

Mécanismes du collapse du chêne séché sous vide en vapeur d'eau surchauffée

Amélie Demanet et Pierre Morlier*

Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux, CNRS / INRA / Université Bordeaux I, Domaine de l'Hermitage,
BP. 10, F-33610 Cestas Gazinet, France

(Reçu le 18 février 1997 ; accepté le 6 septembre 1999)

Résumé – Dans le cadre d'un projet européen visant à sécher le chêne sous vide en vapeur d'eau surchauffée pour éviter ses discolorations, des essais de séchage ont été réalisés sur pilote de laboratoire, à partir de l'état vert, et l'étude présentée ici est une analyse parallèle, menée à l'échelle microscopique, des fentes de séchage et/ou du collapse, localisé dans les rayons ligneux ou généralisé, qui a pu se produire pendant le traitement, pour aider à la détermination d'une bonne table de séchage. Pour donner une interprétation mécanique correcte de ces phénomènes, il a été nécessaire de connaître les niveaux de résistance mécanique en compression ou en tension du bois vert à différentes températures pour les comparer à la superposition des contraintes internes de séchage et de la tension capillaire. Cet article présente finalement un raisonnement micromécanique qui permet de rendre cohérent, en utilisant des concepts usuels de la mécanique des sols, des ensembles d'observations (rupture, collapse) sur le pilote et de données rhéologiques.

séchage / chêne / collapse / fissuration / micromécanique

Abstract – **Collapse mechanisms of oak drying under vacuum with superheated steam.** This study was performed in the framework of an european project concerning oak drying under vacuum with superheated steam: drying tests were performed in a pilot kiln and combined with the microscopical analysis of the fracture and/or collapses, diffused or localized in the ray cells, which may occur during the process. To provide a correct interpretation of this phenomena, it was necessary to study the mechanical strength in compression or in tension of green oak at different temperatures and to compare it with the superposition of drying stresses and capillary tension. This paper, using general concepts developed for Soil Mechanics, gives a consistent discussion about the experimental results and the micromechanical aspects of the problem.

drying / oak / collapse / fracture / micromechanics

1. INTRODUCTION

L'objet de cette étude est d'expliquer les mécanismes de rupture du chêne engendrés par le séchage sous vide en vapeur d'eau surchauffée (VES). Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet européen CRAFT «Brite Euram» visant à sécher le chêne à partir de l'état vert par ce procédé pour éviter ses discolorations [6, 9]. Il

s'agit dans une première partie de caractériser les ruptures dues au séchage à partir de l'état vert ; trois types de rupture sont décrits : le collapse généralisé, le collapse localisé et les fentes de séchage. Une deuxième partie concerne la détermination en tension et en compression des niveaux de résistance mécanique du chêne auxquels les ruptures de séchage sont provoquées. À la lumière des connaissances acquises sur le rôle

* Correspondance et tirés à part
Tel. 05 57 97 91 00; Fax. 05 56 68 07 13; e-mail: morlier@lrbb3.perroton.inra.fr

mécanique des contraintes de séchage, de la tension capillaire et de la résistance mécanique du chêne en tension et en compression, la troisième partie de l'étude explique les mécanismes du collapse du chêne. Une table de séchage originale qui a permis d'éviter le collapse du chêne est enfin esquissée en conclusion.

2. MATERIEL ET MÉTHODES

2.1. Le plan ligneux du chêne

2.1.1. Éléments cellulaires

À l'intérieur d'un cerne, le matériau est hétérogène puisque composé du bois de printemps (zone initiale poreuse peu dense formée de vaisseaux de très gros diamètres et de parenchyme longitudinal) et du bois d'été (zone plus dense ayant un rôle de soutien : vaisseaux de plus petit diamètre, disposés de façon diffuse, plages de fibres et de parenchyme paratrachéal). La *figure 1* donne plus de détails sur l'organisation du plan ligneux du chêne. C'est à la jonction entre le bois de printemps et le bois d'été que l'on trouve la zone la plus dense du cerne d'accroissement annuel. Ensuite la densité diminue au fur et à mesure que l'on s'approche de la limite de cerne (Owoundi 1992). Les rayons ligneux qui traversent radialement tout le cerne sont en proportion pratiquement constante dans chaque zone du bois initial et du bois final (Sciama 1995) ; ils peuvent être soit unisériés soit multisériés et leur aspect sur la section tangentielle constitue la maillure (*figure 2*). La littérature abondante sur les rayons ligneux témoigne de leur rôle mécanique de renforts radiaux (Guitard et El Amri 1987 ; Koponen et al. 1991 cités par [3]). Ils sont en partie responsable de l'anisotropie marquée du bois dans le plan transverse [3].

2.1.2. Dimension et proportion des éléments cellulaires

Les *tableaux I et II* suivants résument les dimensions et proportions des éléments cellulaires du chêne utiles pour notre étude d'après les travaux de [14] et de Sciama (1995).

Le *tableau III* résume les dimensions, également utiles pour notre étude, des éléments cellulaires ultra-structuraux présents dans le bois.

2.2. Caractérisation des ruptures dues au séchage

Les mécanismes de rupture sont mis en évidence par l'analyse des faciès de rupture au microscope électro-

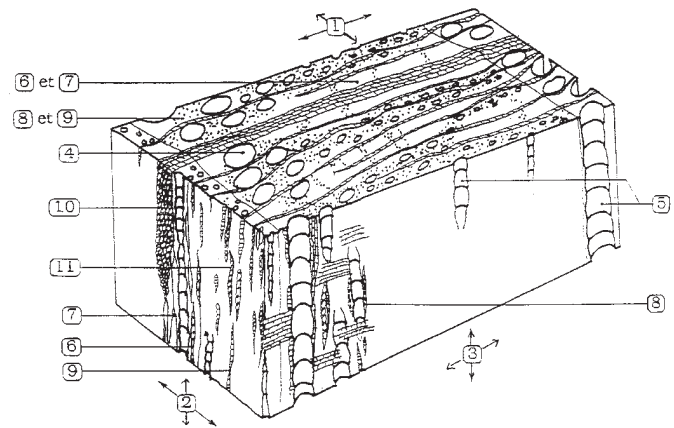


Figure 1. Bloc diagramme de Chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) 1 = Plan transversal; 2 = Plan tangential-longitudinal; 3 = Plan radial-longitudinal; 4 = Pores; 5 = Vaisseaux; 6 = Fibres trachéides; 7 = Fibres libriformes; 8 = Trachéides vasicentriques; 9 = Parenchyme longitudinal en file; 10 = Rayons multisériés; 11 = Rayons unisériés (d'après [14]).

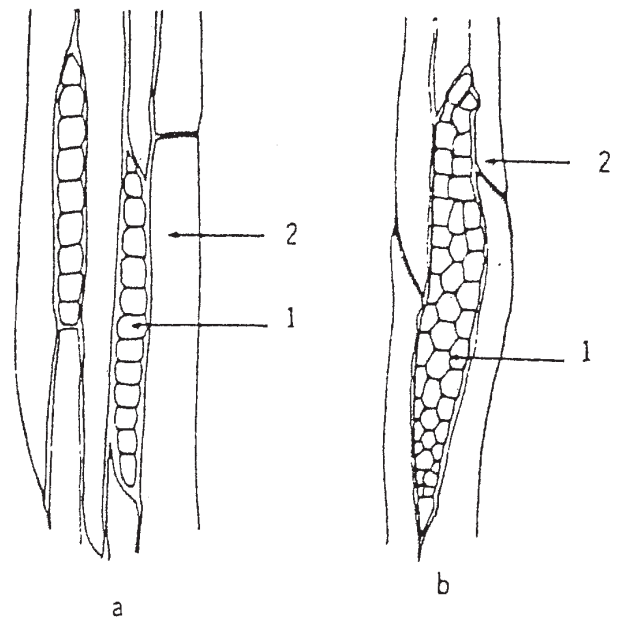


Figure 2. Types de rayons ligneux du chêne dans le plan tangential-longitudinal : (a) unisérié; (b) multisérié, 1 désigne une cellule de parenchyme radial de rayon ligneux, 2 désigne un élément cellulaire longitudinal; (d'après Normand, 1972 cité par [14]).

nique à balayage. Trois mécanismes sont décrits ci-dessous :

- la fissuration (induite en particulier par le séchage naturel) ;

Tableau I. Éléments d'anatomie du chêne, d'après [14].

