Article original

Recouvrance hygrothermique du bois vert. II. Variations dans le plan transverse chez le châtaignier et l'épicéa et modélisation de la fissuration à cœur provoquée par l'étuvage

J Gril, E Berrada, B Thibaut

Laboratoire de mécanique et génie civil, université de Montpellier 2, CP 81, place Eugène-Bataillon,
34095 Montpellier cedex 5, France

(Reçu le 30 novembre 1992; accepté le 3 juin 1993)

Résumé — La recouvrance hygrothermique du bois vert (RHT) est à l'origine de la fissuration à cœur induite par l'étuvage des grumes. Elle a été mesurée à 80°C dans les trois directions principales sur des échantillons obtenus par 2 modes de débit complémentaires à partir de rondelles à faces parallèles de châtaignier (*Castanea sativa* Mill) et d'épicéa (*Picea abies* Karst). La déformation obtenue est de l'ordre de $-0,1\%$ dans la direction radiale et de $\pm 0,1\%$ dans la direction longitudinale. Dans la direction tangentielle, elle vaut 0,3 à 0,4% pour l'épicéa, sans influence de la position radiale, alors que chez le châtaignier elle varie de 0,4% près de la périphérie à 0,6% vers le cœur ; elle est plus élevée dans le bois de tension et plus faible dans le bois opposé, et a chuté de moitié à la suite d'un stockage des échantillons huit mois dans l'eau. Pour finir on propose une approche numérique de la fissuration à cœur provoquée par les contraintes de croissance et l'étuvage, où la progression des fentes est simulée par l'ouverture d'un trou central permettant de maintenir les contraintes transverses compatibles avec des critères de rupture.

bois vert / étuvage / recouvrance hygrothermique / châtaignier / épicéa / fissuration à cœur

Summary — Hygrothermal recovery of green wood. II. Transverse variations in chestnut and spruce and modelling of the steaming-induced heart checking. Hygrothermal recovery of green wood (HTR) explains heart checking induced by log steaming. It was measured at 80°C in the 3 principal directions of Chestnut (*Castanea sativa* Mill) and Spruce (*Picea abies* Karst) using 2 complementary cutting procedures to extract clear-wood specimens from parallel-faced disks. Strain levels obtained were about -0.1% in radial direction and $\pm 0.1\%$ in longitudinal direction. In the tangential direction the strain level was 0.3–0.4% for Spruce, without influence of radial position; in Chestnut it varied from 0.4% near the periphery to 0.6% near the pith, was higher in tension wood and smaller in opposite wood, and fell by a half after 8 months water storage. In the numerical approach of heart checking induced by growth stress and steaming, the progress of heart checks was simulated by opening a central hole allowing the transverse stresses to remain within limits of strength criteria.

green wood / steaming / hygrothermal recovery / chestnut / spruce / heart checking

INTRODUCTION

L'étuvage humide est souvent utilisé en préliminaire au déroulage ou au tranchage dans le but de ramollir le bois et ainsi faciliter son usinage. Or il provoque en bout de grume l'apparition ou l'amplification de fentes à cœur préjudiciables au déroulage (Lutz, 1974). C'est ainsi qu'une étude de faisabilité du déroulage de châtaignier (Movassaghi *et al*, 1986) a montré que l'étuvage à 45°C diminue les efforts de coupe et améliore la qualité de placage ; à 65°C, en revanche, l'aptitude au déroulage n'a guère évolué tandis que s'est développée une forte fissuration à cœur (fig 1). Fréquemment les grumes présentent des fissures à cœur avant l'étuvage, ce qui atteste l'existence d'un champ de contraintes caractérisé notamment par de la tension transverse dans la partie cen-

trale. Le fait de chauffer tout en conservant l'humidité du bois devrait permettre une diminution de ces contraintes puisque le matériau se ramollit. Il est donc *a priori* surprenant que, loin de diminuer, les fentes à cœur progressent. On pourrait répondre à cette objection en remarquant que la résistance à la fissuration transverse décroît elle aussi ; de fait, pour effectuer l'analyse correcte de ce problème, il faudrait savoir laquelle, de la rigidité du matériau et de sa résistance à la fissuration, est la plus influencée par la température. Mais l'explication la plus plausible de ce phénomène, du moins celle qui est admise depuis les travaux de Koehler (1933) et surtout ceux de MacLean (1952), fait intervenir la recouvrance hygrothermique du bois vert (RHT), c'est-à-dire une déformation induite par l'étuvage humide des grumes et caractérisée par une forte expansion tangentielle et une légère contraction radiale (voir notre

Fig 1. Fissuration en bout de billes de châtaignier avant et après étuvage à 80°C pendant 8 h. D'après Movassaghi *et al* (1986).

article précédent). On peut en effet aisément vérifier que cette anisotropie de la déformation induite par l'étuvage humide, inverse de celle du séchage mais du même type que celle liée aux contraintes de croissance, est favorable à la fissuration à cœur (fig 2).

Ces observations avaient constitué la motivation initiale de notre étude de la RHT. Dans la partie précédente (Gril *et al*,

1993), nous avons analysé les informations fournies par une étude préliminaire effectuée sur du jujubier. Nous allons présenter maintenant les principaux résultats de la campagne d'essais proprement dite menée sur le châtaignier, ainsi que sur l'épicéa à titre de comparaison (Berrada, 1991). Nous cherchions à connaître, pour les essences en question, la déformation induite par l'étuvage dans les trois directions principales du bois (R, T, L), ainsi que les facteurs — position dans la section, type de bois, etc — susceptibles d'affecter ces valeurs. L'objectif visé était de disposer de données en vue de la modélisation numérique de la fissuration à cœur induite par l'étuvage humide, dont une première approche sera présentée dans le but de clarifier le problème mécanique posé.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériau et méthode d'interprétation

Les essais ont été réalisés sur le châtaignier (*Castanea sativa* Mill) et l'épicéa (*Picea abies* Karst). Les échantillons étaient obtenus à partir de grumes de pied tronçonnées en billons de 30 cm de long environ et conservés dans l'eau, eux-mêmes débités en rondelles à faces parallèles au moyen d'un dispositif adapté pour une scie à ruban. Nous avons pris soin de partir de billons presque cylindriques et de repérer soigneusement les rondelles de manière à pouvoir superposer des échantillons correspondants, et ainsi tester la répétabilité des mesures d'une rondelle à l'autre. Nous avons procédé à 2 types de découpe des rondelles (fig 3) :

— Découpe TR destinée à des mesures dans les directions T et R : à partir de rondelles d'épaisseur 5 mm, on fend des échantillons de forme parallélépipédique. Cette découpe permet d'obtenir, par rondelle, 2 positions radiales «R1» près du cœur et «R2» près de la périphérie avec 6 positions angulaires pour R1, et 6 (épicéa) ou 12 (châtaignier) pour R2.

— Découpe TL pour des mesures dans les directions T et L : à partir de rondelles de 40 mm

Fig 2. Risque de fissuration à cœur associé à différents types d'anisotropie transverse de la déformation induite. (1) Fissuration radiale partant de la périphérie (séchage). (2') Roulure ou (2'') fente radiales en «étoile» (contraintes de croissance, étuvage).

