

Contraintes de croissance, recouvrance différée à l'étuvage et fissuration des grumes : cas du Châtaignier

par **Bernard THIBAUT***, **Meriem FOURNIER**** et **Delphine JULLIEN***

Notre objectif est d'étudier le déterminisme de l'apparition de fentes dans les grumes et billes pendant les opérations de première transformation, tout particulièrement dans le Châtaignier, qui représente une ressource importante mais est fortement déprécié par la fréquence très élevée d'apparition de roulures.

Les causes de la fissuration

De façon générale, ces fentes peuvent être attribuées à trois phénomènes :

- le débit (tronçonnage, sciage ...) des arbres

Celui-ci détruit l'équilibre des efforts présents dans l'arbre sur pied où chaque élément de bois subissait des efforts, appelés pré-contraintes de croissance, de la part du reste de la tige (Archer 1986, Kubler 1987,

Fournier *et al* 1991). En effet, lorsque l'élément de bois (c'est-à-dire la face tronçonnée de la grume, la planche...) est désolidarisé de la structure initiale, ces efforts sont supprimés et se traduisent par des déformations parfois importantes, pouvant entraîner localement des ruptures : c'est le phénomène de libération des précontraintes.

- l'étuvage des billes (avant déroulage par exemple)

La montée en température au dessus de 40°C induit des déformations du bois vert (même maintenu humide en l'absence de tout séchage au dessus du point de saturation des fibres) (Kubler 1973 a et b, Gril *et al* 1993, Gril *et al* 1993). Une grande partie de ces déformations est irréversible et ne se produit qu'aux premiers étuvages. Ce phénomène est appelé "recouvrance hygrothermique" (RHT). Ces déformations, de l'ordre de quelques %, sont un gonflement tangentiel et un retrait radial (environ 5 fois plus faible). Elles sont géométriquement incompatibles dans la bille. En effet, le gonflement tangentiel, qui tend à augmenter le périmètre de la bille, est incompatible avec le retrait radial, qui tend à diminuer son rayon puisque le périmètre et le rayon d'un cercle sont proportionnels. L'incompatibilité des déformations est donc due à leur anisotropie, plus exactement à la différen-

ce entre la déformation tangentielle et la déformation radiale. Le maintien de la cohésion de la bille nécessite alors qu'une partie des déformations provoquées par la montée en température soit empêchée. Le bois empêché de se déformer librement se retrouve alors soumis à des efforts (dits auto-contraintes). Il peut arriver que la résistance du matériau ne soit pas suffisamment élevée pour supporter ces efforts : des ruptures apparaissent qui permettent une géométrie plus compatible avec les déformations produites par la montée en température; dans notre exemple, ces ruptures sont des fentes à cœur et/ou des roulures (Cf. Fig. 1).

- le séchage

Comme la montée en température, le séchage du bois au dessus du point de saturation des fibres se traduit par des déformations du bois (des retraits de l'ordre de quelques %). Ce phénomène, quasiment réversible, est beaucoup plus connu que les déformations d'étuvage rapportées plus haut. Ces déformations sont également parfois incompatibles avec la géométrie des pièces séchées et se traduisent alors par l'apparition d'un champ d'efforts internes (les auto-contraintes de séchage) pouvant occasionner des ruptures (fentes de séchage). Remarquons alors que dans une bille cylindrique circu-

* Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil - URA 1214 du CNRS Université de Montpellier - 2, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier Cedex 5

** Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
Domaine de la Valette BP 5093
34033 Montpellier Cedex

laire, l'anisotropie des retraits de séchage est telle que la différence entre la déformation tangentielle et la déformation radiale est de signe opposé à celle provoquée par l'étuvage (le retrait tangentiel est supérieur au retrait radial). Le séchage provoque donc des fentes différentes de celles occasionnées par l'étuvage (fente tangentielle périphérique) (Cf. Fig. 1).

Signalons enfin que si l'anisotropie des déformations induites par le départ d'eau (ou le chauffage) est une cause générale d'incompatibilité géométrique et de ruptures, intrinsèque à la nature du matériau bois, l'hétérogénéité des distributions d'humidité (ou de température) induite par le procédé de séchage (ou d'étuvage) dans la pièce génère également des déformations incompatibles : un séchage périphérique (alors que le centre de la pièce est encore humide) se traduit par une mise sous tension de la surface de la pièce (qui tend à se rétracter alors que l'intérieur tend à rester inerte) et donc par l'apparition de fentes externes.

En outre, les ruptures peuvent être initiées ou aggravées par des efforts transitoires tels que les efforts exercés

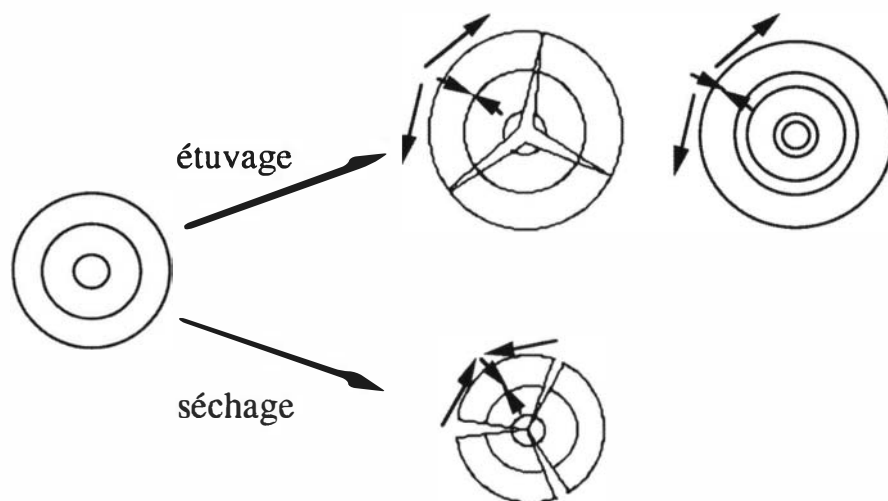


Fig. 1 : Déformations incompatibles et ruptures associées provoquées dans la section transversale d'une bille par l'étuvage d'une part, le séchage d'autre part.

sur la charnière lors de l'abattage, les chocs lors de l'abattage, du débardage, du transport ...