Pores	Diamètre des pores de bois initial 270 µm (150 ; 350)	Dans les cernes étroits 39,4 % (23,5 % ; 43,7 %)
	Diamètre des pores de bois final 70 µm (30 ; 140)	Dans les cernes larges 7,7 % (3,9 % ; 13 %)
Fibres	Longueur 880 µm (280 ; 1600)	Dans les cernes étroits 44,3 % (40,3 % ; 50 %)
	Diamètre de 0,01 à 0,05 mm	Dans les cernes larges 58,3 % (55,5 % ; 63 %)
Rayons ligneux	Hauteur de rayons multisériés 38 mm (6 ; 80)	Dans les cernes étroits 16,2 % (14,4 % ; 17,9 %)
	Largeur des rayons multisériés de 120 à 1000 µm	Dans les cernes larges 29,3 % (18,1 % ; 33 %)
	Hauteur de rayons unisériés 160 µm (80 ; 240)	

* : Sont notées avant les parenthèses les valeurs moyennes puis entre parenthèse les valeurs minimum et maximum.

Tableau II. Éléments d'anatomie du chêne, d'après Sciama (1995).

Bois initial *	%Fibres	11,5 (0,2 – 37,8)
	%Gros rayons ligneux	6,7 (1,4 – 17,1)
	%Parenchyme	50,4 (34,7 – 63,4)
	%Petits vaisseaux	0,3 (0,0 – 2,2)
	%Gros vaisseaux	31,2 (21,3 – 38,9)
Bois final *	%Fibres	38,9 (9,8 – 63,6)
	%Gros rayons ligneux	7,1 (2,1 – 16,4)
	%Parenchyme	47,7 (26,7 – 72,9)
	%Petits vaisseaux	4,9 (1,5 – 10,2)
	%Gros vaisseaux	1,4 (0,0 – 3,1)

Densité basale (kg/m³) : Fibres (1147) ; Rayons ligneux (815) ; Parenchyme (719)

* : Sont notées avant les parenthèses les valeurs moyennes puis entre parenthèse les valeurs minimum et maximum.

Tableau III. Quelques éléments ultra-structuraux du bois, d'après (*) [1] et (+) [16].

Éléments ultra-structuraux	Dimensions (en diamètre)
Pores de la paroi cellulaire (*)	0,03 µm
Petits vides intercellulaires (*)	0,08 µm
Pores dans les membranes de ponctuation (*)	0,3 µm
Lumen cellulaire (*)	30 µm
Membranes de ponctuations pour les feuillus (+)	de 5 à 170 nm
Micro-vides dans la paroi cellulaire sèche (+)	de 0,3 à 60 nm

• le collapse localisé ;

• et le collapse généralisé (induits par le séchage sous vide en vapeur d'eau surchauffée à 60 °C).

Les tables de séchage sous vide à l'origine des ruptures de collapse localisé et généralisé ont été présentées par Guilmain et al. (1995) et Guilmain (1997).

2.2.1. Fissuration

Il est facile de constater, même à l'oeil nu pendant le séchage du chêne à l'air par exemple, que des fissures apparaissent à la surface ou en bout de la planche dans les rayons ligneux : les cellules de rayons ligneux constituent une véritable zone de faiblesse pour l'essence lors du séchage en général. La surface de fente montre la décohesion de la lamelle mitoyenne des cellules de rayons ligneux multisériés dans le plan RL (*figure 3*).

2.2.2. Collapse localisé

Le collapse localisé se caractérise par l'effondrement d'une rangée de cellules de rayons ligneux sur la surface de fente dans le plan LR associée à la décohesion de la lamelle mitoyenne (*figure 4*).

Cette fractographie particulière est uniquement visible à l'échelle microscopique dans les cellules de rayons ligneux multisériés : à l'échelle de la planche, on observe une fissuration interne et/ou en surface de la planche propagée dans les cellules de rayons ligneux (*figure 5*).

On voit bien que la surface de fente du séchage naturel est bien différente de celle induite par le séchage sous vide en vapeur d'eau surchauffée : à l'échelle

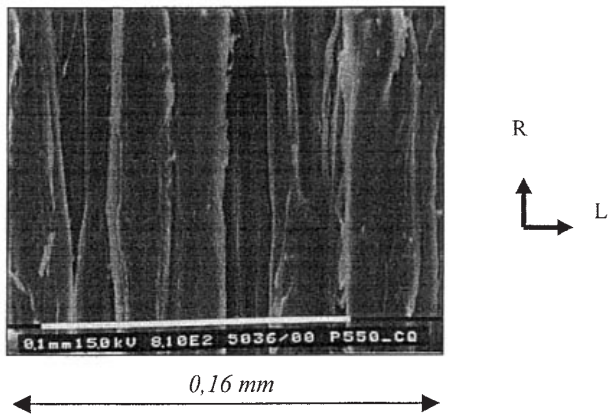


Figure 3. Surface de fente après séchage naturel du chêne à partir de l'état vert (plan LR).

microscopique, on distingue nettement l'écrasement cellulaire des cellules de rayons ligneux multisériés qui donne un aspect de vaguelette à la surface chaque fois que la cellule de rayon s'effondre sur elle-même (*figure 4*), ce qui n'apparaît pas sur la *figure 3*. Ce faciès du collapse localisé est visible aussi bien sur les photos de fentes de surface que sur celles prises dans les fentes internes. Enfin, la fissure de collapse localisé passe bien dans le rayon ligneux et non pas à l'interface du prosenchyme et du rayon ligneux comme on peut le voir couramment lors de la fissuration du chêne au séchage (*figure 6*).

Pour d'autres procédés de séchage utilisés pour le chêne, nous n'avons pas vu décrire dans la littérature des faciès de fente présentant le collapse localisé des cellules de rayon ligneux du chêne : l'apparition du collapse localisé semble lié au procédé de séchage sous vide en vapeur d'eau surchauffée. Le procédé de séchage sous vide étant reconnu comme très rapide, la vitesse importante de diffusion de l'humidité vers la surface peut être à l'origine de l'apparition d'un tel défaut ; la vaporisation de l'humidité à l'intérieur de la planche et la surpression interne engendrée par ce type de procédé risque également d'endommager la structure.

2.2.3. Collapse généralisé

La rupture par écrasement est visible sur les sections transverses après le séchage. Ce collapse est caractérisé par un retrait important de la section : le retrait volumique mesuré à la fin du séchage peut atteindre selon les planches deux fois celui auquel on s'attendrait s'il n'y avait pas de collapse (retrait de séchage normal). À l'échelle microscopique, on distingue l'effondrement cellulaire du plan ligneux (gros vaisseaux dans le plan transverse et rayons ligneux dans le plan tangentiel sur les *figures 7 et 8*) et l'effet est plus marqué sur les cellules de rayons ligneux multisériés que unisériés (*figure 9*).

On peut penser que le collapse prononcé des cellules de rayons ligneux multisériés est en relation étroite avec la particularité de ces cellules au cours du séchage : elles constituent de véritables drains qui transportent la majeure partie de l'humidité du coeur de la planche vers la surface (Olson et al. 1989).

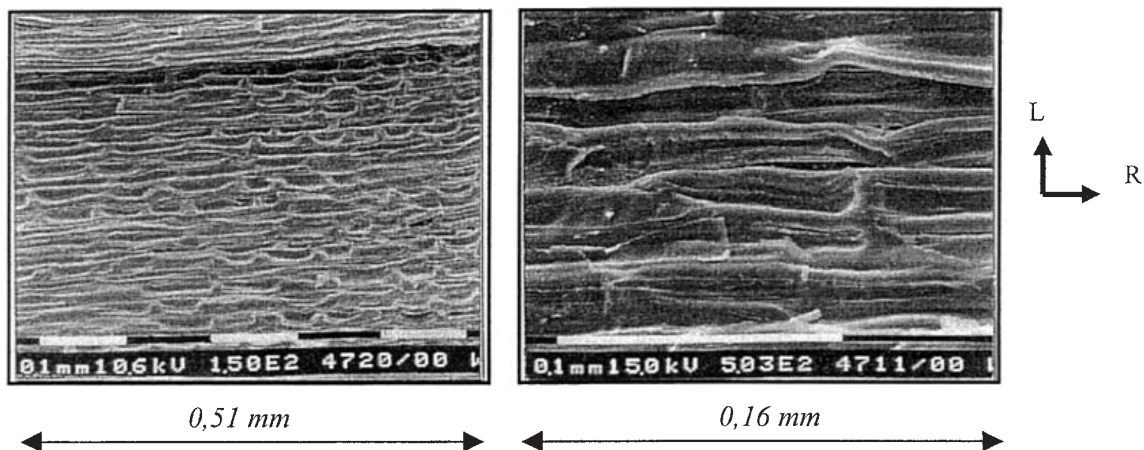


Figure 4. Surface de fente de séchage sous vide en VES : écrasement des cellules de rayons ligneux (plan LR).