Fig 3. Découpe, numérotation des échantillons et positionnement des pointes.

d'épaisseur, on scie 4 barrettes sur quartier de 40 mm de large, à partir desquelles on fend des planchettes sur dosse de 7,5 mm dans le sens R et 40 mm dans le sens T et L. On obtient cette fois-ci un grand nombre de positions radiales mais 4 positions angulaires seulement, au total, par rondelle, 40 échantillons pour l'épicéa et 56 pour le châtaignier.

Le système de mesure des déformations et d'étuvage (en phase liquide) des échantillons a été décrit dans la première partie de cette étude. On mesure les déplacements, par rapport à une aiguille fixe, de 2 aiguilles mobiles dans des directions orthogonales et distantes de 20 mm de l'aiguille fixe ; le positionnement des aiguilles sur chacun des 2 types d'échantillon est indiqué sur la figure 3. L'échantillon est placé dans de l'eau dont la température est réglée à l'aide d'un thermoplongeur. Quelques es-

sais préliminaires avaient été effectués sur des rondelles TR de châtaignier conservées depuis deux ans dans de l'eau et du formol : les déformations mesurées, induites par un chauffage à 80°C, étaient très faibles, moins de 0,1% dans la direction tangentielle. Une seconde série d'essais préliminaires réalisée sur des rondelles de jujubier plus frais (découpe TR) a été analysée en détail dans la première partie. Elle a permis d'étudier l'influence de la température sur la RHT par la comparaison de divers modes de montée en température. Pour les essais sur le châtaignier et l'épicéa qui sont l'objet de cette discussion, nous avons adopté systématiquement une montée en température progressive de 20 à 80°C en 20 min, suivie de 20 min dans l'eau à 80°C, en portant tous les 10°C l'indication du thermoplongeur sur les enregistrements des déplacements en fonction du temps. Les va-

leurs de déformation obtenues correspondent donc à de la RHT globale, dont n'est pas déduite la déformation thermique réversible ; celle-ci a pu être estimée dans le cas de certains échantillons pour lesquels une seconde montée en température a été effectuée le lendemain : nous avons vérifié qu'elle était toujours faible, inférieure à $\pm 0,1\%$.

Dans le cas de l'épicéa nous avons prélevé à partir d'un seul billon 4 rondelles, 2 de 5 mm (TR) et 2 de 40 mm (TL). Pour le châtaignier 2 billons différents ont été utilisés, donnant d'un côté 8 rondelles de 5 mm (TR), dont 5 seulement ont été utilisées pour l'analyse des résultats, et de l'autre 2 de 40 mm (TL). Pour les rondelles (TL) de châtaignier, une zone de bois de tension a été repérée et la découpe effectuée de manière à l'inclure dans la barrette n° 4 ; la barrette n° 2 contient donc, aux positions radiales correspondantes, du bois dit «opposé». Les 5 rondelles (TR) de châtaignier (B, C, F, G, H) se différencient par le prétraitement. Les échantillons de la rondelle G, une fois découpés, ont été conservés 8 mois dans de l'eau + formol et les rondelles F et H conservées 10 j au congélateur avant la découpe. Dans tous les autres cas le matériau, avant et après découpe, était conservé dans de l'eau changée régulièrement. Tout cela est récapitulé dans le tableau I où sont indiquées, rondelle par rondelle, les conditions de conservation des échantillons entre chaque phase de préparation et de mesure.

Correction de la courbure des cernes

Nous recherchons les variations de la RHT à l'échelle globale de la section. Cela implique que nous voulons ignorer les éventuelles hétérogénéités locales comme les variations à l'intérieur d'un cerne. Cela est autorisé, pour les essais TL, par l'épaisseur de l'échantillon (7,5 mm) qui contient plusieurs cernes, et, pour les essais TR, par la distance suffisante entre pointes (20 mm). Toutefois, ce dernier argument ne vaut en toute rigueur que pour la direction radiale, car dans la direction tangentielle, la «zone utile», c'est-à-dire la portion de bois de l'échantillon dont la réponse mécanique détermine la mesure, ne contient pas un grand nombre de cernes. La position du point de mesure sur le plan de la section transversale est repérée en coordonnées polaires, en se référant au milieu entre la pointe fixe et la pointe mobile. Dans les essais TL, un gradient de la déformation dans l'épaisseur de l'échantillon est susceptible d'induire une flexion, de sorte que le lieu de la mesure est, en toute rigueur, la face de l'échantillon sur laquelle sont plantées les pointes, plutôt que le centre de l'échantillon. Il faut noter que la courbure qui serait induite par cette éventuelle flexion introduirait une perturbation négligeable de la mesure elle-même. En outre, dans l'interprétation des résultats on tiendra compte de la courbure des cernes, en considérant que la mesure effectuée dans la direction tangentielle contient en réalité une certaine proportion x de

Tableau I. Conditions de préparation des échantillons.

Essence	Type essai	N° rondelle	Durée de conservation (j)			Conditions de conservation
			en billon	en rondelle	en échantillon	
Châtaignier	TR	B, C		1	0 à 8	* à -18°C ** eau+formol
		F, H	5	10*	1 à 12	
		G		0	240**	
Châtaignier	TL	P	55	0	1 à 8	
		Q		10	0 à 15	
Épicéa	TR	a	4	1	0	
		b		3	0	
Épicéa	TL	c, d	4	1	0 à 6	

Les rondelles a, b, c, d d'épicéa provenaient du même billon.

valeur radiale, ce qui permet de déduire une estimation de la valeur tangentielle réelle à partir des mesures dans la direction radiale R et la direction tangentielle « apparente » T_a :

$$\eta_{Ta} = (1-x) \eta_T + x \eta_R \Rightarrow \eta_T = \frac{\eta_{Ta} - x \eta_R}{(1-x)}$$

L'estimation du facteur correctif x est basée sur l'hypothèse que le champ de déformation recherché possède (R, T, L) pour directions principales et que par ailleurs il est constant dans la zone de mesure (Berrada, 1991). La figure 4 résume les divers facteurs correctifs sur les positions et les orientations.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Analyse des essais sur le châtaignier et l'épicéa

Essais TR : effet du prétraitement

Les figures 5 et 6 montrent les résultats des essais «TR» obtenus pour les cinq

rondelles de châtaignier B, C, F, G, H et les deux rondelles d'épicéa a, b dans les directions T et R, pour la position radiale «R1» la plus proche du cœur. La déformation est donnée en fonction du temps ; on indique aussi sur les graphes la température du bain au moment de la mesure considérée, tous les 10°C à partir de 50°C où des déformations mesurables apparaissent. Dans ces figures chaque point correspond à la moyenne de 6 mesures.

