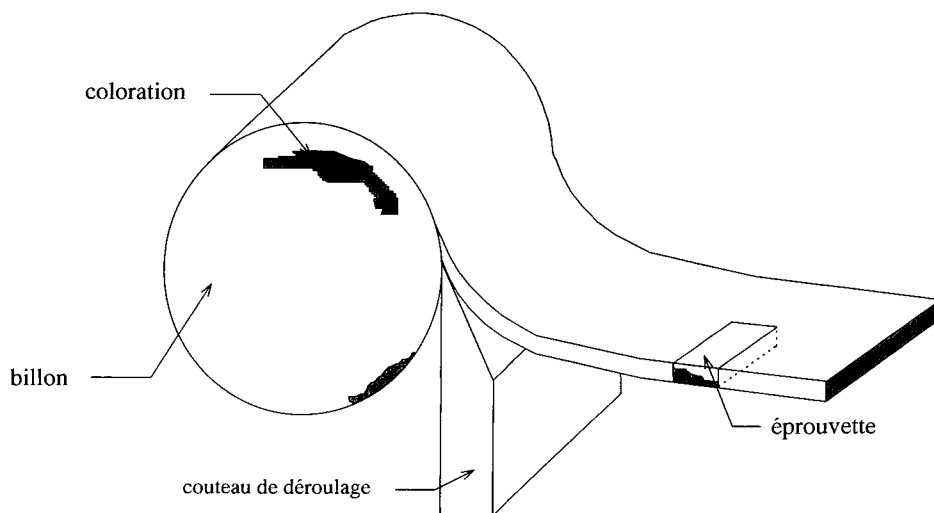


Fig 2. Débit des éprouvettes par déroulage d'un billon coloré au chloro-iodure de zinc.

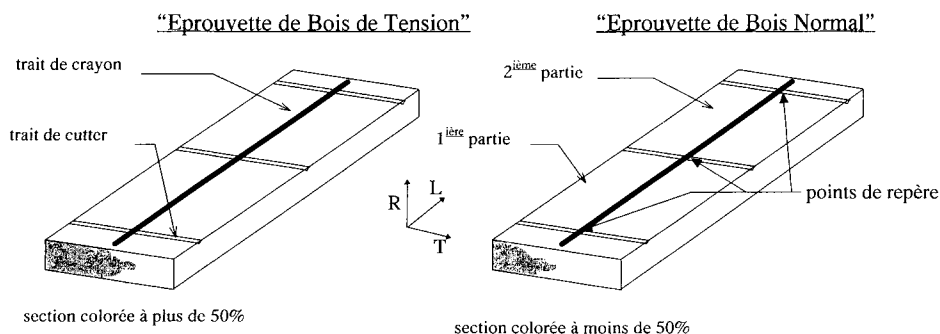


Fig 3. Repérage sur l'éprouvette pour mesurer les mêmes longueurs avant et après séchage. La première partie de l'éprouvette est consacrée à l'étude de la variation de retrait longitudinal entre les éprouvettes de bois normal et de bois de tension ; la deuxième partie, à l'étude de la variation de ce retrait le long de la fibre.

Pour cela l'éprouvette est placée sur une platine de mesure se déplaçant dans une direction et dont la position est repérée avec une précision de 0,01 mm. Au dessus de la platine, une loupe binoculaire (équipée d'un système de visée) permet de mesurer la distance parcourue entre chaque point lorsque l'on suit le trait de crayon. La précision sur la distance est de 0,01 mm, soit une précision de 0,25 pour la mesure de retrait longitudinal d'une éprouvette de 4 cm.

Les retraits ainsi mesurés ont été associés à la nature du bois de l'éprouvette.

Un troisième trait de cutter a été tracé sur l'éprouvette 4 cm après le second (fig 3). Il a permis de mesurer de la même manière le retrait sur une deuxième partie de l'éprouvette et donc d'apprécier la variation du retrait longitudinal le long de la direction axiale de l'arbre.

Le séchage est réalisé sans contrainte ; une partie de nos éprouvettes s'est courbée au séchage. De telles déformations sont complexes et difficiles à analyser.

Nous avons mesuré expérimentalement ces courbures. Pour cela, les éprouvettes courbées sont classées en deux catégories :

- courbure sur toute la longueur de l'éprouvette (fig 4a),
- courbure sur une partie de l'éprouvette (fig 4b).