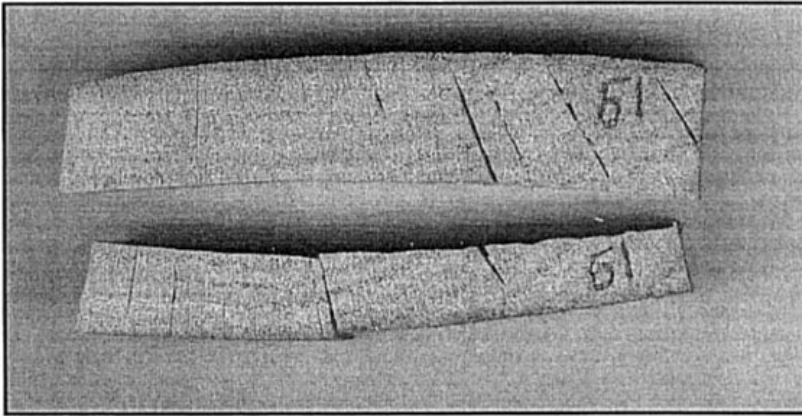


Figure 5. Fissuration des rayons ligneux à l'échelle de la planche (séchage sous vide en VES ; dans le plan RT).

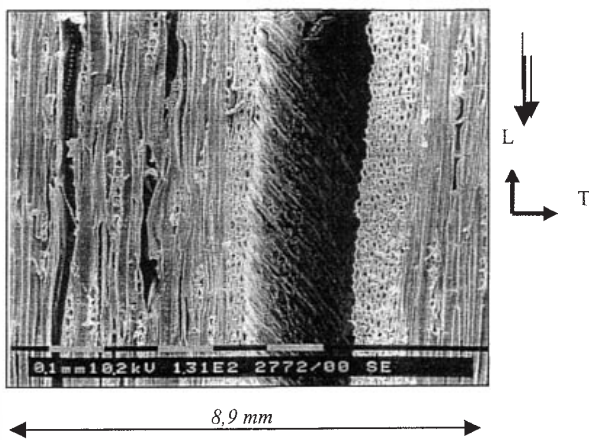


Figure 6. Fissuration de collapse localisé (séchage sous vide en VES ; dans le plan TL).

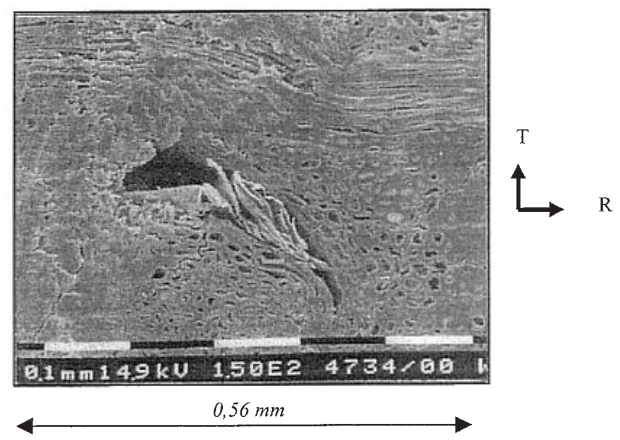


Figure 7. Effondrement de la section transverse après le séchage sous vide en VES (plan RT).

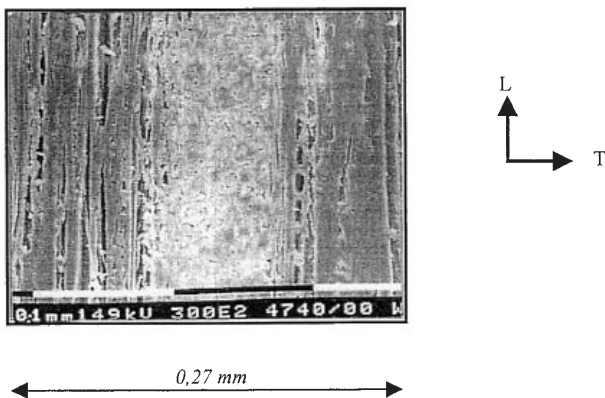


Figure 8. Effondrement de la section tangentielle après le séchage sous vide en VES (plan TL).

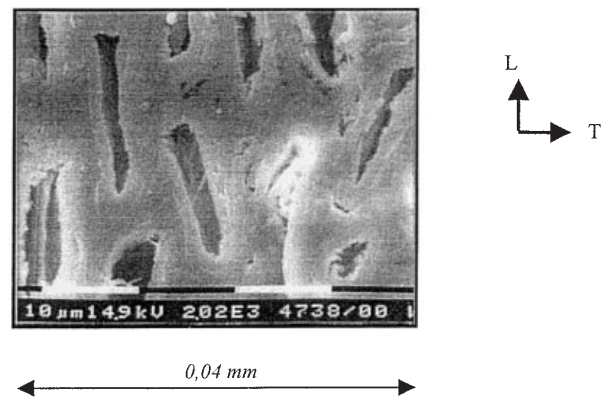


Figure 9. Zoom de la *figure 8* sur les cellules des rayons ligneux multisériés (séchage sous vide en VES ; dans le plan TL).

Ce type de défaut est bien connu chez le chêne lorsqu'il est séché depuis l'état vert sous de conditions sévères de séchage. D'autres essences, notamment certaines espèces d'Eucalyptus, sont aussi propices à ce défaut aussi appelé « macro-collaps » (Vermaas et Bariska 1994).

À ce stade de nos connaissances, et quel que soit le type de collapse induit par le séchage sous vide en VES, notre contribution est l'étude des niveaux de résistance mécanique du chêne pour expliquer les mécanismes de rupture mis en évidence face au rôle mécanique de l'eau capillaire sous tension et des contraintes internes de séchage. Il s'agit de la résistance mécanique en compression et en fissuration (mode I) du chêne à l'état vert en fonction de la température.

2.3. Niveaux de résistance mécanique du chêne à l'état vert en fonction de la température

2.3.1. Description des essais mécaniques

Nous avons choisi d'associer les essais de compression dans le sens transverse au problème du collapse généralisé. Les directions de compression sont le sens radial et le sens tangentiel qui sont les directions de plus faible résistance mécanique [7]. Les dimensions des éprouvettes plates de compression sont identiques à celles utilisées par François pour le même type d'essai ($5 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$) pour mettre en évidence le comportement de type élasto-plastique pour les directions d'orthotropie radiale et tangentielle.

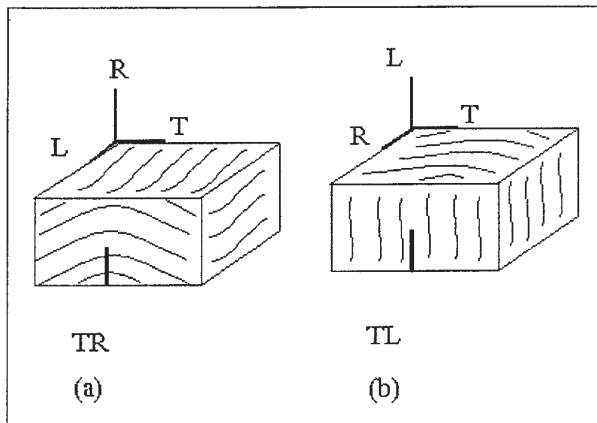


Figure 10. Type d'éprouvette utilisée pour les essais de fissuration

Nous avons associé les essais de fissuration au collapse localisé décrit ci-dessus et aux fentes de séchage. De notre point de vue, l'essai de fissuration est plus représentatif de la décohésion du matériau qu'un essai de traction simple car nous travaillons avec de petits échantillons et il peut s'avérer difficile d'établir pour un essai de traction un champ de contrainte homogène pour interpréter correctement les résultats. Le mode de fissuration des éprouvettes est le mode d'ouverture (mode I) et le plan de propagation choisi est le plan privilégié de propagation des fentes de séchage dans les rayons ligneux de chêne, c'est-à-dire le plan LR. Les essais de fissuration sont réalisés sur une géométrie d'éprouvette proposée par Gustafsson et Larsen (1990) et déjà utilisée au laboratoire [4, 13] pour le même type d'essai mécanique : l'éprouvette SENB (Single Edge Notched Bending) de la figure 10. Deux directions de propagation (figure 11) sont étudiées lorsque les efforts sont dirigés dans la direction tangentielle : la direction radiale (configuration TR) et la direction longitudinale (configuration TL) avec une entaille située soit dans les larges rayons ligneux soit dans les tissus voisins (prosenchyme).