La présente communication est focalisée sur l'analyse des deux premiers phénomènes : contraintes de croissance et contraintes engendrées par l'étuvage.

une tension tangentielle dans le bois interne de la tige. Dans la direction longitudinale (respectivement tangentielle), le bois est donc, lorsqu'il se trouve à la périphérie de la tige, tendu (resp. comprimé), du fait de ses propres déformations de maturation. Il devient ensuite progressivement de moins en moins tendu (resp. comprimé) puis comprimé (resp. tendu) au fur et à mesure qu'il se trouve situé dans les parties internes de la tige, du fait de l'addition et des maturations des nouvelles couches de bois formées ultérieurement. L'allure des distributions des pré-contraintes est donc, le long d'un rayon de la tige (qui traduit l'effet du temps), donnée par la figure 2 (Archer 1986, Fournier *et al.* 1991).

La recouvrance hygrothermique peut être interprétée comme suit (Kubler 1973, Berrada 1991, Gril *et al.* 1993) : la forme naturelle du bois est celle qu'il aurait eu initialement après sa maturation cellulaire si les déformations de maturation longitudinales et tangentielles n'avaient pas été gênées. Une partie de cette forme peut être retrouvée instantanément suite à une découpe qui désolidarise un élément de bois du reste de la tige. Une autre partie a été plus fortement gênée, notamment dans la direction tangentielle, et ne peut être récupérée que par un traitement thermique du bois vert au dessus de 40°C. Ce traitement per-

Les précontraintes de croissance et la recouvrance hygrothermique ont une origine commune : les déformations de maturation.

Les précontraintes de croissance sont dues à la maturation cellulaire du bois, étape de la formation du bois qui correspond à la fin de la différenciation de la paroi secondaire, au cours de laquelle le bois prend sa rigidité définitive. Il est admis que la maturation cellulaire s'accompagne d'une tendance (macroscopique) du bois à se déformer (Archer 1986). Ces déformations de maturation sont généralement un retrait longitudinal et un gonflement transverse. A l'échelle de l'ultra-structure des parois des fibres, elles sont habituellement expliquées par un gonflement de la matrice pariétale provoqué par la lignification et un raccourcissement des microfibrilles de cellulose cristalline dû à leur réarran-

gement (Fournier et Guitard 1993). Toutefois, dans les directions longitudinales et tangentielles, ces déformations ne peuvent pas s'exprimer librement dans l'arbre en croissance car le nouveau bois est adhérent au bois plus ancien : par rapport à sa situation "naturelle" (i.e. celle qu'il aurait s'il était non lié mécaniquement au bois interne), le bois se trouve alors étiré, et donc tendu, longitudinalement, et rétracté, et donc comprimé, tangentiellement juste après sa formation lorsqu'il se trouve à la périphérie de l'arbre. A chaque nouvelle étape de croissance, ces contraintes mécaniques de tension longitudinale et de compression tangentielle sont équilibrées par une compression longitudinale et

met en effet la rupture de liaisons hydrogènes établies au moment de la formation du bois, liaisons qui contribuaient à gêner la déformation de maturation. On s'attend donc à ce que la variabilité de la recouvrance hygrothermique (au sein d'une population de bois) soit liée à celle des déformations mesurées élastiquement immédiatement après une découpe.

Méthodes d'estimation des déformations résiduelles

Nous avons mesuré la relaxation élastique instantanée des précontraintes de maturation ainsi :

Pour la direction longitudinale, deux plots sont plantés dans le bois de la surface (après écorçage); un bâti conçu par le CIRAD Forêt permet alors de mesurer au moyen d'un comparateur la variation de distance entre les plots qui résulte du perçage d'un trou central (Cf. Fig. 3). Plus la surface est tendue longitudinalement, plus les plots s'écartent lors du perçage. Un calcul théorique validé par des expérimentations permet de montrer que compte tenu de la géométrie du capteur (distance entre plots de 45mm, diamètre du trou de 20mm) et de l'anisotropie élastique usuelle des bois, une variation de distance d' $1\mu\text{m}$ correspond à une déformation longitudinale de $12 (\pm 3) \times 10^{-6}$ (Baillères 1994).

Pour les directions transverses (Jullien 1993), une rondelle mince est débitée sur une scie à ruban (grâce à un chariot adapté). Deux plots sont ensuite placés sur la circonférence à la périphérie. Le sciage d'un petit secteur entre ces plots permet ensuite de libérer la plus grande partie des précontraintes transverses et occasionne des déformations de la rondelle. La variation de la distance entre les plots Δl , mesurée par un comparateur monté sur un bâti, permet d'estimer les déformations transverses moyennes de la rondelle : on peut en effet montrer que la grandeur $\Delta l/L$, L étant le périmètre du contour de la rondelle, est