Dans le premier cas nous avons mesuré la flèche (f) de l'éprouvette, dans le second cas, la longueur $q.l_0$ de l'éprouvette courbée (l_0 étant la longueur de l'éprouvette humide)

et le « relèvement » (d) de l'éprouvette par rapport à une surface plane.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Validation du colorant macroscopique

Résultat

Un bon état de surface de la rondelle est nécessaire pour obtenir une coloration suffisamment contrastée. Celui-ci peut s'obtenir par rabotage ou par sciage à condition de disposer d'un outil stable et bien affûté (une scie à ruban avec des volants de diamètre 700 mm, équipée d'un chariot adapté au débit de rondelles, nous a donné des états de surface permettant la délimitation de fines bandelettes après coloration). L'humidité de la rondelle semble avoir peu d'influence sur la coloration ; en effet, la coloration est identiquement reproduite (sur la même rondelle) à des humidités différentes (de l'état vert à l'état sec à l'air).

Le billon utilisé pour la validation du colorant avait de fortes valeurs de déformations longitudinales de maturation dans un secteur angulaire. Les coupes minces colorées à la safranine-bleu Astra ont confirmé que les fines bandes mauves obtenues au chloro-iodure de zinc correspondent

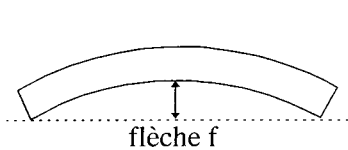


figure 4.a

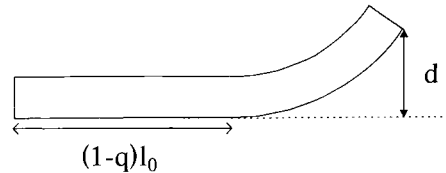


figure 4.b

Fig 4. Deux types de déformations en courbure des éprouvettes au séchage. Premier cas (**4a**) : on mesure la flèche. Second cas (**4b**) : on mesure la longueur $(1-q)l_0$ d'éprouvette non déformée (l_0 , longueur de l'éprouvette humide) et l'écartement (d) avec une surface plane.

très exactement à des plages de bois de tension (fig 5). Cette précision semble nécessaire pour la cartographie du bois de tension du peuplier. En effet, s'il est couramment admis que le bois de tension se répartit en larges plages dans un secteur angulaire, les cartographies que nous avons obtenues chez le I.214 mettent en évidence (dans presque tous les cas) une distribution en fines bandelettes. Un même cerne peut ainsi contenir à la fois des bandes de bois normal et des bandes de bois de tension (fig 5).

Discussion

La distribution du bois de tension de peuplier est complexe. Le chloro-iodure de zinc est suffisamment précis pour la détection macroscopique de ce bois, puisqu'il met en évidence des zones de petites dimensions (5 mm dans le sens tangentiel et 2 mm dans le sens radial).

L'intensité de la coloration varie. Ces variations pourraient provenir de différences de structures de fibres de bois de tension,

par exemple l'épaisseur de la couche G (Delavault, 1994). Mais il semble que les variations d'état de surface de la rondelle (incontrôlables) influent beaucoup sur les variations de coloration. Dans cette mesure, il est difficile de relier quantitativement la coloration et « l'intensité » du bois de tension.

Relation entre indice de bois de tension et déformation de maturation

Résultat

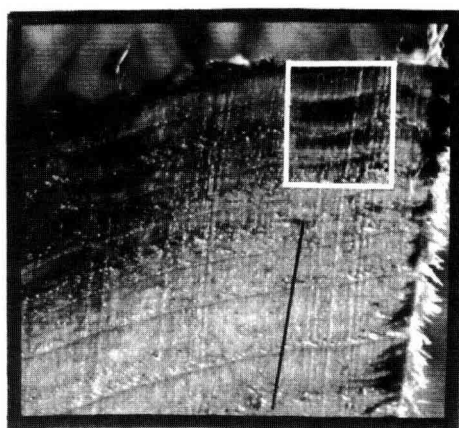
Deux peupliers provenant de Bourret ont fourni chacun 11 couples de données : mesure de déformation longitudinale de maturation et indice de bois de tension. Les bilons prélevés dans ces arbres avaient de fortes déformations longitudinales de maturation. Dans le proche voisinage des fortes mesures, la coloration a mis en évidence du bois de tension.