Sur la figure 5 les groupes B-C, F-H et G se distinguent nettement les uns des autres, ce qui suggère une influence marquée des conditions de conservation. Le stockage long des échantillons (rondelle G), et dans une moindre mesure, le passage au congélateur des rondelles F-H, se traduisent par une déformation tangentielle plus faible. Dans la direction radiale, la déformation est considérablement plus faible pour la rondelle G ; les rondelles F-H et B-C ont des déformations finales très voisines, mais toutefois se distinguent par des cinétiques légèrement différentes en

		Direction de mesure	position radiale	position angulaire	Facteur correctif
TR	R	$r_R = r - \frac{\delta}{2}$	$\theta_R = \frac{\pi}{3} \text{ ou } \frac{\pi}{6}$	
	TR	T	$r_T \approx r$	$\theta_T = \theta_R + \arctg \frac{\delta}{2r}$	$1 - \frac{r}{\delta} \arctg \frac{\delta}{r}$
TL	T	$r_T = r$	$\theta_T = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$	$1 - \frac{2r}{\delta} \arctg \frac{\delta}{2r}$
	TL	L	$r_L = r + \frac{\delta}{8r}$	$\theta_L = \theta_T - \arctg \frac{\delta}{2r}$	

Fig 4. Position moyenne de la zone de mesure et facteurs de correction de la courbure des cernes.

Fig 5. Moyenne par rondelle de la cinétique de RHT du châtaignier dans la zone proche du cœur (essai TR) ; B et C : rondelles sans prétraitement particulier ; F et H : conservation des rondelles au congélateur ; G : conservation 8 mois des échantillons découpés dans l'eau + formol.

début d'essai. La RHT étant un phénomène thermiquement activé, on peut supposer qu'il s'est produit pendant 8 mois à 20°C une partie de ce que l'on observe en quelques minutes à 80°C, sur du bois découpé depuis peu. Cette hypothèse semble confirmée, à première vue, par l'analyse des cinétiques : pour le châtaignier frais (B-C) une part importante de la RHT tangentielle se produit dès que l'eau du bain dépasse 60°C, alors que, pour les échantillons stockés 8 mois, il faut dépasser 70-80°C. Cela va dans le sens d'une explication par 2 groupes de mécanismes viscoélastiques mis en jeu dans l'essai, associés l'un à des températures de transition basses de 40°-50°C, et l'autre à des températures supérieures à 60-70°C, dont nous avons déjà eu l'occasion de discuter d'une manière détaillée à propos de l'interprétation de résultats obtenus sur le jujubier (voir la première

partie). Au bout de 8 mois à température ambiante, les premiers seraient en grande partie relaxés, mais pas les seconds.

On ne peut expliquer de la même manière l'effet de la congélation, qui aurait dû au contraire ralentir le processus. On pourrait invoquer une micro fissuration provoquée par les contraintes internes consécutives aux déformations thermiques, dont on sait qu'elles peuvent s'apparenter à des retraits de séchage (Cinotti, 1989) ; quoi qu'il en soit, le résultat observé doit nous mettre en garde contre une utilisation abusive de la technique de congélation de billons ou rondelles.

Les déformations tangentielles de l'épicéa sont plus faibles que celles du châtaignier. On observe là aussi une différence des cinétiques : la RHT semble s'accélérer plus tardivement, donc pour des températures plus élevées, pour l'épicéa. On ne peut évoquer ici un effet du temps, l'épicéa étant frais au moment de l'essai. Il faudrait plutôt y voir la conséquence d'une distribu-

Fig 6. Moyenne par rondelle de la cinétique de RHT de l'épicéa dans la zone centrale (rondelles a et b, essais TR).

tion différente des températures de transition, non surprenante *a priori* entre un résineux et un feuillu.

Répétabilité

La figure 7 montre la répartition angulaire des mesures pour les rondelles B et C, toujours dans le cas de la position radiale R1 (un point par essai). On s'est limité cette fois-ci à la valeur obtenue à la fin de chaque essai, soit au bout de 35-40 min y compris les 20 min nécessaires à la montée à 20°C ; il en sera de même pour toutes les figures suivantes. On peut constater une bonne correspondance des mesures en des points superposés sur des rondelles appariées, comme cela était déjà suggéré par les courbes des figures 5 et 6 (à l'exception, toutefois, de la mesure radiale de l'épicéa sur la figure 6).

Fig 7. Variation angulaire des valeurs finales de RHT du châtaignier (essais TR). Comparaison des mesures pour 2 rondelles appariées, pour chacune des 2 positions radiales.

Influence de la position radiale

La figure 8 récapitule les résultats obtenus en fonction de l'angle pour chacune des deux positions radiales réalisées dans les essais TR, c'est-à-dire que la position «R1» détaillée dans les graphes précédents (position radiale $z = r/R \approx 0,3$) peut être comparée maintenant à la position «R2» plus excentrée ($z \approx 0,8$) ; chaque point est la moyenne de 2 mesures en des zones superposées des rondelles B-C (châtaignier) et a-b (épicéa). Pour le châtaignier, le niveau de déformation est nettement moins élevé à la position radiale la plus périphérique, qu'il s'agisse de la direction tangentielle ou radiale. Pour l'épicéa, les déformations sont sensiblement du même ordre pour les 2 positions radiales. Nous verrons que les résultats des essais TL confirmeront ces tendances. La valeur

Fig 8. Comparaison pour 2 positions radiales de la variation angulaire des valeurs finales de la RHT du châtaignier et de l'épicéa (essais TR). Moyennes de points superposés sur les rondelles B et C.

moyenne et l'écart type des mesures pour chaque groupe de rondelles sont récapitulés dans le tableau II, en distinguant à chaque fois les deux positions radiales R1 et R2.

Essais TL : identification de la variation radiale

Les figures 9 et 10 donnent des résultats des mesures tangentielles obtenus avec les essais TL, pour le châtaignier et l'épicéa respectivement. On a porté la déformation en fonction de la position radiale, en distinguant chacune des 4 «barrettes» du débit en croix, correspondant à 4 positions angulaires à 90°. Chaque point correspond à la moyenne de 2 mesures à des positions superposées dans les rondelles P-Q (châtaignier) ou c-d (épicéa). Les figures 11 et 12 donnent les valeurs longitudinales. Cette fois-ci les barrettes sont groupées par 2 de manière à montrer la variation de la déformation le long de chacun des 2 diamètres étudiés ; cette représentation est mieux adaptée à la direction longitudinale car elle met en évidence d'éventuels effets de flexion à l'échelle de la tige. Notons que, du fait du positionnement des capteurs, la position angulaire n'est pas rigoureusement constante pour un profil donné. Il faut signaler aussi que,

Fig 9. Variation radiale des valeurs finales de la RHT tangentielle du châtaignier le long de 4 rayons (essais TL). Moyennes de points superposés sur les rondelles P et Q.

pour effectuer la correction de la courbure des cernes dans les mesures tangentielles, nous avons utilisé une expression de η_R déduite des valeurs moyennes indiquées dans le tableau II :

$$\eta_R \approx -0,12 + 0,05z \text{ pour le châtaignier}$$

$$\eta_R \approx -0,15 + 0,06z \text{ pour l'épicéa}$$

Tableau II. Résultats des essais TR.

