

N° d'ordre : 2844

# THÈSE

Présentée à

**L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I**

**ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES  
ET DE L'INGÉNIEUR**

Par

**Ahmad ASSOUD**

INGÉNIEUR EN ÉCOLOGIE FORESTIÈRE

PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

Spécialité : **SCIENCES DU BOIS**

---

**MODÉLISATION DU SÉCHAGE SOUS VIDE DISCONTINU DU BOIS DE CHÊNE :  
INTÉGRATION D'UN CRITÈRE DE QUALITÉ MÉCANIQUE**

---

*Soutenu le 13 juillet 2004*

Après avis de :

MM. A. ZOULALIAN, Professeur, Université H. Poincaré, Nancy ..... Rapporteurs  
A. RAHME, Professeur, Université d'Alep, Syrie .....

Devant la commission d'examen formée de :

MM. R. MARCHAL, Professeur, ENSAM, Cluny..... Président  
B. DE JESO, Professeur, Université Bordeaux I ..... Examineurs  
D. GUITARD, Professeur, Université Bordeaux I .....  
W. JOMAA, Maître de Conférence, Université Bordeaux I, .....  
A. RAHME, Professeur, Université d'Alep, Syrie, .....  
A. ZOULALIAN, Professeur, Université H. Poincaré, Nancy, .....



# TABLES DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>I LE BOIS ET SES PROPRIETES HYGROSCOPIQUES ET PHYSIQUES .....</b>	<b>7</b>
<b>I.1 Le matériau bois .....</b>	<b>7</b>
I.1.1 Coupe transversale .....	8
I.1.2 Plan ligneux.....	9
<b>I.2 L'eau dans le bois .....</b>	<b>14</b>
I.2.1 Types d'eau .....	14
I.2.2 Taux d'humidité .....	15
I.2.3 Propriétés hygroskopiques.....	17
<b>I.3 Propriétés physiques .....</b>	<b>19</b>
I.3.1 Rétractibilité.....	19
I.3.2 Porosité.....	21
I.3.3 Masse volumique.....	21
I.3.4 Perméabilité.....	22
I.3.5 Propriétés thermiques .....	23
<b>I.4 Conclusion.....</b>	<b>25</b>
<b>II MODELISATION DU SECHAGE A L'ECHELLE DU SECHOIR.....</b>	<b>29</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>II.2 Description du fonctionnement d'un séchoir sous vide discontinu .....</b>	<b>31</b>
<b>II.3 Développement de la modélisation.....</b>	<b>32</b>
<b>II.4 Description de la modélisation à l'échelle du séchoir .....</b>	<b>33</b>
II.4.1 Hypothèses fondamentales .....	33
II.4.2 La phase convective .....	34
II.4.3 La phase de vide.....	35
II.4.4 Conditions aux limites.....	37
II.4.5 Description des échanges pendant le régime passif.....	39
II.4.6 Résolution numérique.....	45
<b>II.5 Commentaire .....</b>	<b>50</b>