Les données sont représentées sous forme de graphe (fig 6). Le test de dépendance monotone de Kendall montre que :

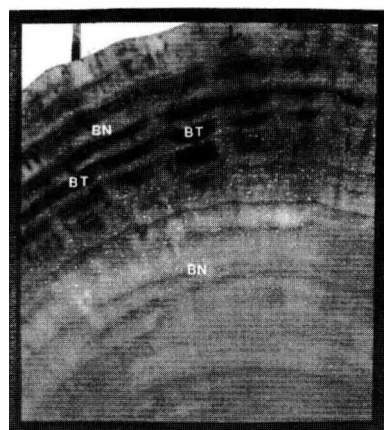
Tableau III. Tests statistiques non paramétriques (Lebart et al, 1982)

Relation testée	Type de test	Taille échantillon	Hypothèse nulle (H_0)	Probabilité de nos observations sous H_0
a : dépendance monotone croissante entre indice bois de tension et déformation de maturation	Test de Kendall	Arbre n° 1 : 11 couples Arbre n° 2 : 11 couples Arbre n° 1 & 2 : 22 couples	Pas de dépendance monotone	< 1 % > 10 % 5 %
b : comparaison du retrait longitudinal du bois normal et du bois de tension	Test des rangs de Mann et Whitney	41 + 23 éprouvettes	Les deux types de bois ont même densité de probabilité	< 0,1 %
c : diminution du retrait longitudinal le long du fil du bois,	Test des rangs de Mann et Whitney	Éprouvettes bois normal : 41 couples Éprouvettes bois de tension : 23 couples Toutes éprouvettes : 64 couples	Même densité de probabilité pour les deux lots de mesures	0,1 % 1 % 1 %
concordance du classement des éprouvettes dans les deux parties	Test de concordance de Kendall	Toutes éprouvettes : 64 couples	Pas de concordance	1 %
d : comparaison du retrait longitudinal du bois normal et du bois de tension en utilisant les valeurs de retrait en 2 ^e partie des éprouvettes	Test des rangs de Mann et Whitney	41 + 23	Les deux types de bois ont même densité de probabilité	1,3 %

5a.



15mm

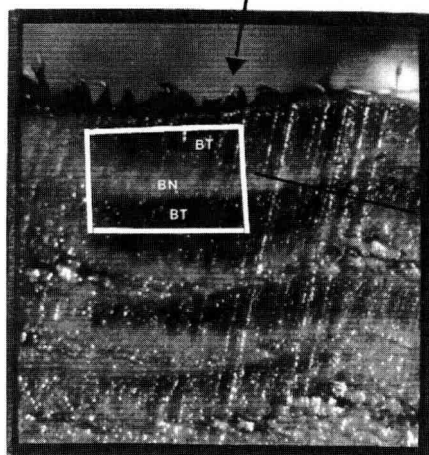


35mm

BT: bandes tangentielles de bois de tension
(bandes foncées).

BN: zone de bois normal (bandes plus claires).

5b.

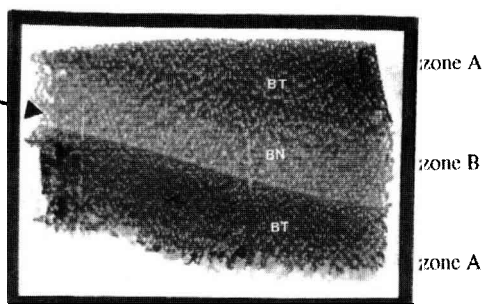


0,5mm

Coloration macroscopique.

BT: bois de tension.

BN: bois normal.



0,2mm

Coloration microscopique

zone A: coloration du bois de tension par le bleu
Astra.

zone B: coloration du bois normal par la
safranine (zone claire).

Fig 5 a. Exemple de coloration au chloro-iodure de zinc du bois de tension de peuplier sur rondelle ;
b. comparaison des colorations macroscopiques et microscopiques.

- pour l'arbre n°1, la déformation de maturation augmente avec l'indice de bois de tension au seuil de signification de 1 %,
- pour l'arbre 2, la dépendance monotone croissance n'est plus significative,
- sur l'ensemble des deux arbres, elle est significative au seuil de 5 %.