Rayon relatif Rondelles	z → ↓	η_T (%)						η_R (%)					
		0,35 (R1)			0,84 (R2)			0,25 (R1)			0,75 (R2)		
		n	m	σ	n	m	σ	n	m	σ	n	m	σ
Châtaignier	B-C	12	0,60	0,10	24	0,40	0,09	12	-0,10	0,06	24	-0,08	0,05
Châtaignier	F-H	12	0,41	0,14	24	0,29	0,10	12	-0,11	0,09	24	-0,11	0,09
Châtaignier	G	6	0,24	0,07	12	0,19	0,04	6	-0,03	0,04	12	-0,01	0,05
Epicéa	a-b	12	0,33	0,03	12	0,31	0,05	12	-0,13	0,07	12	-0,10	0,05

$z = r/R$: rayon relatif ou position radiale (R1 : côté cœur ; R2 côté périphérie) ; η_T : RHT tangentielle ; η_R : RHT radiale (valeurs finales, en %) ; n : nombre d'échantillons ; m : moyenne ; σ : écart type.

Fig 10. Variation radiale des valeurs finales de la RHT tangentielle de l'épicéa le long de 4 rayons (essais TL). Moyennes de points superposés sur les rondelles c et d.

Fig 12. Variation radiale des valeurs finales de la RHT longitudinale de l'épicéa le long des 4 rayons (essais TL). Moyennes de points superposés sur les rondelles c et d.

Fig 11. Variation radiale des valeurs finales de la RHT longitudinale du châtaignier le long de 4 rayons (essais TL). Moyennes de points superposés sur les rondelles P et Q.

Pour l'épicéa, les mesures tangentielles sur la figure 10 ne font pas apparaître de variation bien nette en fonction du rayon. Notons une valeur moyenne plus élevée de 0,42 contre 0,32 pour les essais TR (tableau III). L'analyse s'est révélée plus complexe pour le châtaignier dont les barrettes n° 4 contenaient, d'une part, une zone de bois de tension pour $0,25 < z < 0,6$ et, d'autre part, une roulure à la position $z \approx 0,5$. Tout d'abord, si l'on ne tient compte que des points correspondant à du bois présumé «normal» — il faut donc excepter aussi le bois «opposé» situé symétriquement dans la barrette n°2 —, on obtient des valeurs bien concordantes d'une barrette à l'autre (zones I et IV de la figure 9). En outre, il apparaît une décroissance systématique du cœur vers la périphérie. On peut en première approximation estimer

Tableau III. Résultats des essais TL.

Barrettes (rondelles)	↓	η_T (%)			η_L (%)			Lois de variation identifiées pour η_T :
		n	m	σ	n	m	σ	
Châtaignier (P-Q)	1+3	56**	0,46	0,15	64	0,07	0,07	$\eta_T \approx 0,64 - 0,24z$
	BN*	16	0,41	0,14				
	BT*	8	0,24	0,07	***			BT/BN $\approx 1,5$
	BO*	8	0,28	0,13				BO/BN $\approx 0,5$
Épicéa (c-d)	1+2+3+4	73	0,42	0,11	75	0,01	0,08	

$z = r/R$: rayon relatif ou position radiale ; η_T : RHT tangentielle ; η_L : RHT longitudinale (valeurs finales, en %) ; n : nombre d'échantillons, m : moyenne ; σ : écart type ; * : seuls les points correspondant à la zone II de la figure 9 sont pris en compte ; BN : bois normal (barrettes 1+3) ; BT : bois de tension (barrettes 4) ; BO : bois opposé (barrettes 4) ; ** : les échantillons les plus près du cœur n'ont pas été pris en compte ; *** : estimation non effectuée dans la direction L.

que les déformations transverses du bois de châtaignier «normal», dans les directions T et R, sont des fonctions affines du rayon. Sur la figure 13a sont portées les valeurs moyennes des mesures sur les 8 barrettes, corrigées selon la procédure mentionnée plus haut ; les points des barrettes 1 et 3 situés près du cœur n'ont pas été pris en compte. Le résultat de l'approximation par une relation affine :

$$\eta_T \approx 0,64 - 0,24z$$

est indiqué en pointillés, de même que l'expression de η_R identifiée à partir des 2 points de l'essai TR et qui a été utilisée pour la correction de la courbure des cernes. Les 2 valeurs de η_T obtenues dans les essais TR ont aussi été portées sur le graphe. On peut constater que la compatibilité avec les essais TL est excellente malgré le fait que 2 groupes de rondelles provenaient de billons distincts. Cela pourrait constituer une justification *a posteriori*,

Fig 13. Variation radiale de la RHT transverse du châtaignier : a Recherche d'un modèle de variation radiale de la RHT tangentielle ; b Simulation des valeurs expérimentales brutes.

pour le châtaignier tout au moins, de la procédure de correction utilisée (remarquons toutefois que pour l'épicéa, dont pourtant les rondelles TR et TL provenaient du même billon, nous avons trouvé la différence significative signalée plus haut).

Il n'est pas sans intérêt de revenir sur les valeurs expérimentales tangentielles non corrigées. La figure 13b montre les valeurs tangentielles brutes. Cette fois-ci les points près du cœur ont été indiqués (il s'agit alors des moyennes de 4 mesures, prises sur les barrettes 1 et 3). On constate que cette déformation tangentielle apparente décroît fortement vers le cœur jusqu'à devenir légèrement négative. Cela n'a rien d'étonnant puisque la direction de mesure devient en réalité radiale (les échantillons sont débités «sur quartier») lorsqu'on s'approche du cœur. Il est possible de prévoir après coup ce qu'auraient été ces mesures si le matériau se conformait aux modèles de variation tangentielle et radiale identifiés précédemment : on constate sur le graphe une bonne adéquation avec les mesures.

Influence du bois de réaction

L'analyse de l'influence du bois de tension dans la figure 9 ne peut se faire en définitive qu'à partir des 4 points de mesure de la zone marquée «II» de la barrette n°4, les deux points situés au delà ayant manifestement été perturbés par la présence d'une roulure. La déformation tangentielle y est nettement plus importante, dans un rapport 3/2 environ, que dans le bois normal à la même position radiale. En contrepartie, elle est plus faible dans le bois opposé, dans un rapport 1/2 environ (voir le tableau III). Quant à la roulure, on peut se demander si elle est la cause ou la conséquence du fort niveau de RHT observé ; cela pose, plus généralement, le problème

de la préexistence des roulures dans l'arbre et leurs différentes origines possibles (Chanson *et al*, 1989). On remarque que dans la direction L la barrette n° 4 se distingue aussi des autres mais avec un «décalage» par rapport à ce que l'on a trouvé dans la direction T. Outre que l'influence de la roulure est ici imperceptible, l'apparition de valeurs anormales systématiquement négatives semble commencer pour des valeurs légèrement plus élevées du rayon, et surtout se prolonge pratiquement jusqu'à la périphérie. Cette différence met en évidence le découplage entre les directions transverses et la direction longitudinale vis-à-vis de nombreux aspects du comportement mécanique.

Modélisation de la fissuration à cœur

Nous disposons, par l'étude des variations de la RHT dans le plan transverse, de certains des éléments nécessaires à l'étude de la fissuration à cœur induite par l'étuvage humide des grumes. Il ne sont pas suffisants : il nous faudrait aussi, pour mener à bien cette étude, des informations sur le comportement rhéologique du matériau et les critères de rupture transverse, et cela dans toute la gamme de température mise en jeu lors d'un étuvage humide. Anticipant malgré tout sur cette connaissance à venir, nous allons proposer une première approche de ce problème dans le but de montrer quelle utilisation pourrait être faite d'un jeu plus complet de données expérimentales. La simulation qui suit a donc un but plus explicatif que prédictif.