<b>III</b>	<b>LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BOIS LORS DU SECHAGE.....</b>	<b>55</b>
<b>III.1</b>	<b>Qualité des produits après transformation (débit, séchage).....</b>	<b>55</b>
III.1.1	Défauts liés au mode de débit.....	55
III.1.2	Défauts liés au séchage.....	58
III.1.3	Qualification du séchage.....	62
<b>III.2</b>	<b>Modélisation des contraintes internes dans le matériau bois .....</b>	<b>64</b>
III.2.1	Éléments de littérature.....	65
III.2.2	Choix du modèle .....	69
III.2.3	Modèle simplifié de la contrainte.....	71
III.2.4	Mesure le Module d'Young $E_T$ .....	73
<b>III.3</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>76</b>
<b>IV</b>	<b>OPTIMISATION DES CONDITIONS OPERATOIRES .....</b>	<b>81</b>
<b>IV.1</b>	<b>Définitions des conditions optimales.....</b>	<b>81</b>
IV.1.1	Première approche :.....	81
IV.1.2	Sensibilité à la pression et à la température.....	85
IV.1.3	Recherche des conditions optimales.....	89
<b>IV.2</b>	<b>Etude expérimentale du séchage sous vide discontinu .....</b>	<b>91</b>
IV.2.1	Description du séchoir «MASPELL».....	91
IV.2.2	Mesures et acquisitions .....	93
IV.2.3	Conditions des essais.....	96
<b>IV.3</b>	<b>Résultats expérimentaux.....</b>	<b>97</b>
IV.3.1	Cinétiques de séchage .....	97
IV.3.2	Contraintes maximales .....	100
IV.3.3	Comportement en température .....	101
IV.3.4	Homogénéité .....	102
IV.3.5	Défauts observés .....	105
<b>IV.4</b>	<b>Validation de la modélisation .....</b>	<b>113</b>
IV.4.1	Comparaison modèle / expérience.....	113
IV.4.2	Conditions numériques.....	116
<b>IV.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>117</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>121</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>127</b>
	<b>NOMENCLATURE DES PRINCIPAUX SYMBOLES.....</b>	<b>133</b>

**INTRODUCTION  
GENERALE**



## Introduction générale

La France possède la plus grande réserve de chêne Européen. Deux espèces sont particulièrement répandues et sont pratiquement les seules utilisées : le chêne pédonculé et le chêne rouvre. Les marchés Nationaux et Internationaux sont actuellement demandeurs de séchage du bois rapide, non coûteux, homogène et sans défauts. L'apparition des fentes pendant le séchage, auxquelles le chêne à l'état vert est sensible, déprécie la qualité du bois et occasionne par conséquent un déclassement du lot des sciages.

Afin de réaliser un séchage de qualité dans des conditions économiques viables, il faut choisir un procédé approprié à l'essence considérée. Des travaux antérieurs ont montré que le séchage sous vide est économiquement intéressant pour le bois de chêne. Il permet par ailleurs, d'effectuer un séchage à la fois rapide et de bonne qualité finale surtout pour les essences thermosensibles. Le problème réside dans la définition correcte des conditions de séchage afin d'arriver à allier rapidité de l'opération et bonne qualité finale du produit.

Le travail présenté ici est effectué au Laboratoire TREFLE (Transferts, Ecoulements, Fluides, Energétique), il s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité du bois de chêne à la sortie du séchoir au travers de la définition de conditions de séchage optimales tant du point de vue qualité mécanique (représentée par l'apparition des fissures dans les sciages) que la durée totale de séchage.

Le travail est présenté dans quatre chapitres :

- ◆ Un premier chapitre aborde quelques aspects généraux sur le matériau bois et en particulier sur les chênes. Dans la première partie, on montre que le bois est un matériau hétérogène, anisotrope et hygroscopique possédant une variabilité inter-essence, son architecture anatomique joue un rôle sur le transfert de masse. Ce transfert est favorisé dans la direction longitudinale (direction des vaisseaux et des fibres) et dans la direction radiale (direction des rayons ligneux). Mais lors de la duraminisation (passage du bois d'aubier à bois de cœur) les vides cellulaires ainsi que les ponctuations sont affectées par des substances organiques qui

bloquent la circulation d'eau et entraînent des difficultés lors du séchage. Par ailleurs, l'eau dans le bois se trouve principalement sous trois formes : l'eau libre qui est retenue dans les lumens, l'eau liée est retenue dans les parois cellulaires et la vapeur d'eau, mélangée à l'air, remplit les espaces non occupés par l'eau liquide. Pendant le séchage, à cause de l'évaporation de l'eau liée, un retrait de fibres se produit provoquant un champ de contraintes dans le matériau qui peut mener à l'apparition de fentes.