Le tableau IIIa récapitule les résultats et les paramètres du test.

La forte dispersion des points de l'arbre n°2 est mise en évidence par le graphe (fig 6). Pour cet arbre, le colorant a notamment révélé peu de bois de tension (indice de 10 %) pour un point de forte déformation de maturation (326 μm), ainsi qu'une zone fortement colorée (90 % en surface) au niveau d'une faible valeur de déformation de maturation (150 μm).

Discussion

Il semble donc, d'une part, que le bois normal puisse contribuer de façon notable aux fortes déformations longitudinales de maturation et, d'autre part, que pour le bois de tension ces déformations longitudinales de maturation varient sensiblement. Rappelons que la coloration est effectuée 3 à 4 cm au-dessus du trou de la mesure de

déformation de maturation. La nature du bois varie peut être longitudinalement sur cette distance. Cela expliquerait alors une part de la forte dispersion de nos valeurs. La distance entre mesure de déformation longitudinale de maturation et coloration devrait être mieux contrôlée à l'avenir

Retrait longitudinal du bois de tension

Résultat

Les données sont présentées sous forme d'histogramme (fig 7), les moyennes et écarts types sont donnés au tableau IV.

Le retrait longitudinal est plus fort pour le bois de tension que pour le bois normal. Le test des rangs de Mann et Withney confirme ce résultat (tableau IIIb). Les valeurs de retrait longitudinal ont été reportées sur la section du billon colorée au chloro-iodure de zinc : on obtient ainsi une cartographie de retrait longitudinal (fig 8). On y remarque que la répartition du retrait respecte bien celle de la nature du bois – notamment les fortes variations de retrait sont accompagnées de fortes variations de nature de bois –, et que les éprouvettes de bois nor-

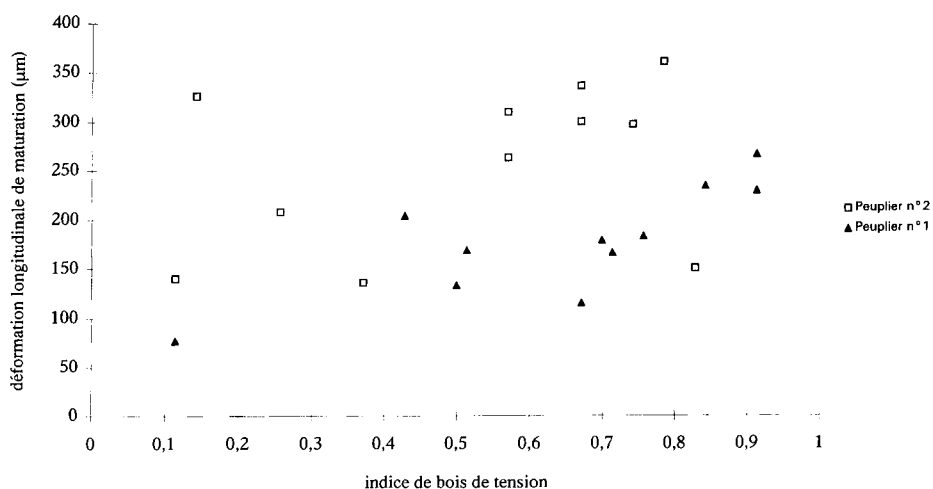


Fig 6. Indice de bois de tension et déformation longitudinale de maturation pour deux peupliers.