L'éprouvette est constituée de trois parties : la partie centrale, un parallélépipède entaillé en chêne, est collée entre deux renforts en épicea. La partie centrale en chêne a une hauteur et une largeur identique de 20 mm et une épaisseur de 12 mm (figure 10) et la hauteur d'entaille est 10 mm. L'entaille, usinée avec une scie circulaire montée sur un tour, a une épaisseur de 0,2 mm. Les renforts ont été collés avec une colle MDI adaptée au collage du bois vert. L'éprouvette SENB a été calibrée numériquement par une méthode par éléments finis ; elle est utilisée pour une approche par la mécanique de la

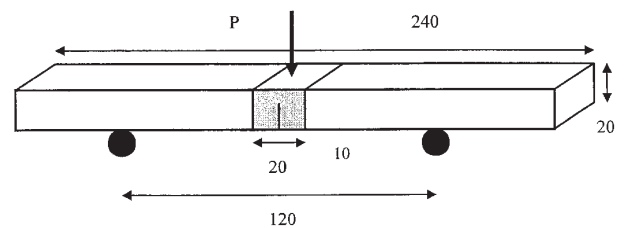


Figure 11. Configuration TL et TR des essais de fissuration.

rupture car elle est peu sensible à l'orthotropie du matériau dans les configurations TL et TR [17].

2.3.2. Conditionnement des éprouvettes

Les éprouvettes de chêne sont prélevées dans les mêmes planches qui ont été séchées sous vide en VES. Avant usinage, ces planches ont été conservées bois contre bois. Les planches les plus humides au milieu de la pile sont usinées pour tailler les éprouvettes d'essai mécanique.

Les éprouvettes de compression sont saturées en eau après usinage, compte tenu de leurs petites dimensions et du séchage superficiel provoqué par l'usinage. La saturation est obtenue par la mise sous vide de l'éprouvette puis par l'injection d'eau : au bout de quatre heures, l'éprouvette étant saturée, elle est enrobée de film plastique imperméable, conditionnée à la température d'essai pendant 20 minutes puis testée en compression.

Les éprouvettes pour l'essai de fissuration sont collées à l'état vert selon la procédure utilisée par [13]. Ensuite, après le collage, chaque éprouvette est enrobée de film plastique, conditionnée en température dans l'enceinte d'essai (20 minutes) et directement testée pour éviter le séchage.

2.3.3. Déroulement des essais mécaniques

Les essais de compression sont réalisés sur une machine d'essai de traction-compression conventionnelle. Les éprouvettes sont comprimées entre deux plateaux : le plateau inférieur est un plateau fixe tandis que le plateau supérieur, relié au capteur de force de 2000 daN, est rotulé. Pour limiter les frottements qui pourraient perturber la réponse du matériau en compression simple, des feuilles anti adhérentes sont disposées entre les plateaux et l'éprouvette. Lors de la mise en place de l'éprouvette, le plateau rotulé vient s'appuyer sur l'éprouvette et compenser les défauts d'usinage après son blocage.

Les essais de fissuration et propagation de fissure sont des essais de flexion trois points réalisés sur la même machine que les essais précédents. Après assemblage de la partie centrale et des renforts sur un bâti de collage adapté, l'éprouvette est mise en appui sur deux rouleaux cylindriques de 15 mm de diamètre. L'appui central est relié au capteur de force de 100 daN et permet d'appliquer la charge par l'intermédiaire d'un rouleau cylindrique de 12 mm de diamètre.

La machine d'essai est reliée au système d'acquisition qui enregistre pour chaque essai la courbe Force-Déplacement de la traverse. Les essais sont réalisés dans une enceinte, ventilée et régulée en température, dans

laquelle est placé le bâti de compression ou de flexion trois points. L'essai débute lorsque, après la mise en place de l'éprouvette, la température de l'enceinte ventilée et régulée en température atteint à nouveau la température de consigne.

Nous testons la résistance mécanique en compression à 34 °C, 40 °C, 50 °C et 60 °C et en fissuration à 20 °C et 60 °C car l'effet de la température est plus marqué sur la résistance en compression qu'en fissuration [2].

2.3.4. Dépouillement des essais

L'essai de compression simple a pour objectif de caractériser la contrainte limite élastique à partir de laquelle le matériau subit une déformation permanente. La courbe obtenue (*figure 12*) met en évidence deux parties : la première phase est linéaire, elle représente le domaine élastique jusqu'à une valeur de contrainte que nous appellerons « S » qui correspond à la résistance limite élastique ; ensuite on note une phase de compression ou consolidation représentée par un plateau horizontal ou une courbe croissante, qui se termine quand tout l'espace poreux est comblé.

Nous évaluons la résistance limite en compression S du chêne dans le sens radial (R) et tangentiel (T) en divisant par la section initiale de l'éprouvette l'ordonnée du point d'intersection des deux phases décrites ci-dessus : la section de l'éprouvette n'a pas à être corrigée pendant la déformation plastique [7].

Pour l'essai de fissuration dont deux exemples de résultats sont donnés *figure 13*, nous utilisons un critère d'initiation et de propagation de fissure [13]. L'énergie de rupture $G_{f,I}$ est l'énergie mécanique rapportée à la surface de fissure ouverte (ou ligament) nécessaire pour produire la rupture totale de l'éprouvette entaillée (1).

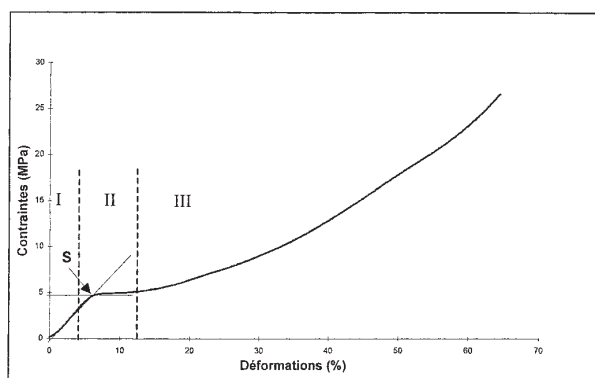


Figure 12. Détermination de la contrainte limite élastique du chêne.

$$G_{r,I} = \frac{1}{S} \left(\int_0^{\delta_0} F d\delta \right) \quad (1)$$

δ : déplacement dans lequel travaille la force F ,
 δ_0 : déplacement à la rupture complète,
 S : surface rompue du ligament,
 F : force enregistrée.

Cette énergie correspond à l'aire comprise sous la courbe Force-Déplacement de la *figure 13* divisée par l'aire de la surface rompue.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats des essais mécaniques en compression simple

3.1.1. Résultats

Pour chaque température, huit éprouvettes radiales et huit éprouvettes tangentielle ont été comprimées.

Les expériences montrent que la résistance limite radiale (S_R) et tangentielle (S_T) diminue en fonction de la température (*figures 14 et 15*).

En outre le rapport d'anisotropie radial/tangentiel est conservé quelle que soit la température (*tableau IV*). Ce rapport est compatible avec les données de [8] soit 1,4.

$$\text{Soit } \eta_{R,T} = \frac{S_{R,T}(T \text{ °C})}{S_{R,T}(34 \text{ °C})} \quad (2)$$

qui représente la perte de résistance du matériau en fonction de la température ; la conservation du rapport d'anisotropie est exprimée par l'évolution similaire dans les directions radiale et tangentielle de la fonction η . Elle indique que tous les tissus ont la même dépendance vis-à-vis de la température (*figure 16*).

Nos résultats expérimentaux sont compatibles avec les modèles existants (*figure 14*), et nous proposons d'introduire l'effet de la température sur la résistance en compression du Chêne dans un des modèles usuels [8], qui s'appuie sur des considérations microscopiques/macrosopiques.

Le modèle de Gibson et Ashby s'écrit :

$$S_R = S_{\text{paroi cellulaire}} k_1 \left(\frac{d_b}{d_{\text{paroi cellulaire}}} \right)^{k_2}$$

$$S_T = S_{\text{paroi cellulaire}} \frac{k_1}{1,4} \left(\frac{d_b}{d_{\text{paroi cellulaire}}} \right)^{k_2}$$

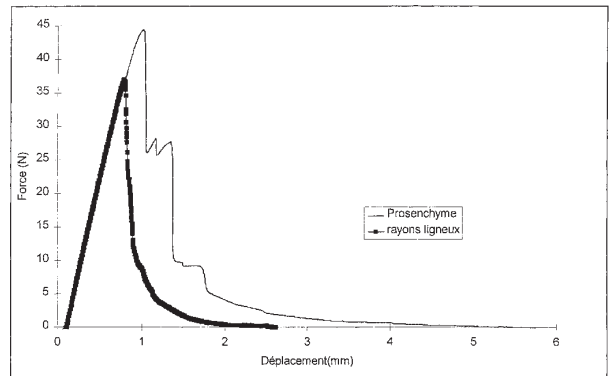


Figure 13. Courbe Force-Déplacement dans l'essai de fissuration.