Contraintes de croissance : le modèle de Kübler

Nous nous proposons de calculer les contraintes induites dans une grume par

l'étuvage. Il nous faut tout d'abord tenir compte des contraintes de croissance, qui peuvent avoir déjà donné lieu à de la fissuration à cœur et auxquelles les contraintes «d'étuvage» vont s'ajouter. Nous nous placerons, pour simplifier, dans l'hypothèse d'un comportement élastique en petites déformations, d'isotropie transverse, de déformations planes généralisées et d'une parfaite axisymétrie du problème mécanique. Kübler (1959a, 1959b) a calculé dans ce cas une distribution théorique des contraintes résultant de la constitution par couches successives du matériau dans l'arbre. Il obtient le modèle suivant :

$$\begin{aligned}\sigma_R &= \sigma_R(z) = \Sigma_T \ln z \\ \sigma_T &= \sigma_T(z) = \Sigma_T (1 + \ln z) \\ \sigma_L &= \sigma_L(z) = \Sigma_L (1 + 2 \ln z)\end{aligned} \quad [1]$$

dans lequel $\Sigma_L > 0$ et $\Sigma_T < 0$ sont les composantes longitudinale et tangentielle de la contrainte initiale auquel est soumis le bois au moment de sa formation, du fait de la maturation cellulaire, et σ_R , σ_T , σ_L les composantes du champ de contrainte. Les calculs sont rappelés en Annexe. On remarquera que les expressions ci-dessus ne font intervenir que le rayon relatif $z = r/R$, et qu'elles produisent des contraintes infinies au centre. Cela provient des hypothèses simplificatrices assez restrictives imposées par le modèle, de la pertinence duquel nous ne voulons pas discuter ici en détail (voir, à ce sujet, Archer 1986, Fournier 1989).

Scénario de la fissuration

Même si les contraintes ne peuvent, physiquement et mécaniquement, atteindre les valeurs théoriques du modèle de Kübler, il demeure plausible de supposer que la tendance du bois à se contracter longitudinalement et se dilater longitudinalement en périphérie tend, à la longue, à produire dans la partie centrale un état de

contrainte de traction transverse et de compression longitudinale favorisant son endommagement. Nous admettrons le scénario suivant pour décrire l'évolution de la fissuration à cœur aux différentes étapes de la formation du matériau :

- (i) le champ de contrainte donné par le modèle de Kübler est généré dans la tige ;
- (ii) lorsque la tige a atteint le rayon R , une fissuration initiale assimilable à la mise en place d'un petit trou central de rayon $r_0 = aR$ s'est produite, avec pour effet de redistribuer les contraintes de manière à les faire chuter, en tout point de la section, jusqu'à un niveau acceptable par le matériau ;
- (iii) l'étuvage humide produit un supplément de contrainte qui provoque une progression de la fissuration à cœur, équivalente à l'agrandissement du trou central jusqu'à un rayon $r_1 < r_0$, tel qu'encore une fois les contraintes deviennent supportables par le bois.

Dans cette approche, on met sur un pied d'égalité la fissure radiale (fentes en étoile provoquées par un excès de contrainte tangentielle) et la fissure tangentielle (roulure provoquée par un excès de contrainte radiale). L'une et l'autre sont assimilées, du point de vue de leur action sur le champ de contrainte restant dans la zone non endommagée, à l'ouverture d'un trou central (figure 14) : on ne rend donc

Fig 14. Schématisation par un trou central de la fissuration à cœur.

pas bien compte, dans le cas des fentes en étoiles surtout, de l'effet des concentrations de contrainte en bout de fissure (qui peuvent aussi favoriser l'apparition de rouilles).

Contraintes avant étuvage

L'étape [2] a pour effet de modifier le champ initial donné par les formules [1] de manière suivante (voir Annexe) :

$$\begin{aligned}\sigma'_R(z;a) &= \Sigma_T \left[\ln z + \varphi \frac{1-z^2}{z^2} \right] \\ \sigma'_T(z;a) &= \Sigma_T \left[1 + \ln z - \varphi \frac{1+z^2}{z^2} \right] \quad [2] \\ \sigma'_L(z;a) &= \Sigma_L \left[1 + 2 \ln z + 2 \varphi \right]\end{aligned}$$

où :

$$\varphi = \ln a \frac{a^2}{1-a^2}$$

La figure 15 montre le résultat de cette simulation pour les composantes transverses σ'_T et σ'_R , dans le cas d'une contrainte initiale tangentielle $\Sigma_T = -1$ MPa. On obtient 2 familles de courbes. La première correspond à des valeurs fixées de a , et montre comment les contraintes varient le long d'un rayon. La contrainte radiale σ'_R est nulle à la périphérie ($z = 1$) et au bord du trou ($z = a$), en passant par une traction maximale à la position radiale intermédiaire $z^{\max} = \sqrt{\varphi}$. La contrainte tangentielle passe d'une valeur négative proche de la valeur initiale de maturation Σ_T à la périphérie, à une forte traction au bord du trou. Par exemple, pour un rayon du trou de 2% du rayon de la tige ($a = 0,02$), σ'_R atteint 2,3 MPa à la position radiale $z = 0,056$ (point **b** sur le graphe) et σ'_T passe de presque -1 MPa à la périphérie (**a**) à 6,8 MPa au bord du trou (**c**). La si-

Fig 15. Simulation des contraintes de croissance transverses dans un billon pour différentes tailles du trou central et positions radiales.

tuation initiale sans trou ($a = 0$), qui correspond au modèle de Kübler, est représentée par une droite en pointillés. La seconde famille montre comment évoluent les contraintes transverses à une position radiale z donnée, entre la situation sans trou ($a = 0$) et les cas où le trou a atteint la position considérée ($a = z$) ; on constate que σ'_R diminue et σ'_T augmente, et que les courbes en question sont en fait, ici, des segments de droite de pente $-(1+z^2)/(1-z^2)$. Par exemple, en un point situé à la

position $z = 0,1$, les contraintes vaudraient $\sigma'_R = 2,3 \text{ MPa}$ et $\sigma'_T = 1,5 \text{ MPa}$ en l'absence de trou (point **d**) ; lorsqu'apparaît un trou de rayon relatif $a = 0,05$ (e), on a $\sigma'_R = 1,4 \text{ MPa}$ et $\sigma'_T = 2,0 \text{ MPa}$; enfin lorsque le trou atteint le point, c'est-à-dire que $a = z = 0,1$ (f), on a $\sigma'_R = 0$ et $\sigma'_T = 3,6 \text{ MPa}$.