Dans la deuxième partie, nous abordons quelques propriétés hygroscopiques, physiques et thermiques du bois qui sont utiles à la compréhension du comportement du matériau au cours du séchage. Le transfert d'eau est lié à la structure poreuse et à la masse volumique du matériau. La loi de Darcy caractérise la convection d'un fluide dans le milieu, elle traduit la notion de perméabilité qui est différente selon les directions naturelles de bois. La loi de Fourier caractérise la diffusion de chaleur dans un milieu, elle fait apparaître la conductivité thermique.

- ◆ Le deuxième chapitre décrit la modélisation du séchage à l'échelle du séchoir sous vide discontinu. Un cycle de séchage sous vide discontinu contient deux phases : une phase convective pendant laquelle le séchage a lieu à pression atmosphérique, cette phase a pour but principal d'amener de la chaleur au matériau, et une phase de vide qui présente une succession de deux régimes au cours desquels une basse pression est maintenue pendant un temps déterminé. Ces régimes sont : un régime actif où la pompe à vide fonctionne, ce qui permet d'abaisser la pression et un régime passif où la pompe est à l'arrêt, ce qui engendre une augmentation de la pression (liée à la production de vapeur venant des bois) jusqu'à la consigne considérée. Pendant ce régime une formulation du flux masse est proposée permettant d'explicitier le transfert de la vapeur d'eau sortant du bois vers la paroi de l'enceinte.
- ◆ Le troisième chapitre présente la notion de qualité des produits séchés après transformation. Le critère choisi pour qualifier le séchage est le risque d'apparition des fentes dans le bois. Au cours du séchage, le matériau est soumis à un gradient d'humidité qui entraîne des variations dimensionnelles importantes (retrait), ce retrait anisotrope va générer des contraintes internes qui peuvent provoquer des fentes superficielles ou internes si ces contraintes dépassent la

résistance mécanique du matériau bois. Pour cela, un modèle rhéologique simple intégré au modèle de séchage permet d'évaluer le niveau des contraintes au sein du matériau, si ces contraintes sont élevées, au regard d'un niveau de contraintes qualifié d'admissible, cela signifie que les risques de présence de fissures sont importants.

- ◆ Le dernier chapitre aborde dans un premier temps une analyse de sensibilité du modèle mis en place aux différents paramètres du procédé afin de les hiérarchiser. De cette analyse on retient que les paramètres prépondérants sont la température de séchage, la pression de l'enceinte et le niveau de remplissage du séchoir. L'optimisation de ces paramètres permet de diminuer le niveau de contrainte. Dans une deuxième partie, l'outil de modélisation est utilisé pour proposer des conditions de séchage optimales. Les conditions ainsi proposées sont alors vérifiées au travers d'expériences qui ont révélé une bonne qualité mécanique (peu de déformation, très peu de fentes) des lots de bois avec une bonne homogénéité de la teneur en eau finale à l'échelle des planches et de l'amas. Ces expériences servent par ailleurs de validation à la modélisation proposée.

# CHAPITRE I

## LE BOIS ET SES PROPRIÉTÉS HYGROSCOPIQUES ET PHYSIQUES

Afin de commencer une étude complète sur le séchage du bois de chêne, il est souhaitable de connaître ce matériau, ses caractéristiques et ses particularités. Nous allons donc présenter quelques aspects généraux sur la structure de bois et en particulier sur le chêne. Puis, nous allons décrire les types d'eau et les interactions entre l'eau et le bois. Enfin, nous allons aborder quelques propriétés physiques liées au bois et utiles pour comprendre son comportement.