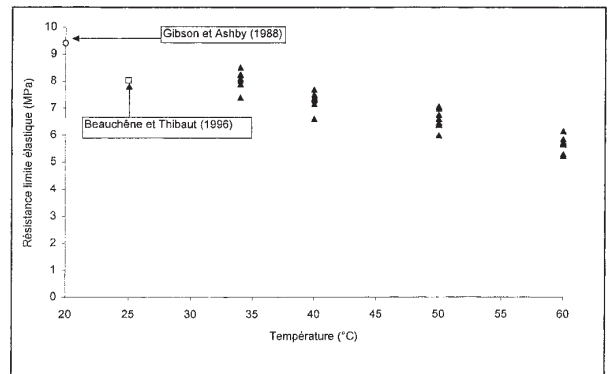


Figure 14. Résistance du Chêne dans le sens radial entre 34 °C et 60 °C ($d_b = 550 \text{ kg/m}^3$). Comparaison entre les modèles de Gibson et Ashby et de Beauchêne et Thibaut.

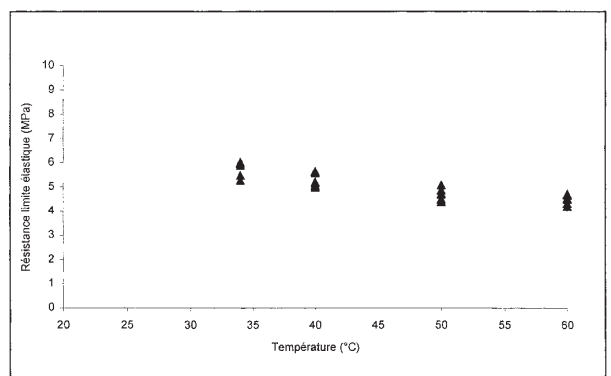


Figure 15. Résistance du Chêne dans le sens tangential entre 34 °C et 60 °C ($d_b = 550 \text{ kg/m}^3$).

avec : $k_1 = 0,20$; $k_2 = 2$; $S_{\text{paroi cellulaire}}$: résistance en compression axiale de la paroi cellulaire ; d_b : densité basale ; $d_{\text{paroi cellulaire}} = 1500 \text{ kg/m}^3$.

À partir du lissage de la fonction η , l'effet de la température s'introduit sous la forme (3) et (4) :

$$S_R = \eta(T \text{ } ^\circ\text{C}) \times S_{\text{paroi cellulaire}} k_1 \left(\frac{d_b}{d_{\text{paroi cellulaire}}} \right)^{k_2}$$

$$S_T = \eta(T \text{ } ^\circ\text{C}) \times S_{\text{paroi cellulaire}} \frac{k_1}{1,4} \left(\frac{d_b}{d_{\text{paroi cellulaire}}} \right)^{k_2} \quad (3)$$

$$\text{avec } \eta(T \text{ } ^\circ\text{C}) = -1,43 \times 10^{-5} \times (T)^3 + 2,16 \times 10^{-3} \times (T)^2 - 0,116 \times (T) + 3,03. \quad (4)$$

Le modèle traduit que l'effet de la température sur la résistance du matériau est à l'échelle microscopique puisqu'il s'applique directement sur la résistance de la paroi cellulaire.

3.2. Résultats des essais de rupture en mode I

Les résultats des essais de fissuration sont présentés sur le *tableau V* pour les configurations TL et TR déjà définies sur la *figure 11* ; les évolutions des énergies de rupture en fonction de la densité basale sont données sur les *figures 17 et 18*.

3.2.1. Évolution de l'énergie de rupture en fonction de la température et de la densité

L'analyse statistique des résultats expérimentaux montre que l'énergie de rupture n'est pas significativement dépendante de la température quelles que soient les configurations TR ou TL (5).

$$\frac{|\bar{G}_{20^\circ\text{C}} - \bar{G}_{60^\circ\text{C}}|}{\sqrt{\frac{\sigma_{20^\circ\text{C}}^2}{n_{20^\circ\text{C}} - 1} + \frac{\sigma_{60^\circ\text{C}}^2}{n_{60^\circ\text{C}} - 1}}} < t \quad (5)$$

Tableau IV. Contraintes limites du chêne à l'état vert dans le plan transverse (MPa) $d_b = 550 \text{ kg/m}^3$.

Température (°C)	n	E.T	C.V (%)	S_R (MPa)	n	E.T	C.V (%)	S_T (MPa)	Rapport d'anisotropie
34	8	0.2	2	8	8	0.4	8	5.8	1.4
40	8	0.4	6	7.3	8	0.2	6	5.2	1.4
50	8	0.3	5	6.6	8	0.1	3	4.7	1.4
60	8	0.2	3	5.7	8	0.2	6	4.5	1.3

Tableau V. Récapitulatif des essais de rupture en mode I pour le Chêne.

Conditions d'essai	Nombre d'observations	Écart-type	Coefficient de variation (%)	Énergie de rupture Sens TL
Bois vert, 20°C, [DEMANET94]	10	33	12	281
Bois vert, 20°C, [DEMANET97]	15	70	22	311
Bois vert, 60°C, [DEMANET94]	8	77	31	251
Bois vert, 60°C, [DEMANET97]	10	36	14	260
$u = 10\%$, 20°C, [DEMANET94]	1	-	-	314
Conditions d'essai	Nombre d'observations	Écart-type	Coefficient de variation (%)	Énergie de rupture Sens TR
Bois vert, 20°C, [DEMANET94]	9	117	25	463
Bois vert, 20°C, [DEMANET97]	14	99	26	378
Bois vert, 60°C, [DEMANET94]	9	72	16	443
Bois vert, 60°C, [DEMANET97]	10	147	29	507
$u = 10\%$, 20°C, [DEMANET94]	10	61	16	388

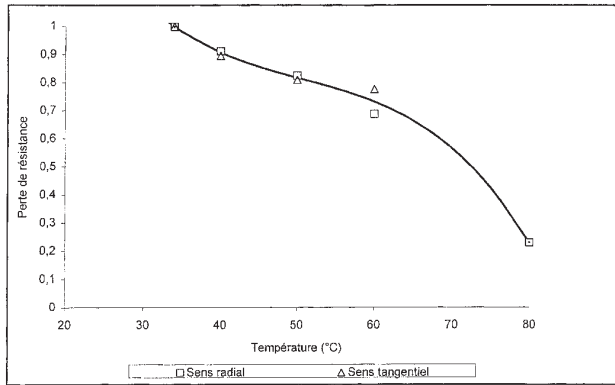


Figure 16. Évolution de la perte de résistance en fonction de la température (fonction η). Les valeurs jusqu'à 60 °C sont déduites de nos données expérimentales et la valeur à 80 °C est déduite des données de [2].

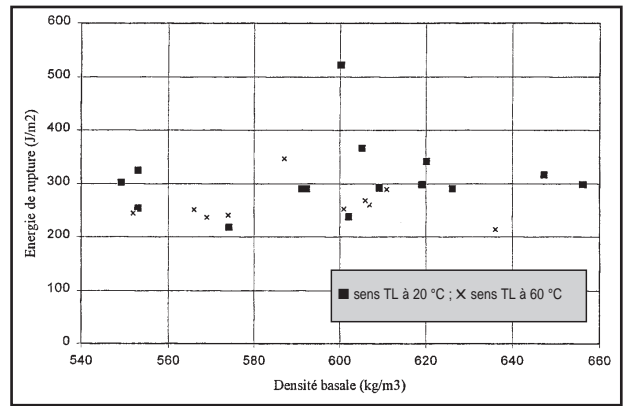


Figure 17. Évolution de l'énergie de rupture en fonction de la densité basale dans la configuration TL à 20 °C et à 60 °C.