Contraintes après étuvage

Lorsque ce billon est soumis à un étuvage humide, il subit en chacun de ces points une tendance à la déformation (η_R , η_T , η_L) dont nous admettrons qu'elle est la même partout. Nous avons vu que cela est assez bien justifié au vu des résultats obtenus sur le châtaignier et l'épicéa, tout au moins dans la direction transverse. Il demeure bien un doute, pour la direction tangentielle, au voisinage de la moelle, mais, du fait que nous partons d'un billon déjà fissuré au centre, cela n'est pas trop grave. On peut alors calculer le champ de contrainte supplémentaire $\Delta\sigma$ induit par cet étuvage (voir Annexe 3). Il se trouve que $\Delta\sigma$ a la même expression mathématique que celle donnée par les formules [2], dans lesquelles les constantes Σ_T et Σ_L seraient remplacées respectivement par :

$$\Delta\Sigma_T = - \frac{E (\eta_T - \eta_R)}{2(1 - \nu_{LT} \nu_{LT})}$$

$$\Delta\Sigma_L = - \varphi \Delta\Sigma_T$$

Du fait de cette identité formelle des expressions, et du signe négatif de $\Delta\Sigma_T$ (du fait que $\eta_T > \eta_R$), il est immédiat de constater que l'étuvage ne peut qu'amplifier les contraintes transverses préexistantes, et donc le processus de fissuration qui en résulte. Notons que, dans ce calcul, on a admis un comportement identique au précédent. Cela signifie en particulier que, pour analyser l'étape [3], on raisonne sur le matériau «refroidi», ne se préoccupant

pas de ce qui s'est passé durant l'étuvage lui-même. En outre, l'élasticité supposée du comportement permet d'appliquer le principe de superposition, de sorte qu'à l'issue de l'étape [3] les contraintes s'obtiennent en ajoutant la nouvelle contribution aux valeurs préexistantes :

$$\sigma''_R(z, a) = (\Sigma_T + \Delta\Sigma_T) \left[\ln z + \varphi \frac{1 - z^2}{z^2} \right]$$

$$\sigma''_T(z, a) = (\Sigma_T + \Delta\Sigma_T) \left[1 + \ln z - \varphi \frac{1 + z^2}{z^2} \right] \quad [3]$$

$$\sigma''_L(z, a) = (\Sigma_L + \Delta\Sigma_L) [1 + 2 \ln z - \varphi]$$

On remarquera que la contrainte longitudinale générée par l'étuvage est très faible puisqu'elle est de l'ordre de grandeur des composantes transverses. Cela tient principalement à l'hypothèse faite ici d'homogénéité dans la section de la RHT longitudinale (η_L) ainsi que de la rigidité, qui entraînent que la déformation induite est entièrement absorbée par les déplacements d'ensemble des sections. La figure 16b montre la simulation des composantes transverses lorsqu'à la valeur précédente $\Sigma_T = 1 \text{ MPa}$ s'ajoute un supplément $\Delta\Sigma_T = -1,5 \text{ MPa}$, correspondant à une rigidité transverse $E_T / (1 - \nu_{LT} \nu_{LT})$ de 500 MPa et des valeurs typiques de RHT transverse $\eta_T = +1,5\%$ et $\eta_R = -0,1\%$.

Prédiction de la fissuration

On a repris sur la figure 16a les résultats de la figure 15, avec les mêmes échelles que la figure 16b. Sur la base des 2 simulations de la figure 16, nous pouvons imaginer le déroulement du scénario proposé plus haut. Sur la figure 17a, correspondant à l'étape [2], nous avons considéré 2 situations. Dans la première (cas A), le critère

de rupture est choisi arbitrairement de manière à donner un poids équivalent aux directions radiale et tangentielle ($\sigma_R + \sigma_T < 5$ MPa) ; on s'attend alors à l'apparition d'une fissuration tangentielle (en étoile) jusqu'à un rayon relatif de 0,05. Dans la seconde (cas B) le critère porte sur la contrainte radiale ($\sigma_R < 1,5$ MPa) et correspondrait à un bois de fragilité radiale exceptionnelle ; on a ici l'apparition d'une rature à la position radiale 0,05. Dans un cas comme dans l'autre, la fissuration a permis d'abaisser les contraintes trans-

verses en tout point de la section à des niveaux compatibles avec le critère de rupture. Notons que nous raisonnons sur un rayon relatif : il faut imaginer qu'au fur et à mesure de la croissance de la tige la fissuration à cœur a progressé en proportion, soit par ouverture des fentes en étoile, soit par apparition de nouvelles ratures. Supposons maintenant qu'un billon extrait de cette tige est soumis à l'étuvage. Si la fissuration à cœur ne progressait pas, les contraintes seraient celles de la courbe ($a = 0,05$) dans la fi-

Fig 16. Simulation des contraintes de croissance transverses dans un billon pour différentes tailles du trou central et positions radiales. (a) Contraintes de croissance avant étuvage; (b) Contraintes de croissance + contraintes d'étuvage.

Fig 17. Prédiction de la fissuration pour 2 critères de rupture : (A) Fissuration «en étoile» (fentes radiales); (B) «Roulures» en cas de grande fragilité radiale.

gure 16b, donc excéderaient l'un ou l'autre critère. La figure 17b montre pour quelles valeurs de α les critères peuvent être respectés. Dans le cas A, les fentes vont progresser jusqu'à la position $z = 0,24$; dans le cas B, de nouvelles roulures apparaîtront jusqu'à $z = 0,19$. On pourrait imaginer aussi, dans le second cas, que la rupture tangentielle finisse par l'emporter et que des fentes radiales prennent le relais sur la roulure.

CONCLUSION

(1) Afin d'obtenir la RHT dans les trois différentes positions angulaires et radiales, il a été nécessaire de procéder à 2 types d'essais complémentaires. Les essais TR

ont donné les déformations radiale et tangentielle en 6 à 12 positions angulaires mais seulement 2 positions radiales. Les essais TL ont donné les déformations tangentielle et longitudinale pour un grand nombre de positions radiales mais selon 4 directions angulaires seulement. Le recoupement des 2 méthodes a pu être vérifié, par la bonne concordance des mesures tangentielles, dans le cas du châtaignier. En outre, chaque essai ayant été effectué sur 2 rondelles adjacentes au moins (à l'exception de la rondelle G de châtaignier ayant subi un stockage prolongé), nous avons trouvé une bonne corrélation entre les mesures effectuées sur des points immédiatement superposés dans des rondelles issues du même billon et testées dans des conditions similaires.

(2) Nous avons observé une RHT tangentielle nettement plus importante (dans un rapport 1,5 par rapport à du bois normal) dans le bois de châtaignier qui avait été identifié comme bois de tension, et nettement plus faible (rapport 0,5) dans le bois situé symétriquement par rapport au cœur et que l'on peut considérer comme du bois opposé. Ces indications, jointes au modèle de répartition radiale du bois normal de la figure 13, peuvent servir de base à des simulations numériques du champ de contraintes induites par l'étuvage d'un billon.