<b>I</b>	<b>LE BOIS ET SES PROPRIETES HYGROSCOPIQUES ET PHYSIQUES.....</b>	<b>7</b>
<b>I.1</b>	<b>Le matériau bois .....</b>	<b>7</b>
I.1.1	Coupe transversale.....	8
I.1.2	Plan ligneux .....	9
<b>I.2</b>	<b>L'eau dans le bois .....</b>	<b>14</b>
I.2.1	Types d'eau .....	14
I.2.2	Taux d'humidité .....	15
I.2.3	Propriétés hygroscoPIques .....	17
<b>I.3</b>	<b>Propriétés physiques .....</b>	<b>19</b>
I.3.1	Rétractibilité .....	19
I.3.2	Porosité .....	21
I.3.3	Masse volumique.....	21
I.3.4	Perméabilité.....	22
I.3.5	Propriétés thermiques .....	23
<b>I.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>25</b>



# I Le bois et ses propriétés hygroscopiques et physiques

## I.1 Le matériau bois

Le bois est un ensemble de tissus végétaux, provenant d'une matière vivante : l'arbre, formant la partie principale du tronc, des branches et des racines.

Il est hétérogène parce que ces tissus sont composés d'éléments de nature et de forme variées. Cette hétérogénéité se manifeste principalement dans la direction radiale, elle est due à l'alternance des cernes de croissance : bois initial (bois de printemps) - bois final (bois d'été).

Le bois est un matériau anisotrope : c'est à dire qu'il n'a pas les mêmes caractéristiques dans toutes ses directions (*figure I.1*) :

- La direction axiale ou longitudinale correspond à la direction des fibres,
- La direction tangentielle est la direction tangente aux cernes d'accroissement annuels,
- La direction radiale est celle des rayons ligneux, perpendiculaire aux cernes.

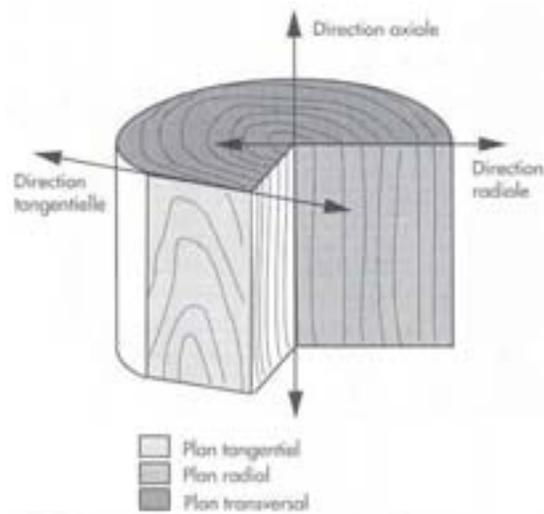


Figure I. 1 : Différentes directions du bois (ALEON et al. 1990).

Il est aussi hygroscopique : cela signifie qu'il est susceptible de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction des conditions de l'air dans lequel il est placé. La connaissance des propriétés d'équilibre est nécessaire avant toute étude du séchage.

### ***1.1.1 Coupe transversale***

Sur une coupe transversale d'un tronc du chêne, on remarque de l'extérieur vers l'intérieur (*figure I.2*) :



Figure I. 2 : Coupe transversale d'un tronc du chêne (JOLY, MORE-CHEVALIER, 1980).

- L'écorce : couche protectrice pouvant avoir une épaisseur d'un millimètre (bouleau) à plus de 30 cm (séquoia),
- Liber : couche spongieuse dans laquelle la sève élaborée descend des branches vers les racines.
- Cambium : couche très fine (1 cellule), partie vivante de l'arbre qui fabrique du bois côté interne et le liber côté externe.
- Aubier : c'est la partie fonctionnelle de l'arbre, la sève y circule des racines vers les branches. Notons que la majeure partie de la sève passe dans la partie externe de l'aubier, c'est-à-dire le cerne de l'année en cours. C'est dans l'aubier que se trouvent les réserves.
- Cœur ou duramen : c'est la partie où s'accumulent les déchets et qui assure la rigidité de l'arbre.

Il y a un passage de duraminisation (accumulation de substances organique) de l'aubier à un *bois parfait* qui ne joue plus de rôle de conduction mais qui conserve son rôle d'ossature de l'arbre.