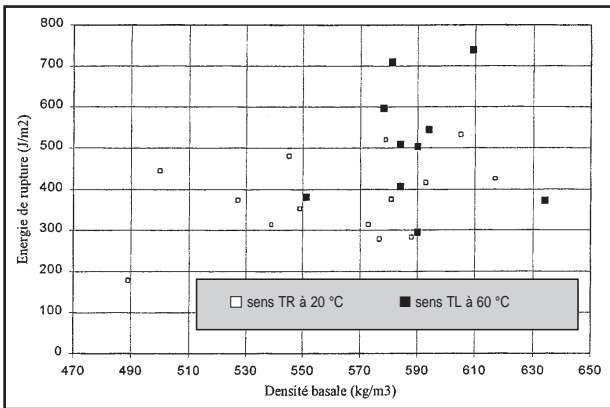


Figure 18. Évolution de l'énergie de rupture en fonction de la densité basale dans la configuration TR à 20 °C et à 60 °C.

avec t : t de Student ($t = 2,1$ pour un risque à 5 % et $t = 2,85$ pour un risque à 1 %) ;
 s : écart-type ; n : nombre d'observations ; \bar{G} : énergie de rupture moyenne.

La différence entre les moyennes des populations à 20 °C et 60 °C n'est pas significative si l'on considère un intervalle de 99 % ni pour le sens TL ni pour le sens TR. La probabilité de se tromper sur l'effet température est de 3 % : de notre point de vue, l'effet température n'est pas statistiquement significatif pour ce type de caractéristique mécanique du matériau et, si vraiment cet effet température existe, il est très faible comparé à celui sur la résistance mécanique en compression. Les résultats des deux campagnes d'essai montrent les mêmes tendances (tableau V).

3.2.2. Chemin emprunté par la fissure dans la configuration TL

Les fissures suivent les éléments longitudinaux du bois lorsqu'elles sont initiées dans le prosenchyme. Lorsqu'elles sont initiées dans les rayons ligneux, elles dévient pour se propager le long des éléments longitudinaux (vaisseaux, fibres).

3.2.3. Chemin emprunté par la fissure dans la configuration TR

Lorsque les fissures sont initiées dans le prosenchyme, elles traversent les cernes dans le bois initial et le bois final et le nombre de décrochements sur la courbe force/déplacement correspond au nombre de zones initiales poreuses. Ce résultat a déjà été mis en évidence par une analyse fractographique [4]. Lorsque les fissures sont initiées dans les rayons ligneux, elles continuent de se propager dans ces éléments cellulaires, ce qui a été vérifié au microscope (figure 19).

La fractographie de la figure 19 permet bien, en effet, de reconnaître la décohésion de la lamelle mitoyenne des cellules de rayons ligneux : les cellules sont intactes et la surface des parois ne présente pas de déchirements particuliers. On ne constate pas le faciès de vaguelettes comme sur la surface des fentes de collapse localisé. En revanche, la surface ressemble à celle des fentes de séchage déjà décrites (paragraphes 2a et 2b) car les cellules de rayons ligneux multisériés ne sont pas effondrées.

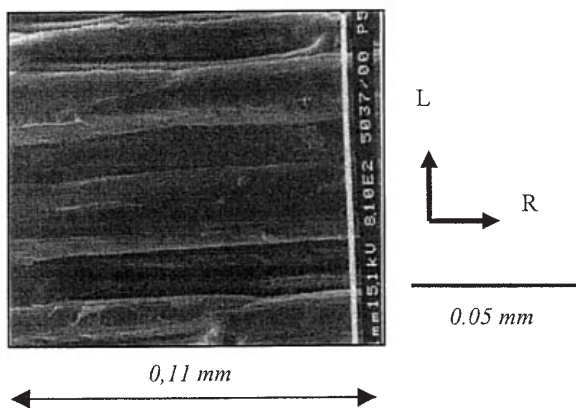


Figure 19. Surface de fissuration d'un rayon ligneux multisérié (après essai de propagation de fissure ; plan LR).

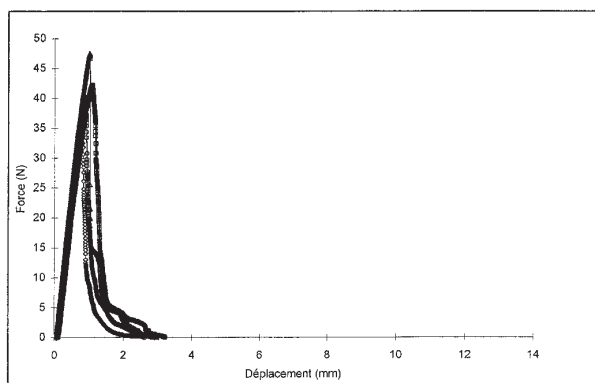


Figure 20. Comportement mécanique des rayons ligneux dans la configuration TR à 20°C.

3.2.4. Effet de la température sur la rupture des rayons ligneux dans la configuration TR

L'effet de la température est décelé sur la forme de la courbe force/déplacement par une diminution de la force à rupture de 45 N à 30 N entre 20°C et 60°C et par une phase post-pic plus longue à 60°C qu'à 20°C (figures 20 et 21). Bien que l'énergie de rupture soit à peu près la même, la fissure est plus difficile à initier à basse température.

3.4. Rôle mécanique de l'eau au cours du séchage

L'eau se présente sous trois formes dans le bois vert : l'eau libre, ou eau capillaire, contenue dans les cavités de la paroi cellulaire, l'eau liée, ou eau hygroscopique, contenue à l'intérieur de la paroi cellulaire et la vapeur d'eau contenue dans les parties des cavités qui ne sont pas saturées d'eau liquide. La teneur en eau à laquelle il n'y a plus, suite à un séchage, d'eau libre est traditionnellement appelée PSF (point de saturation des fibres d'après Tiemman) ; au-dessus du PSF l'eau peut être considérée comme une phase continue, d'où la notion de pression interstitielle de la mécanique des sols – ou de tension capillaire qu'on va évoquer pour le bois ci-dessous. On verra que cette pression – ou cette tension – peut être rendue équivalente à une sollicitation de tension -ou de compression- sur le squelette solide d'un matériau poreux et donc ajoutée algébriquement au tenseur habituel des contraintes ; ce dernier, ainsi modifié, peut se dévoiler admissible ou non pour ce squelette

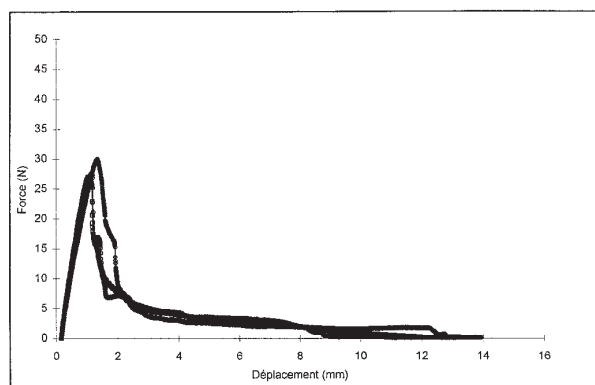


Figure 21. Comportement mécanique des rayons ligneux dans la configuration TR à 60°C.

(notion de critère) et déterminer la rupture -ou le collaps- d'un matériau comme le bois.

3.4.1. Le collapse du bois

Le collapse est connu comme un retrait anormal des cellules qui se produit bien au-dessus du point de saturation des fibres lorsque le bois est très humide ou vert, frais de sciage. Ce retrait non homogène peut aussi causer une sévère distorsion du bois et/ou des fentes. L'explication la plus souvent donnée et acceptée est le développement d'une tension capillaire dans les cavités du bois plus ou moins saturé d'eau libre qui provoque l'effondrement des parois cellulaires lorsque la tension

hydrostatique dépasse la résistance limite en compression de ces dernières (Tiemman 1915 cité par Vermaas et Bariska 1994). Mais la littérature montre que de nombreux facteurs contribuent en partie au développement du collapse du bois parmi lesquels : l'ultra-structure de la paroi cellulaire, les propriétés de résistance mécanique, la perméabilité des tissus cellulaires, les conditions de séchage (Vermaas et Bariska 1994). L'apparition du collapse avec ou sans fente interne est alors reconnue comme le résultat de la superposition des contraintes internes de séchage et de la tension hydrostatique et du rôle mécanique prépondérant de la tension hydrostatique dans l'eau libre [1]. Décrivons rapidement les contraintes de séchage et la tension capillaire.