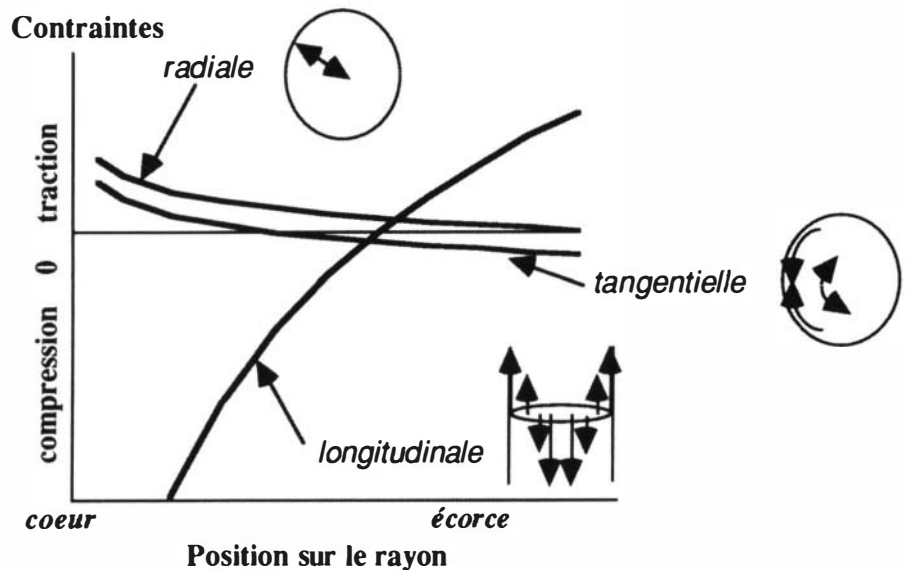


Fig. 2 : Distribution des pré-contraintes de croissance le long du rayon

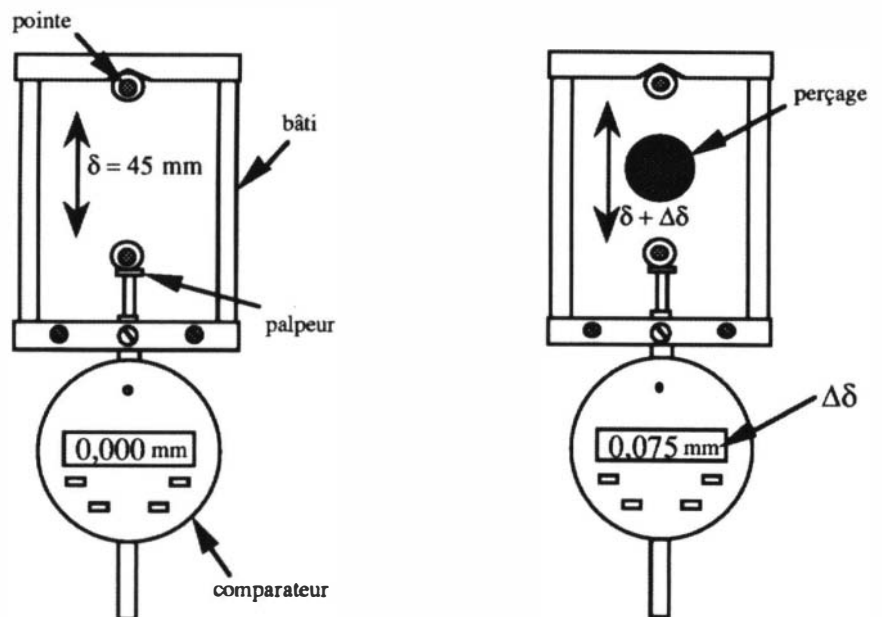


Fig. 3 : Capteur CIRAD et méthode du trou unique pour l'estimation des déformations longitudinales de maturation dans le bois de la surface des arbres.

égale à la différence entre la déformation tangentielle et la déformation radiale : $\epsilon_T - \epsilon_R$, tant que l'ouverture α reste petite (Cf. Fig. 4).

La même technique (Jullien 1993) est ensuite utilisée pour quantifier la recouvrance hygrothermique transverse. La même rondelle est plongée dans un bain d'eau chaude à 80°C pendant une demi-heure, la nouvelle variation Δl induite par cet étuvage est mesurée.

Matériel utilisé

Les expériences ont été conduites sur des bois de châtaigniers provenant de taillis de diverses localisations, en Italie (régions de Turin, de Viterbo, d'Amiata) et en France (Isère, Poitou-Charentes, Ile de France). L'interprétation complète des mesures en fonction de l'âge et de l'histoire de la croissance des arbres, de la nature du

terrain ... et en relation avec d'autres propriétés du bois (présence de bois de tension, résistance mécanique transverse ...) est en cours. Nous énonçons ici quelques résultats préliminaires.

Résultats

Comme dans la plupart des essences feuillues, les déformations longitudinales de maturation mesurées montrent que le bois est partout en tension. Autour d'une circonférence, ces déformations sont soit des profils homogènes (la valeur mesurée par le Capteur CIRAD se situe autour de 60 microns), soit des profils fortement dissymétriques présentant un pic (parfois deux) de forte tension (la valeur mesurée par le capteur CIRAD peut alors dépasser 200 microns) (cf. Fournier *et al.* 1994). Ce type de profil entraîne une forte variabilité des propriétés du bois à l'intérieur de la même section de tige, caractéristique de la présence de bois de tension et d'une réorientation en cours de l'arbre. Les deux types de profils peuvent se rencontrer sur les brins de la même cépée (Cf. Fig. 5), mais nous ne savons pas pour l'instant diagnostiquer avec fiabilité à partir d'indices morphologiques (forme du houppier, inclinaison et dimension des tiges, position relative des brins dans la cépée) les brins sensibles à ce défaut. La fréquence de ces pics de tension, qui se traduisent par des traînes importantes à droite des distributions de valeurs mesurées, peut varier fortement d'une parcelle à l'autre, comme le montrent les histo-

Fig. 5 (ci-contre) : Profils individuels sur six arbres d'une même cépée des valeurs de déformation de maturation longitudinale mesurées en 8 points de la circonférence (0° à 315°, 0° représente la face supposée la plus tendue selon des indices morphologiques de déséquilibre de l'arbre). (σ_R est la contrainte de rupture moyenne, mesurée sur barrette en limite de cerne)