(3) Nos résultats concordent avec ceux des auteurs antérieurs tels qu'ils sont rappelés dans l'article de synthèse de Kübler (1987). En particulier il n'est pas possible de dire que la RHT est la simple amplification de la recouvrance instantanée qui sert de base à la mesure de la contrainte de croissance. En effet, pour que cela soit le cas, il faudrait par exemple que la RHT tangentielle ait des valeurs positives en périphérie et négatives dans la partie centrale, ce qui est loin d'être le cas puisqu'elles sont positives partout. Chez le châtaignier, elle aurait même tendance à augmenter en se rapprochant du cœur, et cela au moins jusqu'à de petites valeurs du rayon (pour $r / R > 0,2$). À ce propos, insistons sur le fait que la chute apparente de la RHT tangentielle au voisinage du cœur, observée aussi par Sasaki et Okuyama (1983), peut s'expliquer par un artefact de la mesure qui, du fait de la courbure des cernes, tend à devenir radiale en réalité. Ces observations, dans la direction tangentielle tout au moins, confortent l'hypothèse de Kübler selon laquelle la RHT est pour une bonne part liée à la déformation de maturation, ainsi que l'idée, déjà suggérée par les résultats de l'article précédent, que la mesure de la RHT peut se révéler un moyen privilégié de reconstituer certains aspects de l'histoire de l'arbre. Dans la direction radiale

où la contrainte de maturation est, en principe, nulle (à la pression de l'écorce près), on doit s'attendre à n'observer que l'effet indirect de la contrainte périphérique à l'origine de la RHT (effet «Poisson»), auquel s'ajoute éventuellement, vers le centre, une composante négative correspondant aux contraintes de croissance de traction, subies par le matériau ultérieurement à sa formation.

(4) La simulation numérique des contraintes dans le billon avant et après étuvage demanderait à être reprise sur la base d'hypothèses plus réalistes sur le comportement mécanique : orthotropie, viscoélasticité, critères de rupture, variation radiale et angulaire des propriétés, influence de la température, etc. En outre, pour interpréter correctement la fissuration en bout des grumes, il est nécessaire d'avoir recours à un calcul tridimensionnel permettant de tenir compte des effets de bord (Kübler, 1987). Cette simulation a permis toutefois de montrer la nécessité d'une approche globale de la mécanique du billon, allant des conditions d'élaboration du matériau dans l'arbre jusqu'à l'étude de ses propriétés rhéologiques. Cette recherche peut déboucher sur la mise au point de solutions technologiques aux problèmes de fissuration à cœur qui ont motivé au départ l'étude de la RHT, telles que le «ceinturage» des grumes, alternance séchage-étuvage (Kübler, 1973b), percée d'un trou central en bout de grume (Kübler et Chen, 1975).

ANNEXE

Formulation générale du problème mécanique

La tige est assimilée à une portion de cylindre de section circulaire (rayon R) et de grande longueur auquel est attaché le re-

père cylindrique (R, T, L). Le matériau qui le constitue est élastique linéaire et orthotrope cylindrique ; on suppose en outre qu'il possède la même rigidité dans les directions R et T (hypothèse dite de «quasi-isotropie transverse»). On néglige l'effet de la pesanteur. Le cylindre est éventuellement percé d'un trou concentrique de rayon $r_0 = aR$. Supposons ce cylindre creux soumis à une pression extérieure ($-p$) sur la périphérie, une pression interne ($-p_0$) sur la face interne, un effort normal N sur les extrémités et une déformation induite α en tout point du volume. On cherche à connaître l'état mécanique dans une section du cylindre située loin des extrémités. Cela nous autorise à faire l'hypothèse des déformations planes généralisées selon laquelle les sections planes restent planes ; du fait qu'en outre le chargement respecte la symétrie cylindrique et les directions principales R, T, L, on recherchera des solutions en contrainte σ et déformation ε à cisaillements nuls et ne dépendant que du rayon r . On notera (u_R, u_T, u_L) les composantes du déplacement dans le repère (R, T, L) ($\sigma_R, \sigma_T, \sigma_L$), les composantes normales de la contrainte et ($\varepsilon_R, \varepsilon_T, \varepsilon_L$) celles de la déformation. Ces dernières sont reliées entre elles par la loi du comportement élastique :

$$\begin{aligned}\varepsilon_T &= \frac{\sigma_R - \nu\sigma_T - \nu''\sigma_L}{E} + \alpha_R \\ \varepsilon_T &= \frac{\sigma_T - \nu\sigma_R - \nu''\sigma_L}{E} + \alpha_T \\ \varepsilon_L &= \frac{\sigma_L - \nu'(\sigma_R + \sigma_T)}{E'} + \alpha_L\end{aligned}$$

où $\alpha_R, \alpha_T, \alpha_L$ sont les composantes de la déformation induite, E le module d'Young transverse, E' le module d'Young axial, ν, ν' et ν'' des coefficients de Poisson véri-

fiant $\nu'/E' = \nu''/E$. Pour les calculs présentés ici, il sera plus commode d'écrire la loi de comportement sous la forme équivalente :

$$\begin{aligned}\sigma_R &= C_{11}(\varepsilon_R - \alpha_R) + C_{12}(\varepsilon_T - \alpha_T) + C_{13}(\varepsilon_L - \alpha_L) \\ \sigma_T &= C_{12}(\varepsilon_R - \alpha_R) + C_{22}(\varepsilon_T - \alpha_T) + C_{23}(\varepsilon_L - \alpha_L) \\ \sigma_L &= C_{13}(\varepsilon_R - \alpha_R) + C_{23}(\varepsilon_T - \alpha_T) + C_{33}(\varepsilon_L - \alpha_L)\end{aligned}$$

où les C_{ij} sont les rigidités du matériau et sont reliées aux constantes techniques par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}C_{11} &= C_{22} = \frac{E}{1+\nu} \frac{1-\nu'\nu''}{1-\nu-2\nu'\nu''} \\ C_{12} &= \frac{E}{1+\nu} \frac{\nu + \nu'\nu''}{1-\nu-2\nu'\nu''} \\ C_{13} &= \frac{E\nu'}{1-\nu-2\nu'\nu''} \\ C_{33} &= E' \frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu'\nu''}\end{aligned}$$

On obtient la solution en déplacement en supposant *a priori* la forme particulière de u suivante :

$$u_R = u(r) ; u_T = 0 ; u_L = k z \quad (k = \text{cte})$$

Le champ de déformation ε déduit du déplacement u s'écrit, dans l'hypothèse des petites perturbations (HPP) :

$$\varepsilon_R = u'(r) ; \varepsilon_T = \frac{u(r)}{r} ; \varepsilon_L = k$$

La méthode de résolution consiste à poser l'équilibre mécanique dans le volume du domaine, ce qui se ramène dans le cas présent à écrire l'équation :

$$r \frac{\partial \sigma_R}{\partial r} + \sigma_R - \sigma_T = 0$$

D'où vient une équation différentielle en u :

$$ru''(r) + u'(r) - \frac{u(r)}{r} = \frac{1 - \nu'v''}{1 - \nu - 2\nu'v''} (\alpha_R - \alpha_T)$$

dont la solution est de la forme :

$$u(r) = Ar + \frac{B}{r} - \frac{1 - \nu'v''}{1 - \nu - 2\nu'v''} (\alpha_R - \alpha_T) \frac{r}{2} \ln \frac{r}{R}$$

où les constantes A, B, k s'obtiennent en écrivant les conditions aux limites :

$$\sigma_R(R) = p; \sigma_R(r_0 = p_0); \int_{r_0}^R \sigma_L(r) r dr = \frac{N}{2\pi R^2}$$

d'où finalement le champ de contrainte en fonction du rayon relatif $z=r/R$:

$$\sigma_R(z) = p - (p - p_0) \frac{a^2(1-z^2)}{(1-a^2)z^2} + q \left[\ln z - \frac{1-z^2}{z^2} \right]$$

$$\sigma_T(z) = p + (p - p_0) \frac{a^2(1+z^2)}{(1-a^2)z^2} + q \left[1 + \ln z + \frac{1+z^2}{z^2} \right]$$

$$\sigma_L(z) = \frac{N}{\pi R^2} + q\nu'[1+2 \ln z + 2\varphi]$$

où :

$$\varphi = \frac{a^2}{1-a^2} \ln a; \quad q = \frac{E}{2(1-\nu)} (\alpha_R - \alpha_T)$$