3.4.2. Les contraintes internes de séchage

Le niveau des contraintes internes de séchage dépend de la table de séchage utilisée : elle contrôle la cinétique des transferts de chaleur et de masse dans les planches pendant le séchage. Cette cinétique crée des gradients de teneur en eau dans le matériau qui évoluent au cours du temps et engendrent des contraintes internes de séchage. Ces contraintes internes sont dues à plusieurs phénomènes qui contribuent à un état global de contraintes. Elles peuvent avoir trois types d'origine en fonction de l'échelle de la structure (Schniewind 1959) que l'on observe :

- À l'échelle de la paroi cellulaire, les retraits inégaux des couches cellulaires en raison de l'orientation différente des microfibrilles dans chaque couche, et le développement de la tension hydrostatique induite par l'eau dans les cavités cellulaires et les microcapillaires.

- À l'échelle intercellulaire, l'interaction de tissus et d'agrégats de cellules à potentiel de retrait inégal, induit des contraintes de tension sur les fibres qui ont le plus fort potentiel de retrait et des contraintes de compression sur les cellules qui ont le plus faible potentiel de retrait : ce sont les interactions aux interfaces fibres - rayons ligneux et bois d'été - bois de printemps. Ce sont des contraintes du second ordre.

- À l'échelle macroscopique, la naissance de gradients d'humidité plus ou moins importants pendant le transfert de l'humidité du cœur vers la surface des planches induit des contraintes internes de tension à la surface et de compression à cœur au début du séchage. Ces contraintes se relaxent en raison du fluage du matériau au cours du séchage. Ces contraintes relaxées à la fin du séchage tendent à empêcher l'intérieur de se rétracter suffisamment et induisent des contraintes internes de tension à cœur et par réaction des contraintes de compression en surface à la fin du séchage. Des potentiels de retraits inégaux entre différentes zones de bois qui inter-

agissent entre elles : présence de bois de réaction avec du bois normal, présence de bois juvénile et de bois mature sont aussi à l'origine de contraintes internes.

3.4.3. La tension capillaire

Retenons pour le bois, de façon classique mais assez simpliste, l'image d'un ensemble de capillaires cylindriques possédant un spectre de rayons variables. La relation de Laplace (6) donnant la pression capillaire à l'équilibre dans un capillaire de section circulaire est alors

$$P_{\text{Capillaire}} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (6)$$

où r est le rayon du capillaire, σ la tension superficielle de l'eau et θ l'angle de mouillage. Pour le matériau réel, c'est le rayon équivalent des pores, lié à la morphologie de l'espace poreux, qui fixe cette pression capillaire : une des manifestations de celle-ci est l'ascension capillaire, grandeur physique objective, une fois l'échelle d'observation fixée. Le spectre de rayons de pores intéressant pour la capillarité peut également être appréhendé par la porosimétrie au mercure, si l'on fait l'hypothèse que l'espace poreux ainsi caractérisé ne dépend pas de la teneur en eau liée.

Dans la formule (6), et pour l'eau, fluide mouillant, $\theta = 0$ et $\sigma = 0,073 \text{ N/m}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$; autour de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ la tension superficielle varie de $2,19 \text{ }^\circ\text{‰}$ par degré.

D'où l'on tire l'approximation de [16]

$$T_{\text{Capillaire}} = \frac{0,146}{r} \quad (7)$$

3.4.4. Équivalence de Terzaghi

Selon le principe de Terzaghi, utilisé en Mécanique des Sols [15], lorsqu'un milieu poreux est composé de deux phases seulement, une phase liquide (ici l'eau libre) continue, une phase solide (ici la matière ligneuse et son eau liée), il est postulé l'existence d'un nouveau tenseur dit tenseur des contraintes effectives qui, à lui seul, régit le comportement du squelette granulaire et du sol. L'équivalence entre la tension capillaire locale et les contraintes globales effectives est bien connue pour les milieux poreux (sols, roches) et peut vraisemblablement être applicable au bois en raison de sa gamme de porosité étendue (8) ; elle s'écrit

$$\sigma_{ij}^{\text{effective}} = \sigma_{ij}^{\text{totale}} - T_{\text{Capillaire}} \delta_{ij} \quad (8)$$

où $\sigma_{ij}^{effective}$ est le tenseur des contraintes effectives ($\sigma_{ij} > 0$ est une tension), σ_{ij}^{totale} le tenseur des contraintes, de séchage, macroscopiques, $T_{Capillaire}$ la valeur arithmétique de la tension de fluide, δ_{ij} le tenseur unité.

Le schéma mécanique équivalent est applicable au bois si le deuxième terme de la somme des chargements (figure 22) correspond à un état neutre et c'est effectivement le cas si la contribution de l'état dit neutre au risque de rupture et à la déformation du solide poreux est négligeable.

Le principe de Terzaghi peut être appliqué à n'importe quelle échelle de description pourvu que σ_{ij}^{totale} et u aient un sens.

3.5. Discussion

À la lumière des notions du paragraphe 4 et des mesures de caractéristiques mécaniques du chêne saturé (paragraphe 3), on va maintenant discuter l'existence des ruptures décrites au paragraphe 2.

3.5.1. Fissuration du chêne en surface (séchage à l'air)

Les résultats des essais de propagation de fissure permettent de conclure sur le comportement à la rupture en traction transverse des rayons ligneux : dans le plan transverse en traction tangentielle, la zone anatomique de plus grande faiblesse est le rayon ligneux multisérié.

Ce résultat peut expliquer le mécanisme de l'apparition des fentes de séchage dans le rayon ligneux multisérié car au cours du séchage cette zone est soumise aux contraintes internes de séchage en tension au début du séchage; les tissus de rayons ligneux ont d'autre part des potentiels de retrait différents des tissus voisins [3] qui contribuent au développement de contraintes de séchage du second ordre. À la lumière des résultats de propaga-

tion de fissure, il paraît vraisemblable de penser que, dès que la fissure est initiée dans les rayons ligneux sous l'effet des contraintes de séchage en tension, elle se propage dans le sens radial du bois. En revanche, il est impossible d'appréhender grâce au même essai mécanique les mécanismes d'apparition du collapse localisé compte tenu du faciès de rupture particulier mis en évidence (vaguelettes).

3.5.2. Collapse localisé

C'est effectivement le faciès de rupture en vaguelette qui est remarquable ici, avec le fait que ce faciès se développe en plein milieu d'un rayon ligneux multisérié; cette dernière particularité est commune aux fentes de surface (5a) et puisqu'elle n'est pas cohérente avec la plus grande fragilité de l'interface entre les rayons ligneux et les autres cellules (3b), il faut l'expliquer par un gradient de contraintes, qui tend à fissurer le rayon ligneux entre le centre et les rives de celui-ci.

Le faciès en vaguelette dénote un effondrement brutal de deux rangées de cellules au cœur du rayon ligneux : tant que la lamelle mitoyenne résiste aux contraintes qui tendent à la séparer (contraintes de séchage ET tension capillaire) l'assemblage (lamelle mitoyenne -joint- lamelle mitoyenne) de la figure 23 n'est pas susceptible de fléchir; dès que la séparation est effectuée, la paroi de chacune des deux cellules fléchit intensivement, d'autant plus que la compression engendrée par la tension capillaire (principe de Terzaghi) dans ces parois augmente leur flexibilité; il est légitime de considérer que la tension capillaire nécessaire à cette flexion est bien inférieure à la tension capillaire actuelle et ceci explique le caractère très instable de ce collapse (claquage ou snap through).

Il est clair que la tension capillaire n'est pas seule responsable de ce collapse localisé mais son rôle est tout à fait original en ce sens que le principe de Terzaghi est ici

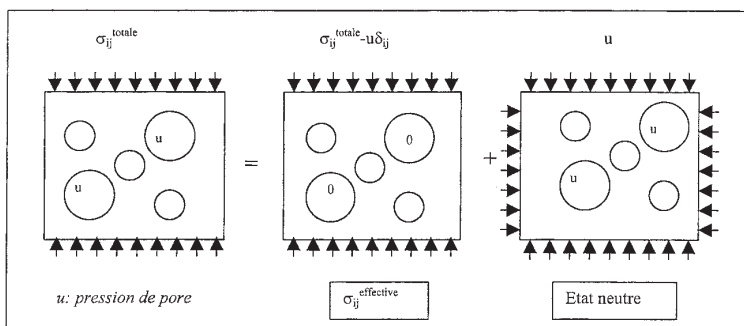


Figure 22. Principe de Terzaghi.