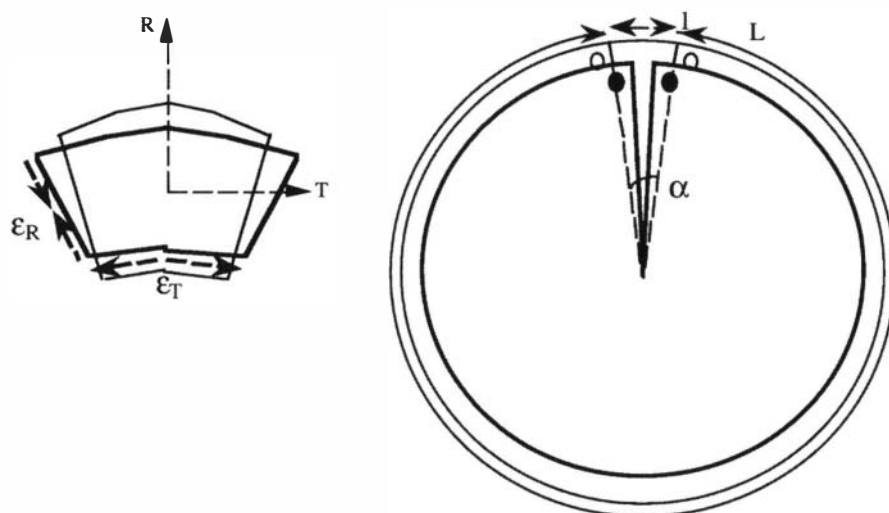
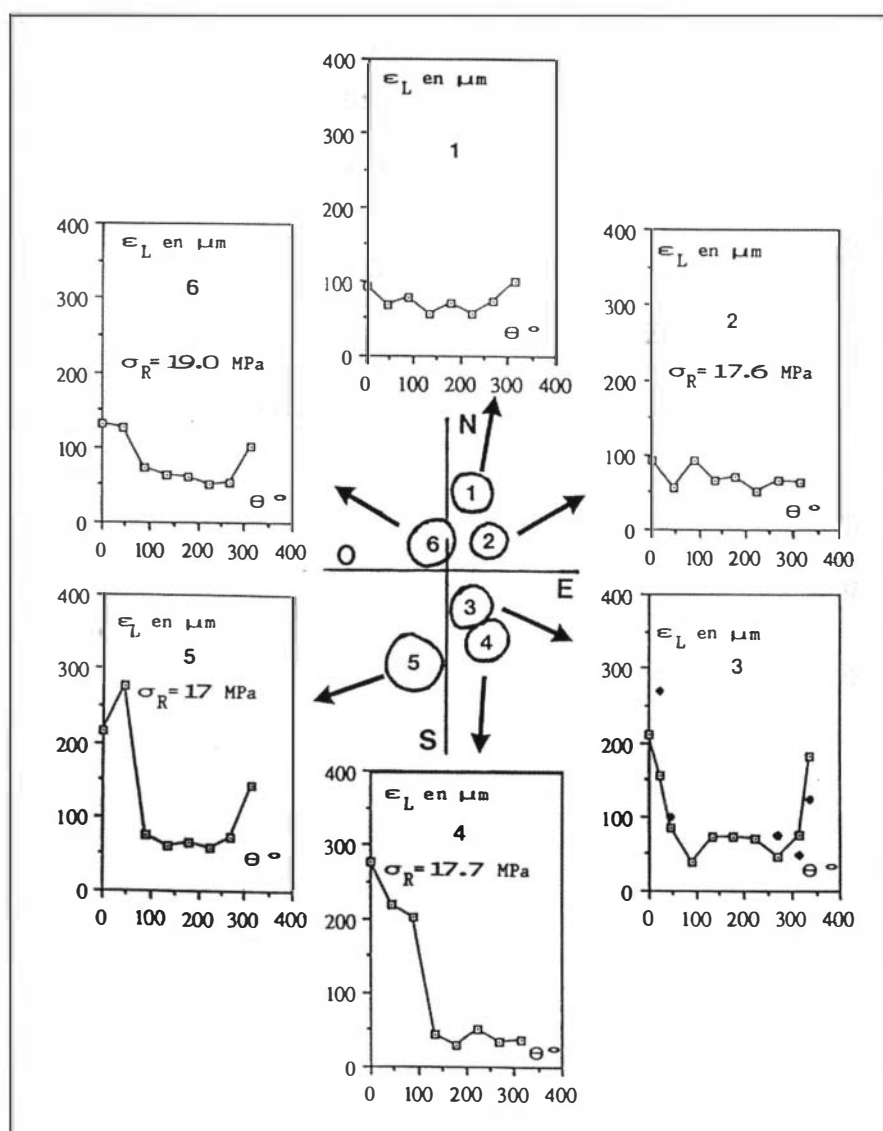


Fig. 4 : Déformation transverse provoquée par l'étuvage et libération des contraintes dans une rondelle par sciage d'un secteur angulaire de faible ouverture.