On appelle aussi la partie centrale du tronc (5 à 20 cernes) le *bois juvénile* qui possède une densité plus faible que le reste qui s'appelle le *bois adulte*.

On appelle *bois de réaction*, le bois produit du côté large des sections transversales excentrées. Dans le cas des feuillus, ce bois, dit « *bois de tension* », se développe dans la partie supérieure des troncs penchés ou des branches. Ce bois a des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques très différentes du bois normal (notamment densité plus élevée).

### 1.1.2 Plan ligneux

Nous avons dit que le bois est constitué des tissus cellulaires. Les cellules qui composent les tissus sont disposées suivant des arrangements variables pour constituer le *plan ligneux*. La norme NFB 50-002 définit le plan ligneux comme l'ensemble des caractères de structure du bois, tenant à la nature, à la forme et au groupement de cellules constitutives. Ces caractères sont constants pour une essence donnée (JOLY, MORE-CHEVALIER, 1980).

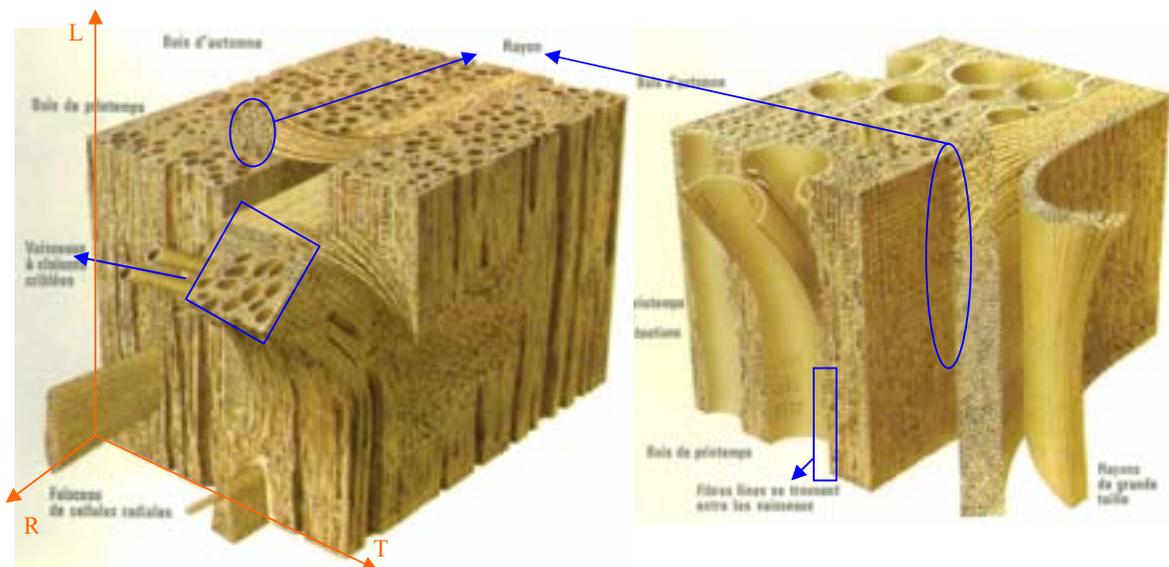


Figure I. 3 : Plan ligneux d'un feuillus (PARMENTIER, 1977).

Pour aborder les détails d'une essence, il faut étudier les caractéristiques de son plan ligneux. Sur le plan ligneux d'un feuillus (Angiospermes) (*figure I.3*) on distingue trois grands types de tissus (SIAU, 1984).

- Les tissus conducteurs formés de vaisseaux,
- Les tissus de soutien constitués par les fibres,
- Les tissus de réserves constitués par les cellules de parenchyme (rayons ligneux).