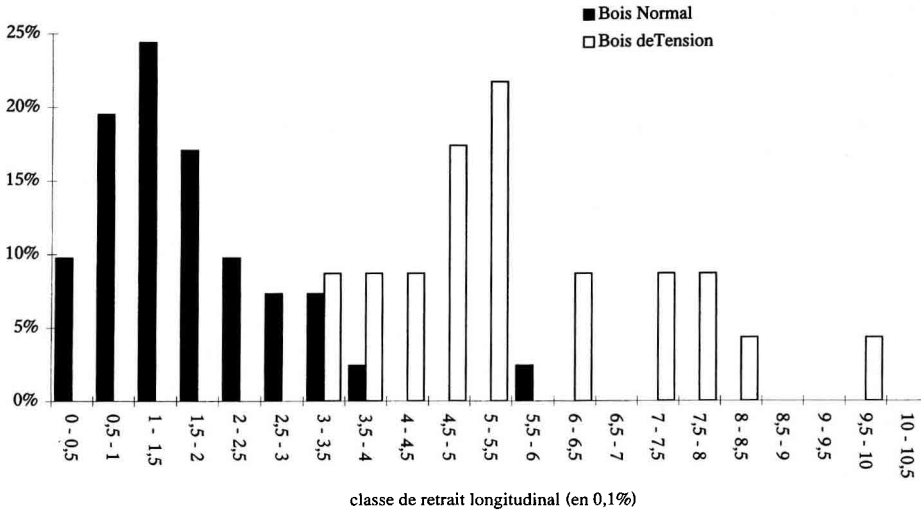


Fig 7. Histogramme de retrait longitudinal pour les deux types d'éprouvettes.

mal éloignées des îlots de bois de tension sont celles de faible retrait longitudinal.

De plus, le retrait longitudinal varie fortement entre les deux parties des éprouvettes. Des tests statistiques (tableau IIIc) mettent en évidence une diminution significative du retrait longitudinal, une concordance du classement des retraits pour l'ensemble des éprouvettes, même si indépendamment pour chaque nature de bois, la croissance monotone est infirmée par le test de Kendall.

Ces variations entre première et deuxième partie montrent des changements rapides de la nature du bois dans la

direction du fil du bois (variations longitudinales), ce qui confirme notre intuition précédente.

Par ailleurs, on peut expliquer les courbures des éprouvettes au séchage par une variation du retrait longitudinal sur l'épaisseur (variations radiales). Pour simplifier l'analyse des paramètres de déformation mesurés expérimentalement, nous avons supposé que les propriétés élastiques du bois sont approximativement homogènes dans les éprouvettes (car elles sont connues pour varier relativement moins que le retrait longitudinal), et que dans la partie déformée le retrait longitudinal varie linéairement dans

Tableau IV. Moyennes et écarts types pour les éprouvettes de bois normal et de bois de tension en première et deuxième parties.

	Première partie		Deuxième partie		Nombres d'éprouvettes
	Moyenne (‰)	Écart type (‰)	Moyenne (‰)	Écart type (‰)	
Bois normal	1,7	1,1	1,4	2	41
Bois de tension	5,6	1,8	3,2	3,8	23

Retrait longitudinal

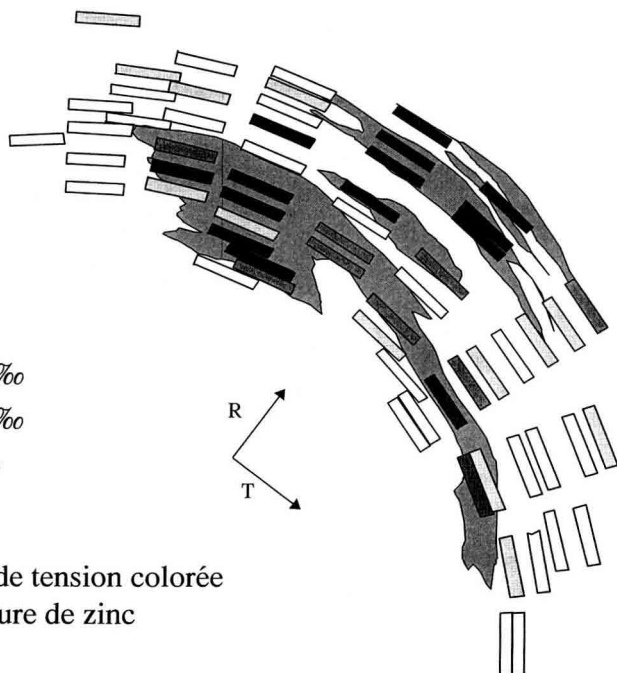
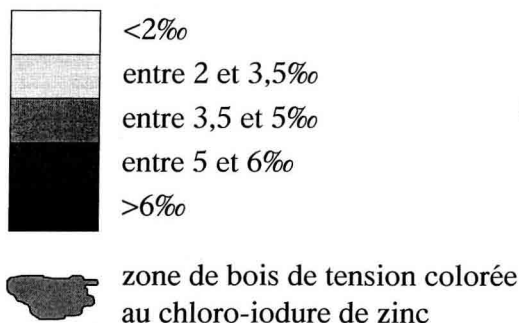


Fig 8. Cartographie (plan radial-tangentiel) de retrait longitudinal et de coloration de bois de tension au chloro-iodure de zinc.

le sens radial sur l'épaisseur de l'éprouvette (retrait longitudinal α_+ sur la face concave, α_- sur la face convexe).