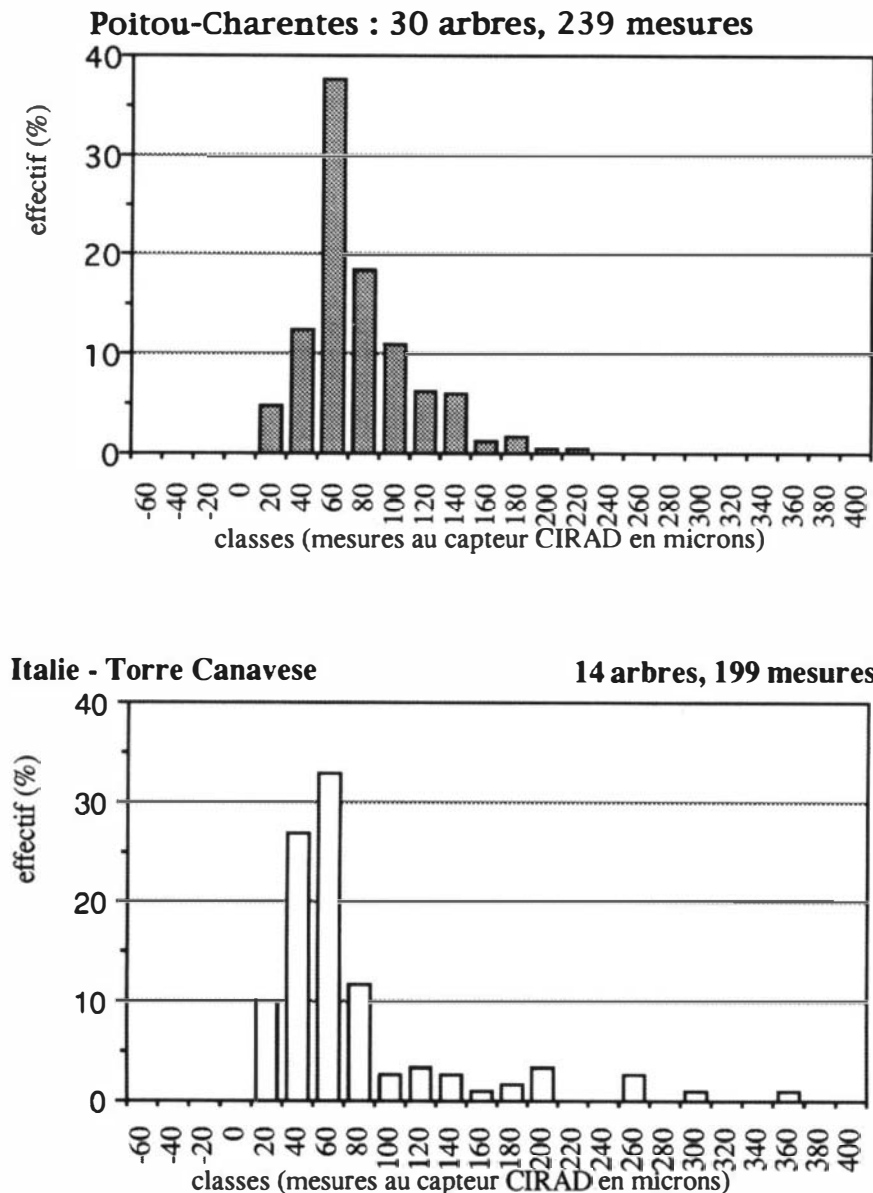


Fig. 6 : Répartition des déformations de maturation longitudinales mesurées sur la périphérie, pour deux populations de Châtaigniers : sur les parcelles de Poitou-Charentes, on observe peu de valeurs fortes (= peu de bois de tension) et une valeur médiane assez élevée (=76 μ m), alors que sur la parcelle italienne, on observe beaucoup de valeurs fortes (présence plus fréquente de bois de tension) et également beaucoup de valeurs faibles inférieures à 60 μ m (d'où une valeur médiane plus faible égale à 66 μ m).

grammes de la figure 6.

La recouvrance élastique (instantanée) transverse mesurée sur les rondelles est de l'ordre de 2‰. Elle n'est pas en relation directe avec la déformation longitudinale moyenne sur la circonférence (précédemment mesurée) (Cf. Fig. 7).

La recouvrance hygrothermique (RHT) transverse mesurée sur rondelle augmente avec la température du bain.

Cette augmentation est plus rapide au delà de 40°C (Cf. Fig. 8 et Berrada 1991). La recouvrance totale est de l'ordre de 2‰ à 20°C (valeur élastique instantanée) et passe à 6,5‰ à 80°C. Au sein d'une population de rondelles, pour une température fixe égale à 80°C, les variations de la RHT transverse sont positivement corrélées aux variations de recouvrance élastique transverse (Cf. Fig. 9).

Discussion et perspectives

L'étuvage au dessus de 60°C se traduit par des déformations transverses incompatibles (RHT) dans une rondelle, d'un ordre de grandeur au moins égal aux déformations élastiques de maturation bloquée dans le bois vert de la rondelle dans l'arbre sur pied. L'étuvage favorise donc l'apparition de fentes à cœur et ce d'autant plus que la température est élevée (Cf. Fig. 10).

La relation qui existe entre la recouvrance élastique instantanée et la RHT transverse montre qu'il s'agit de la manifestation du même phénomène : des déformations "bloquées" dans le bois de l'arbre dès sa formation dont on libère une partie par une découpe, et dont on active la recouvrance différée par chauffage.

Par contre, l'absence de relation entre les déformations élastiques longitudinale et transverse tendrait à prouver que leur variabilité a une origine différente : les fortes déformations longitudinales sont dues à la formation de bois de tension dans un ou plusieurs secteurs angulaires de la tige; ce bois de tension a une structure différente (les fibres ont une paroi cellulaire modifiée comprenant une couche interne dite "gélatineuse" très cellulosique) connue pour entraîner un fort retrait axial du bois lors de sa formation. Par contre, rien ne prouve pour l'instant que cette modification de structure entraîne nécessairement des fortes variations des déformations transverses du tissu. Notons que la libération des déformations longitudinales lors du tronçonnage est en partie responsable des fentes à cœur observables sur les faces des billes abattues. Pour aller plus loin, il sera utile de mesurer avec plus de précision les déformations transverses dans le bois de tension et le bois normal en effectuant plusieurs mesures de recouvrance transverse sur le pourtour de la rondelle.