### I.1.2.1 Vaisseaux

Ce sont des files des cellules, communiquant entre elles bout à bout, qui assurent l'ascension de la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles. Une file peut être de quelques décimètres à plusieurs mètres de long. Ses parois sont lignifiées et couvertes de ponctuations de type aréolé mais sans torus. À chaque extrémité d'un élément de vaisseau se trouve une perforation permettant aux éléments de communiquer entre eux (figure I.4 : A).

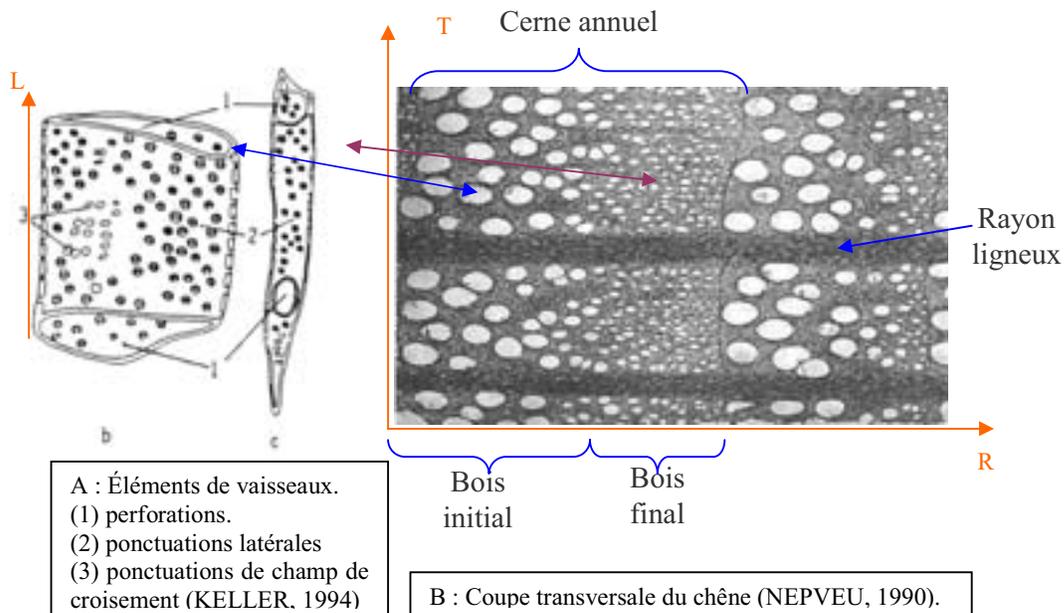


Figure I. 4 : A : éléments de vaisseaux, B : coupe transversale du chêne.

Les feuillus qui poussent rapidement (cernes larges) donnent une proportion plus importante de bois final où la circulation des fluides est plus difficile. Leur séchage est donc plus délicat que pour des feuillus qui poussent plus lentement (cernes fins) (ALEON et al., 1990).

Le chêne possède une zone initiale poreuse particulièrement riche en vaisseau de gros diamètre (plus de 200  $\mu\text{m}$ ) par rapport au bois final (50  $\mu\text{m}$ ) (figure I.4 : B).

Chez certaines espèces, le chêne en particulier, des tyllés se développent à l'intérieur des vaisseaux par suite de blessures, attaques des champignons ou naturellement lors du passage du bois de sa forme fonctionnelle (aubier) à sa forme inerte (bois de cœur) (*figure I.5*). La présence de ces tyllés peut entraîner des difficultés lors du séchage, de l'imprégnation, du collage et du traitement des surfaces (KELLER, 1994).