Sous ces hypothèses la partie courbée de l'éprouvette prend la forme d'un arc de cercle (fig 9), son rayon de courbure R se déduit de l'hétérogénéité de retrait ($\Delta\alpha = \alpha_+ - \alpha_-$) par :

$$R = \frac{e}{\Delta\alpha} \quad (e \text{ épaisseur de l'éprouvette})$$

Courbure sur toute la longueur de l'éprouvette

Dans ce cas le retrait longitudinal varie radialement sur toute la longueur de l'éprouvette (fig 4a). Le facteur d'hétérogénéité ($\Delta\alpha = \alpha_+ - \alpha_-$) se déduit, en première approximation, de la flèche mesurée expérimentalement par :

$$\Delta\alpha = \frac{8ef}{b^2}$$

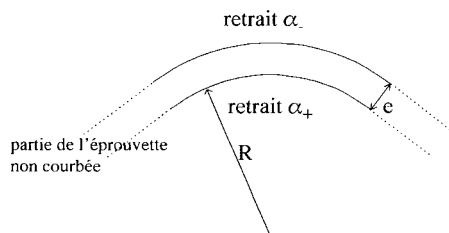


Fig 9. Courbure de l'éprouvette au séchage.

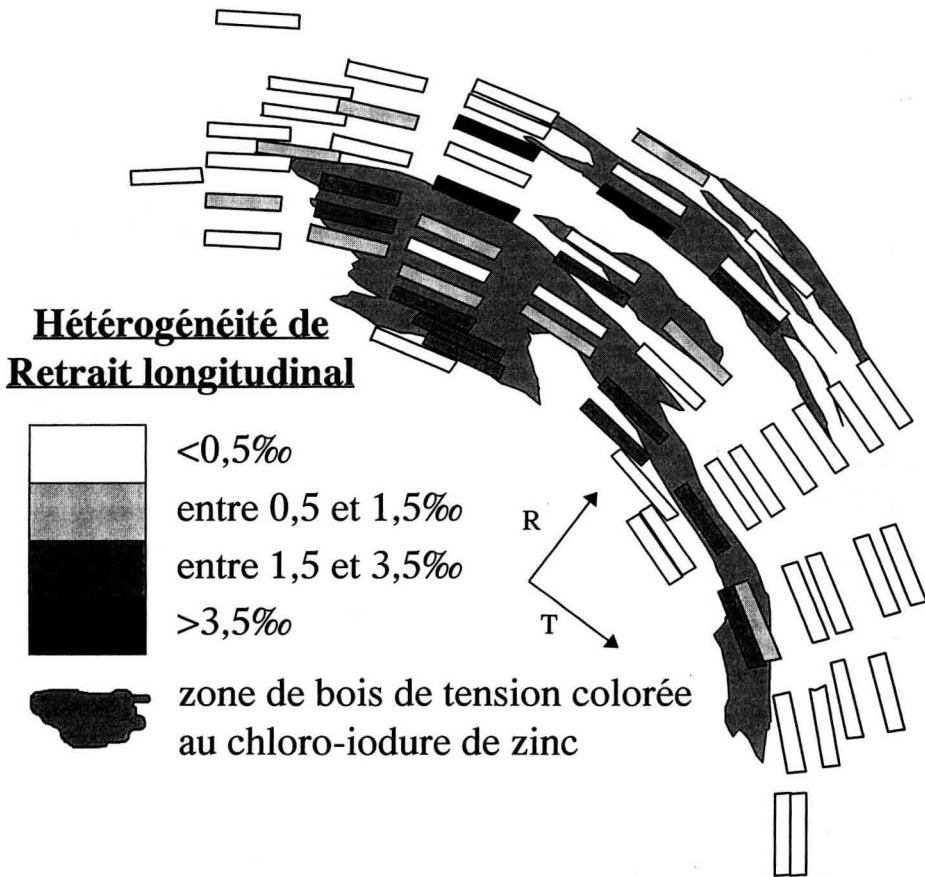


Fig 10. Cartographie (plan radial-tangentiel) des hétérogénéités de retrait longitudinal et de coloration de bois de tension au chloro-iodure de zinc.

avec f , flèche ; l_0 , longueur humide ; e , épaisseur de l'éprouvette.