Des différences significatives entre échantillons de bois et entre population d'arbres ont été observées pour les différents types de mesures effectuées. Il est encore prématuré d'en tirer une conclusion synthétique et fiable quant

à la prédiction des risques de fentes (classement des arbres et des populations). Il est d'ailleurs clair que la variabilité de la propension à fendre peut encore dépendre d'autres propriétés du bois non mesurées ici, telles que la fissilité (Baillères 1994). Des travaux complémentaires sont par ailleurs en cours pour modéliser les phénomènes observés successivement en fonction du champ des contraintes total initial présent dans l'arbre avec son hétérogénéité (Jullien 1994).

Conclusion

Nous disposons d'une "batterie" d'essais mécaniques permettant d'appréhender les phénomènes qui occasionnent des fentes à cœur lors du tronçonnage et leur aggravation lors de l'étuvage, ainsi que la variabilité de l'intensité de ces phénomènes en fonction des arbres et des populations d'arbres.

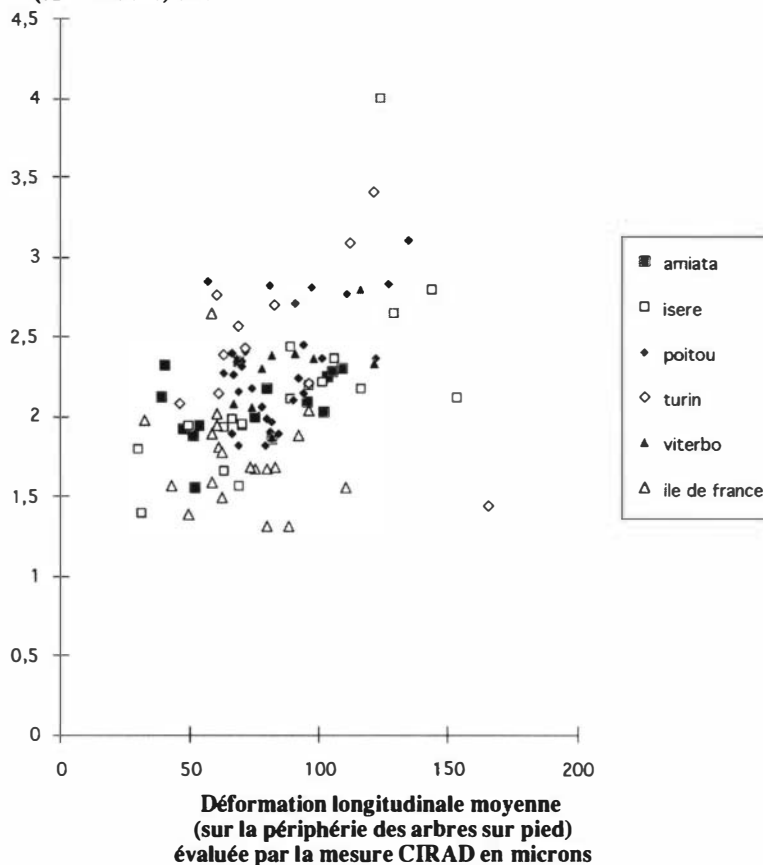
L'aggravation des fentes par l'étuvage est explicable par le phénomène de recouvrance hygrothermique, directement relié aux contraintes de croissance élastique et donc recouvrable instantanément par découpe (en l'absence de chauffage). Les variations entre échantillons de bois de la recouvrance longitudinale ne semblent pas étroitement liées aux variations de recouvrance transverse, et laissent imaginer des mécanismes différents à l'échelle cellulaire et pariétale.

Ce travail préliminaire de mise au point de méthodes et d'acquisition de premières observations devrait se poursuivre par des modélisations mécaniques des phénomènes et des analyses plus systématiques de variabilité.

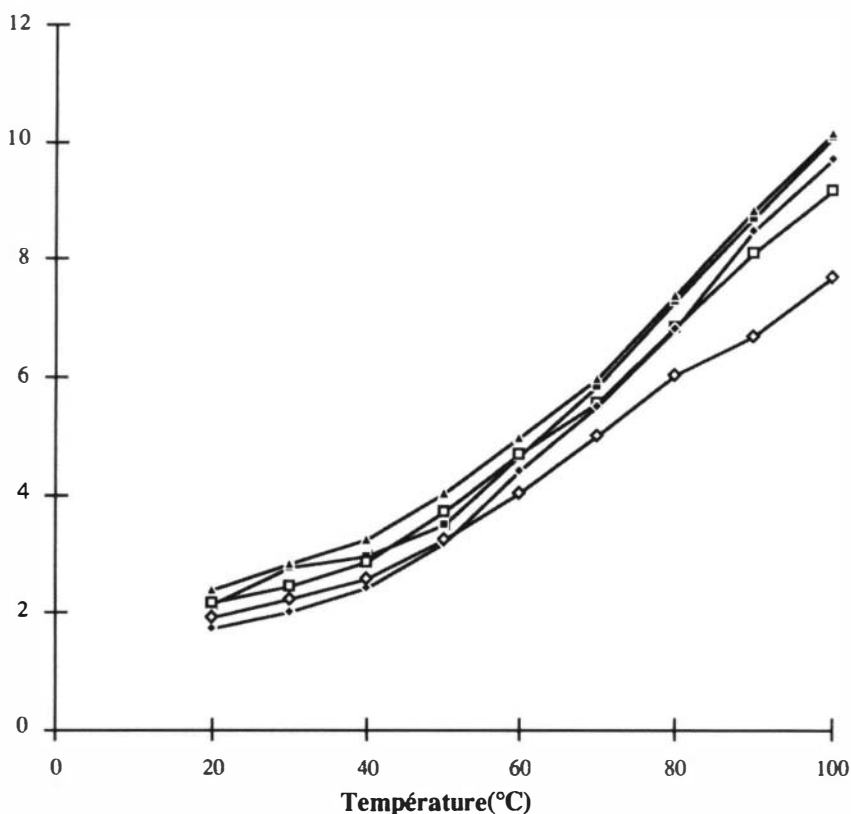
Fig. 7 (ci-dessus) : Relation entre la recouvrance élastique transverse (mesurée sur rondelle) et les déformations longitudinales moyennes (mesurées sur la circonférence de l'arbre sur pied), pour différents Châtaigniers sur différentes parcelles.