Calcul des contraintes de croissance : le modèle de Kübler

Il nous faut tout d'abord calculer les contraintes résultant de l'élaboration de la tige par adjonction de couches de bois sur

la superficie, c'est-à-dire le champ $\sigma(r, R)$ des contraintes dans une zone située à la distance r du centre lorsque le rayon de la tige vaut R . Une fois déposé, le nouveau bois tend à se déformer de manière à subir une *contrainte initiale* Σ dont les composantes vérifient :

$$\Sigma_R = 0; \Sigma_T < 0; \Sigma_L > 0$$

La condition sur Σ_R signifie que l'on néglige la pression exercée par l'écorce sur le nouveau bois. Considérons le cas d'une tige déjà formée jusqu'à un rayon R , et calculons l'effet d'un petit accroissement δR . La compression tangentielle Σ_T provoquée par la tendance au gonflement du nouveau bois dans la direction transverse est compensée par une traction radiale exercée sur tout le pourtour de l'ancien bois, tandis que la traction Σ_L subie par le nouveau bois sur l'aire $2\pi R \delta R$ est composée par une petite compression $\delta \sigma_L(r; R)$ répartie sur toute la partie déjà formée. On retrouve un cas particulier de calcul précédent sans déformation induite (donc $q = 0$), avec :

$$p = \delta \sigma_R(R; R) = \frac{\delta R}{R} \Sigma_T$$

$$\frac{N}{\pi R^2} = 2 \frac{\delta R}{R} \Sigma_L$$

La condition sur p_0 est remplacée par $a = 0$. On obtient la solution :

$$\delta \sigma_R(r; R) = \delta \sigma_T(r; R) = \frac{\delta R}{R} \Sigma_T \quad (0 < r < R)$$

$$\Sigma_L \cdot 2\pi R \delta R = 0 + \pi R^2 \delta \sigma_L(r; R)$$

$$\Rightarrow \delta \sigma_L(r; R) = - \frac{2\delta R}{R} \Sigma_L \quad (0 < r < R)$$

En passant à la limite $\delta R \rightarrow 0$ on déduit des équations différentielles en R pour les grandeurs cherchées :

$$R \frac{\partial \sigma_R}{\partial R} = R \frac{\partial \sigma_T}{\partial R} = \Sigma_T$$

$$R \frac{\partial \sigma_L}{\partial R} = 2 \Sigma_L$$

La méthode proposée par Kübler (1959a, b) est basée sur l'hypothèse que la contrainte initiale Σ est indépendante du rayon R . Bien qu'une telle condition ne soit possible mécaniquement que pour des valeurs pas trop faibles du rayon r , on peut toutefois l'admettre dans un premier temps tout en sachant que les résultats ne seront pas réalistes quant $r \rightarrow 0$. Les équations se résolvent alors aisément (pour un rayon r fixé) en écrivant les conditions initiales :

$$\sigma_R(R;R) = 0 ; \sigma_T(R;R) = \Sigma_T ; \sigma_L(R;R) = \Sigma_L$$

et on obtient ainsi les expressions [1] où les profils de contrainte ne dépendent que du rayon relatif $z=r/R$.

Contraintes avant étuvage

On suppose que, sous l'effet des contraintes élevées dans la partie centrale de la tige, apparaît une zone endommagée assimilable à un trou de rayon $r_0 = aR$. La linéarité supposée du comportement permet d'appliquer le principe de superposition : l'apparition du trou revient, pour la partie restante, à appliquer au bord du trou un supplément de contrainte radiale annulant la contrainte initiale et sur les extrémités un supplément d'effort normal égal à la résultante des efforts subis par la partie enlevée, de sorte qu'on retrouve le pro-

blème mécanique de départ (sans déformation induite) avec :

$$p=0; p_0 = -\Sigma_T \ln a ; \frac{N}{\pi R^2} = \int_0^a \sigma_L(z) z dz = a^2 \ln a$$

En additionnant la contribution supplémentaire qui en résulte au champ de contrainte initial donné par [1], on obtient les expressions [2].

Contraintes après étuvage

Au champ de contrainte précédent s'ajoute maintenant l'effet de la déformation induite par la RHT, supposée homogène dans le cylindre. Aucun effort extérieur n'étant appliqué, nous utilisons les formules [4] avec $p = p_0 = 0$, $N = 0$, $\alpha = \eta$. On obtient ainsi les expressions [3].

RÉFÉRENCES

- Archer AA (1986) Growth stresses and strains in trees. In: *Springer Series in Wood Science* (E Timell, ed) Springer Verlag, Berlin
- Berrada E (1991) Recouvrance hygrothermique du bois vert. Thèse de doctorat de l'université Montpellier 2, Montpellier
- Cinotti B (1989) La gélivure des chênes : front de gel source de contraintes internes, incidence des propriétés anatomiques et mécano-physiques. Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy
- Chanson B, Leban JM, Thibaut B (1989) La roulture du châtaignier (*Castanea sativa* Mill) *Forêt Méditerranéenne* XI(1), 15-34
- Gril J, Thibaut B, Berrada E, Martin G (1993) Recouvrance hygrothermique du bois vert. I. Influence de la température. Cas du jujubier (*Zizuphus lotus* (L) Lam). *Ann Sci For* 50, 57-70
- Fournier M (1989) Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard. Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy

- Koehler A (1933) Effect of heating wet wood on its subsequent dimensions. *Proc American Wood Preserver's Association* 29, 376-388
- Kübler H (1959a) Studien über wachstumsspannungen des Holzes I. *Holz Roh Werkstoff* 17(1), 1-9
- Kübler H (1959b) Studien über wachstumsspannungen des Holzes I. *Holz Roh Werkstoff* 17(2), 44-54
- Kübler H (1973) Hygrothermal recovery under stress and release of inelastic strain. *Wood Sci* 6(1), 78-86
- Kübler H (1987) Growth stresses in tree stems and related wood properties. *Forest Products Abstracts* 10(3), 61-119
- Kübler H, Chen TH (1975) Prevention of cosscut and heating heart checks in log ends. *Wood Sci Technol* 9(1), 15-24
- Lutz JF (1974) Techniques for peeling, slicing and drying veneer. FPL Madison Report, 228
- MacLean JD (1952) Effect of temperature on the dimensions of green wood. *Proc American Wood Preservers' Association* 48, 376-388
- Movassaghi E, Mothe F, Thibaut B (1986) Étude de faisabilité du déroulage de brins de taillis de châtaignier. Rapport de contrat avec la société ROL, université de Montpellier 2, Montpellier, 30 pp + 6 annexes
- Sasaki Y, Okuyama T (1983) Residual stress and dimensional change on heating green wood. *Mokuzai Gakkaishi* 29(4), 302-307