Cette formule montre qu'une flèche de 4 mm (couramment observée) est associée à un facteur d'hétérogénéité $\Delta\alpha = 1 \text{ ‰}$.

Courbure sur une partie de l'éprouvette

Le retrait longitudinal varie radialement sur une partie de l'éprouvette de longueur ql_0 (fig 4b). Le facteur d'hétérogénéité

$\Delta\alpha = \alpha_s - \alpha_c$ se déduit des paramètres de déformation q et e par :

$$\Delta\alpha = \frac{(qb)^2}{2ed}$$

avec ql_0 , longueur de l'éprouvette courbée ; d , relèvement de l'éprouvette ; e , épaisseur de l'éprouvette.

Une hétérogénéité radiale de retrait longitudinal sur la moitié de l'éprouvette et un

relèvement de 4 mm sont associés à un facteur d'hétérogénéité $\Delta\alpha = 1 \text{ ‰}$.

Sur l'ensemble des 24 éprouvettes courbées, la moyenne des hétérogénéités de retrait $\Delta\alpha$ calculées par les formules précédentes est de 2 ‰, l'écart type de 1,4 ‰. Ces hétérogénéités sont représentées sous forme de cartographie (fig 10). On observe que les fortes valeurs se situent principalement à la frontière entre les zones de bois de tension et les zones de bois normal.

Discussion

Le retrait longitudinal du bois de tension est supérieur à celui du bois normal. Pour les valeurs de retrait situées à 4 cm de la surface colorée, la corrélation est moins significative (seuil de 2 %, tableau III d), ce qui suggère des variations longitudinales de la nature du bois très rapides (sur une distance de 4 cm).

Les éprouvettes ont été prélevées à la base d'une branche de fourche. À cet endroit la courbure est importante et varie sur une petite distance. C'est peut-être ce qui explique des variations aussi rapides le long du fil du bois.

Enfin, la structure discontinue en bandelettes du bois de tension se traduit par des hétérogénéités importantes de retrait dans l'épaisseur de certaines éprouvettes, bien que nous ayons travaillé sur des échantillons (placages) très minces.

Ces hétérogénéités longitudinales et radiales rencontrées sur de petites distances montrent que pour des essences formant ce type de bois de tension à structure discontinue, il y a une difficulté de méthodologie importante pour étudier la corrélation entre différentes propriétés du bois qui peuvent rarement être mesurées rigoureusement au même endroit, sur les mêmes éprouvettes (pour des raisons techniques, chaque méthode de mesure est mise au point sur un échantillon de forme et de dimensions bien choisies).

Conclusion

Le chloro-iodure de zinc s'avère efficace pour caractériser la nature du bois sur une section transversale de billon. Le colorant permet de détecter des bandelettes très fines de fibres G.

Les peupliers étudiés ont révélé des variations spatiales très rapides de la structure du bois (apparition de plages discontinues de fibres G). Ces variations se situent dans le plan transverse (bandelettes tangentielles) mais aussi dans la direction longitudinale (toutefois, dans cette direction, la position de nos éprouvettes de retrait près d'une fourche est peut-être responsable des fortes variations observées).

La mesure des retraits longitudinaux de séchage sur placages déroulés permet de séparer deux groupes de valeurs et donc de distinguer le bois normal du bois de tension. Dans le bois normal, la valeur moyenne de ce retrait est de 1,7 ‰ en moyenne. Pour le bois de tension, le retrait moyen est de 5,6 ‰ (avec une valeur maximale autour de 1 ‰). Les mesures témoignent également de variations spatiales rapides.

Les distributions de valeurs de déformations longitudinales de maturation mesurées par la méthode Cirad ne montrent pas de séparation nette entre les deux catégories de bois. En effet, la mesure Cirad donne une valeur homogénéisée sur plusieurs cm^3 qui intègre donc de façon continue des plages plus ou moins importantes de fibres G et des plages sans fibres G.