Fig. 8 (ci-contre) : Evolution avec la température d'étuvage de la recouvrance hygrothermique transverse sur 5 rondelles de Châtaignier.

Recouvrance élastique transverse (sur rondelle) en ‰



RHT transverse (sur rondelle) en ‰



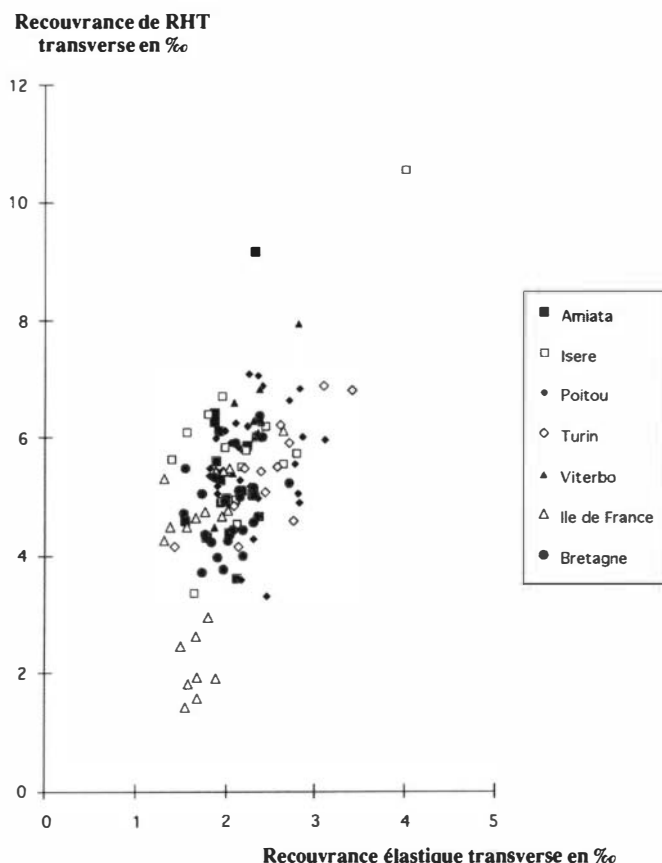


Fig. 9 : Relation entre la recouvrance transverse instantanée et la recouvrance hygrothermique.

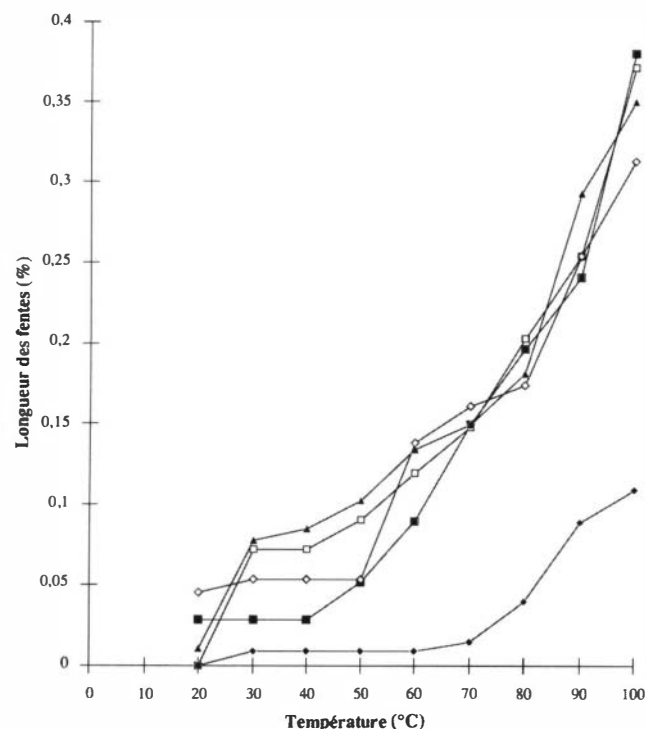


Fig. 10 : Augmentation de la proportion de fentes à cœur (en % du rayon) avec la température d'étuvage sur 5 rondelles de Châtaignier.

Bibliographie

ARCHER, R.R. (1986). Growth stresses and strains in trees. Springer series in wood science. Ed. E. Timell, Springer Verlag.

BAILLERES, H. (1994). Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe Noire - Congo). Hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. Thèse de Doctorat de l'Université de Bordeaux I (spécialité Sciences du Bois).

BERRADA, E. (1991). Recouvrance Hygrothermique du bois vert. Doctorat de l'Université de Montpellier II, spécialité Mécanique.

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. Annales des Sciences Forestières 48 : 527-546

FOURNIER, M., CHANSON, B., THIBAUT, B., GUITARD, D. (1994). Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres. Observations sur différentes espèces. Annales des Sciences Forestières, 51 (2)

FOURNIER, M., D. GUITARD, D. (1994). Les contraintes de croissance générées par la différenciation cellulaire. Acta bot. Gallica 140 (4)

GRIL, J., THIBAUT, B., BERRADA, E., MARTIN G. (1993). Recouvrance hygrothermique du bois vert. I. Influence de la température. Cas du jujubier (*Ziziphus lotus* (L.) Lam.). Annales des Sciences Forestières (50), 57-70.