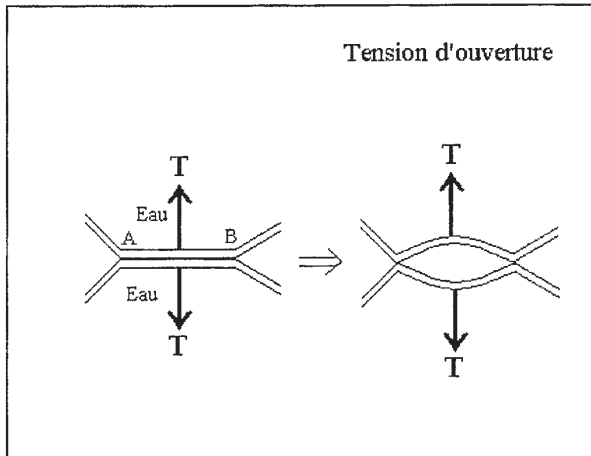


Figure 23. Modèle de rupture par collapse localisé.

mis en échec : le tension capillaire participe à la séparation de la lamelle mitoyenne donc à la rupture du squelette solide du matériau poreux qui est le bois.

3.5.3 Collapse généralisé

Le principe de Terzaghi (4d) permet de comprendre pourquoi, lorsque les contraintes de séchage sont supposées être faibles (Guilmain 1997) par rapport aux tensions capillaires, la rupture par collapse est le risque majeur. Dans ce cas, en effet, la tension capillaire est équivalente à une répartition hydrostatique externe d'efforts de compression, selon

$$\sigma_{ij}^{\text{effective}} \# - T_{\text{Capillaire}} \delta_{ij} \quad (9)$$

Comment évaluer la tension capillaire pouvant s'exercer lors du séchage du chêne ? La voie expérimentale directe n'étant pas assez développée (Demanet 1998) pour le bois, la porosimétrie au mercure a été utilisée, sur des rayons ligneux uniquement : la taille minimale des rayons de pore est de $0,010 \mu\text{m}$ ce qui correspond à une tension capillaire de $14,2 \text{ MPa}$ à 20°C et $13,0 \text{ MPa}$ à 60°C .

Le collapse se produit dans la direction de plus faible résistance mécanique sous ce chargement de compression hydrostatique : c'est bien dans la direction tangentielle que l'on observe le collapse généralisé du Chêne. En utilisant le modèle de résistance dans le sens tangentiel appliquée à un tissu uniquement constitué de rayon ligneux (en moyenne $d_b = 800 \text{ kg/m}^3$) et en comparant cette résistance à la tension capillaire maximum suscep-

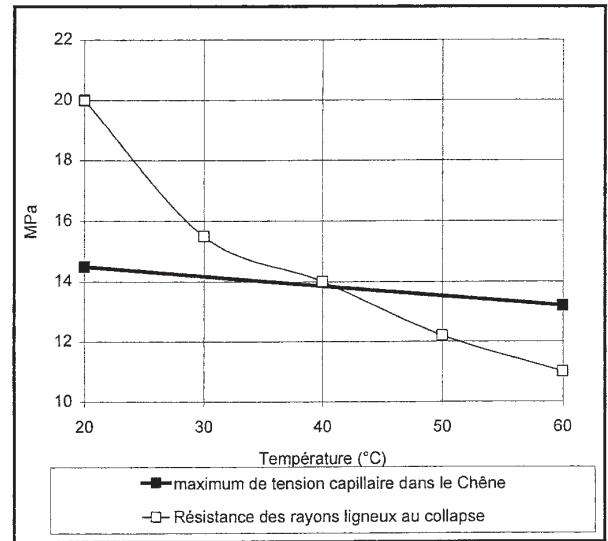


Figure 24. Risques de collapse généralisé dans le Chêne entre 20°C et 60°C .

tible d'être exercée entre 20°C et 60°C , nous montrons que le risque de collapse dans le Chêne est évité jusqu'à 40°C environ et qu'au-delà, le risque est prépondérant car les rayons ligneux ne résistent pas aux contraintes de tension capillaire (figure 24).

Le risque de collapse généralisé dans le Chêne est donc amplifié par la température.

4. CONCLUSION

Cette étude contribue à apporter des éléments de réflexion sur le collapse du Chêne et ainsi que des éléments quantitatifs :

1. Compte tenu du rôle mécanique de l'eau capillaire, il est très probable que le collapse généralisé soit la conséquence d'une perte de résistance en compression du matériau à 60°C . L'écrasement tangentiel de la structure mis en évidence par l'analyse microscopique correspond effectivement à la direction de plus faible résistance mécanique en compression. Cette perte de résistance en compression macroscopique est la conséquence de l'effet de la température sur les propriétés de la paroi cellulaire. On aura noté la bonne cohérence entre les données de la porosimétrie au mercure, des essais mécaniques et des essais de séchage en vraie grandeur.

2. Il semble que le collapse localisé soit la conséquence d'une instabilité mécanique à l'échelle microscopique

lors de laquelle le rôle de la tension capillaire est prépondérant. Pour ce type de rupture du joint en tension, la température n'a pas d'influence statistiquement significative.

Pour limiter le collapse du Chêne même à forte température (au-delà de 40 °C), et suivant une recette proposée par Hart (1984), nous avons préconisé d'effectuer un pré-séchage du matériau sous vide en vapeur d'eau surchauffée en effectuant des oscillations régulières d'une durée de 24 heures de l'humidité relative, entre $h=0.98$ et $h=0.90$, pour sécher ultérieurement des épaisseurs de 27 mm à partir de l'état vert, jusqu'à un taux d'humidité proche de 30%. Ces résultats ont été validés à l'échelle industrielle [11] et interprétés [5].

RÉFÉRENCES

- [1] Bariska M., Collapse phenomena in Eucalypts, Wood Sci Tech. 26 (1992) 165-179.
- [2] Beauchêne J., Thibaut B., Influence of temperature on green mechanical properties of wood across the grain in relation to heating before veneer cutting, in: International COST 508 "Wood Mechanics" Conference, Stuttgart, Germany, May 14-16 (1996).
- [3] Botosso P.C., Une méthode de mesure du retrait microscopique du bois : application à la prédiction du retrait tangentiel d'éprouvettes de bois massif de Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.), Thèse de l'Université Henry Poincaré - Nancy I (1997).
- [4] Demanet A., Caractérisation du comportement mécanique du chêne séché sous vide en vapeur d'eau surchauffée, DEA Sciences du Bois, Université Bordeaux I (1994).
- [5] Demanet A., Interactions mécaniques eau/bois et application à l'étude du collapse du Chêne, Thèse No. 1876, Université Bordeaux I (1998).
- [6] Demanet A., Morlier P., Joyet P., Drying of oak under vacuum with superheated steam Part II: Processes of damage during oak drying, in: Vacuum Drying of Wood '95, Zvolen, Slovak Republic, October 8-12 (1995).
- [7] François P., Plasticité du bois en compression multiaxiale. Application à l'absorption d'énergie mécanique, Thèse No. 813, Université Bordeaux I (1992).
- [8] Gibson L.J., Ashby M.F., Cellular Solids: Structure and Properties, Pergamon Press, 278-315 (1988).
- [9] Guilmain C., Jomaa W., Joyet P., Drying of oak under vacuum with superheated steam Part I: Heat and mass transfer modelling, in: Vacuum Drying of Wood '95, Zvolen, Slovak Republic, October 8-12 (1995).
- [10] Hart C.A., Relative humidity, EMC and collapse shrinkage in wood, For. Prod. Jour. 34 (1984) 45-54.
- [11] Joyet P., Meunier T., Drying green oak under vacuum with superheated steam without discoloration and drawback: industrial results, in: 5th International UFRO Wood Drying Conference: Quality wood drying through process modelling and novel technologies, (Quebec, Canada), August 13-17, 1996.
- [12] Larsen H.J., Gustafsson P.J., The fracture energy of wood in tension perpendicular to the grain, Results from a joint testing project, in: International Council for Building Research Studies and Documentation, 23th meeting, Lisbonne, Portugal (1990).
- [13] Mahé F., Résistance à la fissuration et contraintes de croissance, Application aux fentes d'abattage du peuplier I214, Thèse No. 1307, Université Bordeaux I (1995).
- [14] Pécheux E., Identification de la variable radiale des proportions intracernes d'éléments anatomiques chez le chêne (*Quercus Robur* L, *Quercus Petraea* Liebl) à partir d'une exploitation réaliste des profils microdensitométriques, DEA Sciences du Bois, Université de Nancy I (1993).
- [15] Schiffman R.L., The stress components of a porous medium, J. Geophys. Res. 75 (1970) 4035-4038.
- [16] Siau J.F., Wood: influence of moisture on physical properties, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University Ed., 1995, pp. 75-85.
- [17] Valentin G., Adjanohoun G., Applicability of classical isotropic fracture mechanics specimens to wood crack propagation studies, Mater. Struct. 25 (1992) 3-13.