Pour étudier les relations entre structure anatomique et propriétés physiques ou mécaniques, il faut donc prendre soin de corrélérer des mesures effectuées à la même échelle ou de traiter le problème de l'homogénéisation entre les échelles. Ce problème demande une analyse physique et mécanique de la contribution de chaque partie de l'éprouvette à la propriété macroscopique globale.

Enfin, notre analyse est restée à l'échelle tissulaire (présence ou non de fibres G). Le problème reste entier d'étudier la variabilité ultrastructurale ou chimique à l'échelle des fibres (normales ou gélatineuses), et la part de cette variabilité dans celle des propriétés macroscopiques physiques ou mécaniques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient JL Kerguème (laboratoire de mécanique et de génie civil de l'université de Montpellier-II) pour son aide technique. L'étude s'est déroulée pour partie avec l'aide du Cifor (Madrid, Espagne) dans le cadre d'un stage de formation effectué par F Sassus. Que toutes les personnes qui ont contribué à son déroulement soient remerciées ici, pour leur accueil, leur coopération et leur disponibilité.

RÉFÉRENCES

- Archer R (1986) *Growth stresses and strains in trees*. Springer Verlag, New York
- Baillères H (1994) Précontraintes de croissance et propriétés mécanophysiques de clones d'eucalyptus (Pointe Noir, Congo) : hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. Thèse sciences du bois, université Bordeaux-I, 161 p
- Baillères H, Chanson B, Fournier M, Tollier MT, Monties B (1995) Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'eucalyptus. *Ann Sci For* 52, 157-172
- Casperson G (1968) Probleme morphologischer Untersuchungen an Pappalholz. *Faserforsch Textiltech* 19, 345-350
- Chanson B (1993) Déformations de maturation : hétérogénéité angulaire en fonction du plan d'organisation des arbres. *Acta Bot Gallica* 140, 395-401
- Delavault O (1994) Répartition du bois de tension et stratégies d'occupation de l'espace : le cas d'*Euporea falcata* Aubl (Cæsalpiniaceæ) et *Castanea sativa* Mill (Fagaceæ). Thèse Engref
- Fisher JB, Stevenson JW (1981) Occurrence of reaction wood in branches of dicotyledons and its role in tree architecture. *Bot Gaz* 142, 82-95
- Fournier M, Chanson B, Thibaut B, Guitard D (1991) Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. II. Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation, cas du feuillu standard. *Ann Sci For* 48, 527-546
- Fournier M, Chanson B, Thibaut B, Guitard D (1994) Mesure des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres. *Ann Sci For* 51, 249-266
- Jensen WA (1962) *Botanical histochemistry*. Freeman & Co, San Francisco, CA, USA
- Keller R (1994) La constitution du bois. In : *Le bois, matériau d'ingénierie*. ARBoLor, Engref, Nancy, 433 p
- Kubler H (1987) Growth stresses in trees and related wood properties. *Forest Products Abstracts* 10, 62-119
- Lebart L, Maineau A, Fenelon JP (1982) Traitement des données statistiques : méthodes et programmes. Dunod, Paris
- Mariaux A, Vitalis-Brun A (1983) Structure fine du bois de Wapa en relation avec les contraintes de croissance. *Bois et Forêts des Tropiques* 199, 43-56
- Okuyama T, Yamamoto H, Iguchi M, Yoshida M (1990) Generation process of growth stresses in cell wall. II. Growth stresses in tension wood. *Mokuzai Gakkaishi* 36, 797-804
- Panshin AJ, De Zeeuw C (1981) *Textbook of wood technology. Vol I. Structure, identification, uses and properties of the commercial woods of the United States*. Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 16 p
- Sassus F, (1994) Relation entre morphologie et contraintes de croissance chez un clone de peuplier (I.214). Rapport de DEA sciences du bois, Engref, Nancy
- Trenard Y, Guéneau P, (1974) Contraintes de croissance. Rapport n°2 : aspect anatomique. Centre technique du bois
- Wardrop AB (1964) The reaction anatomy of arborescent angiosperms. In : *The Formation of Wood in Forest Trees* (MH Zimmermann, ed), Academic Press, New York, 405-546
- Wicker M, (1979) Le bois de tension : acquisitions récentes. *Ann Biol* 18, 222-254