GRIL, J., BERRADA, E., THIBAUT, B. (1993). Recouvrance hygrothermique du bois vert. II. Variations dans le plan transverse chez le châtaignier et l'épicéa. Modélisation de la fissuration à cœur

provoquée par l'étuvage. Annales des Sciences Forestières (50)

JULLIEN, D. (1993). Evaluer les déformations du bois dans le plan transverse : validation d'une méthode. Sixième séminaire "Architecture, Structure, Mécanique de l'Arbre". Ed. B. Thibaut, LMGC, Université de Montpellier II, France.

JULLIEN, D. (1994). Evaluating transverse strains in green wood. Plant Biomechanics. Colloque Interdisciplinaire du Comité National de la Recherche Scientifique. Montpellier. France. Pub. Elsevier, Paris.

KUBLER, H. (1973a). Role of moisture in hygrothermal recovery. Wood Science 5 (3) : 194-204.

KUBLER, H. (1973b). Hygrothermal recovery under stress and release of inelastic strain. Wood Science 6 (1) 78-86.

KUBLER, H. (1987). Growth stresses in trees and related wood properties. Forestry Abstracts. 48 (3) : 130-189.

Résumé

Contraintes de croissance, recouvrance différée à l'étuvage et fissuration des grumes : cas du Châtaignier

Les phénomènes qui conduisent à la formation de fentes dans les billes lors des opérations de première transformation (abattage, tronçonnage, étuvage) sont analysés : déformations de maturation "bloquées" dans le bois des arbres sur pied sous forme de "contraintes de croissance", modification de l'équilibre des contraintes induite par le débit ou le chauffage, formation de sur-contraintes en cas de déformations non compatibles avec risques de fentes ... Cette analyse conduit à proposer des méthodes pour permettre de comparer différentes situations (différents arbres, différents paramètres pour les procédés de transformation ...) vis-à-vis de l'intensité de ces phénomènes. Ces méthodes passent par les expérimentations suivantes:

- mesure des déformations longitudinales instantanées (consécutives à une découpe) à la surface des arbres sur pied,

- mesure des déformations transverses instantanées (consécutives à une découpe) sur rondelles,

- mesure des déformations transverses induites par l'étuvage (recouvrance hygrothermique), c'est-à-dire par une augmentation de température du bois vert (en évitant tout séchage), sur rondelles.

Les résultats montrent que :

- les déformations longitudinales témoignent d'une tension initiale du bois périphérique dans l'arbre. Elles ne sont pas uniformes sur la circonférence des tiges, mais présentent des valeurs élevées dans des secteurs angulaires. Ceci témoigne de la présence de bois de tension.

- les déformations transverses instantanées sont une elongation du périmètre des rondelles, de l'ordre de 2%. Ceci confirme que le bois tend à une expansion tangentielle et une contraction radiale, et qu'il est donc en com-

pression tangentielle à la surface des arbres, en traction radiale à l'intérieur. Cette elongation transverse n'est pas en liaison évidente avec la déformation longitudinale moyenne sur le périmètre.

- l'étuvage accentue les déformations transverses libérées instantanément. Ceci tend à prouver que les phénomènes impliqués sont identiques. La montée en température n'induirait pas de nouveau "moteur" de déformation mais active les phénomènes de recouvrance observée lors de la première découpe.

- plus la température d'étuvage augmente, plus les déformations augmentent sur les rondelles découpées, et plus les fentes à cœur s'aggravent sur les rondelles entières.

- il existe une variabilité importante des déformations mesurées, selon les parcelles et les individus.

Ce travail préliminaire est en voie d'être complété par des modélisations mécaniques et des analyses de variabilité.

Summary

Growth-related stresses, differed size recovery during heating and splitting in timber : the case of the sweet chestnut

This paper offers an analysis of the phenomena leading to splitting in timber that occurs during the initial handling processes (felling, sawing, drying) : deformation due to "arrested" development in growing trees, designated as growth related stress ; changes in stress patterns caused by sawing and heating : formation of superstress due to deformations that increase the risk of splitting... The analysis leads to suggestions for methods for comparing different situations (different species, different parameters during the processing stages...), taking into account the severity of the various phenomena present. These methods involve the following experimental tests :

- measurement of the instantaneous longitudinal deformation of standing trees (resulting from lopping of a section)

- measurement of the instantaneous transverse deformation of cross-sections (resulting from cutting)

- measurement of transverse deformation due to heating (hygrothermal expansion), that is to say an increase in the temperature of unseasoned wood (avoiding any drying out) cut in to cross sections.

The results show :

- The longitudinal deformations indicate tension in the outer wood of the tree. The stress pattern is not constant around the circumference of the boles : strong deformation is displayed where angles exist, evidence of wood under tension.

- The instantaneous transverse deformations are the increase in the perimeter of cross-sections, in the region of 2 %. This result confirms that the wood tends to expand tangentially and contract radially : thus, it undergoes tangential compression towards the outside and radial contraction towards the inside. This transverse extension appears to have no evident connection with the mean longitudinal deformation along the perimeter.

- Heating reinforces the transverse deformations that occur instantaneously. Such a result tends to prove that the phenomena involved are identical. The increase in temperature does not appear to induce a new "impulse" to deformation but activates a tendency to recovery noted at the time of the first sawing.

- The more the temperature is raised, the greater the deformations in the sawn cross sections as well as splitting to the pith in whole cross sections.

- A wide range in the extent of deformation was observed, depending on the individual specimen and on the plots.

These investigations are in the process of being rounded out with mechanical modelling and variability analyses.