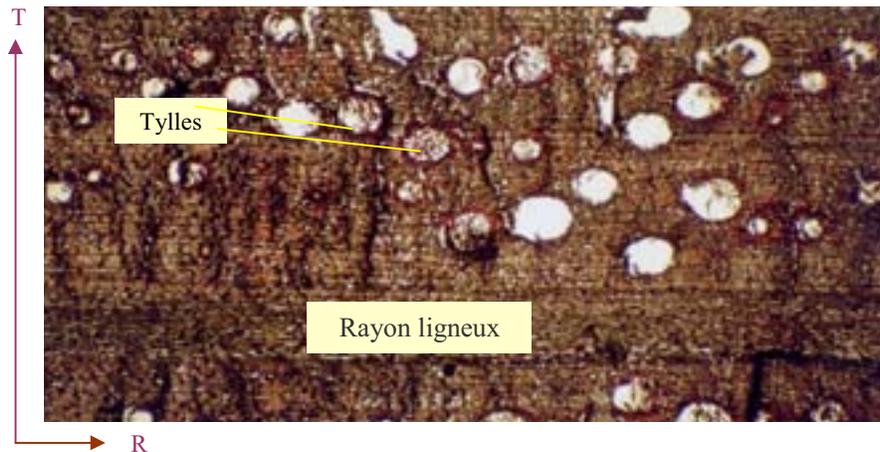


Figure I. 5 : Une section transverse dans l'aubier du chêne (*Quercus suber*).

### I.1.2.2 Fibres

Ce sont des éléments allongés qui portent peu de ponctuations simples. Les fibres qui constituent 50% à 60% de la masse du bois, sont mortes et vides, jouent essentiellement un rôle d'éléments de bonnes propriétés mécaniques et ne sont pas organisées pour jouer un rôle important dans les échanges de substances entre les cellules du bois. La densité du bois dépend de la proportion relative des fibres par rapport aux autres éléments cellulaires (KELLER, 1994).

### I.1.2.3 Rayons ligneux

Ils sont constitués de cellules de parenchyme, vivantes tant que le bois est fonctionnel, s'organisant en bandes d'orientation radiale. Leur disposition est constante et assez régulière pour une espèce donnée mais beaucoup plus variée que dans le cas des résineux; ce sont des critères d'identification très utiles.

Le chêne possède deux types des rayons ligneux *unisériés* (une seule rangée des cellules de parenchymes) et *multisériés* (plusieurs rangées des cellules en largeur). Ces derniers sont visibles à l'œil nu en section transversale (jusqu'à une cinquantaine de cellules en largeur) (*figure I.6*).

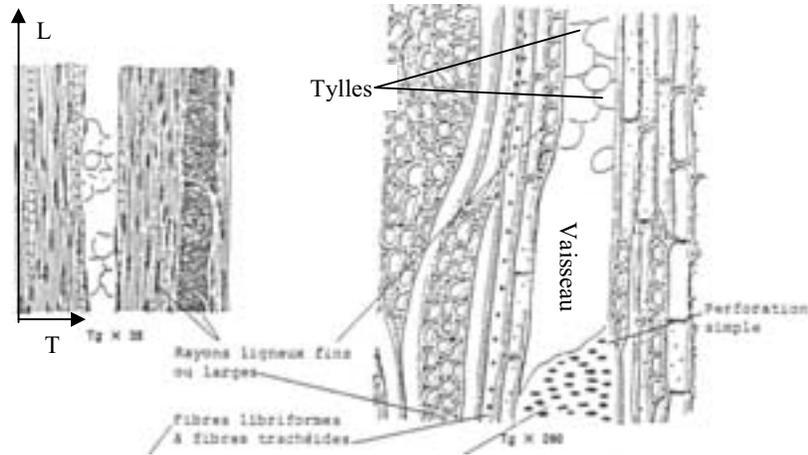


Figure I. 6 : Une section tangentielle en chêne pédonculé (KELLER, 1983).

DEMANET (1998) a montré que le risque de collapse du chêne se produit dans les rayons ligneux parce que ces tissus cellulaires retiennent la majeure partie de l'eau microcapillaire à l'état métastable dans leur structure poreuse.

#### I.1.2.4 Ponctuations

La communication entre les différents éléments (vaisseaux, fibres, rayons,...) est assurée grâce à des ouvertures de faibles dimensions appelées ponctuations (figure I.7).

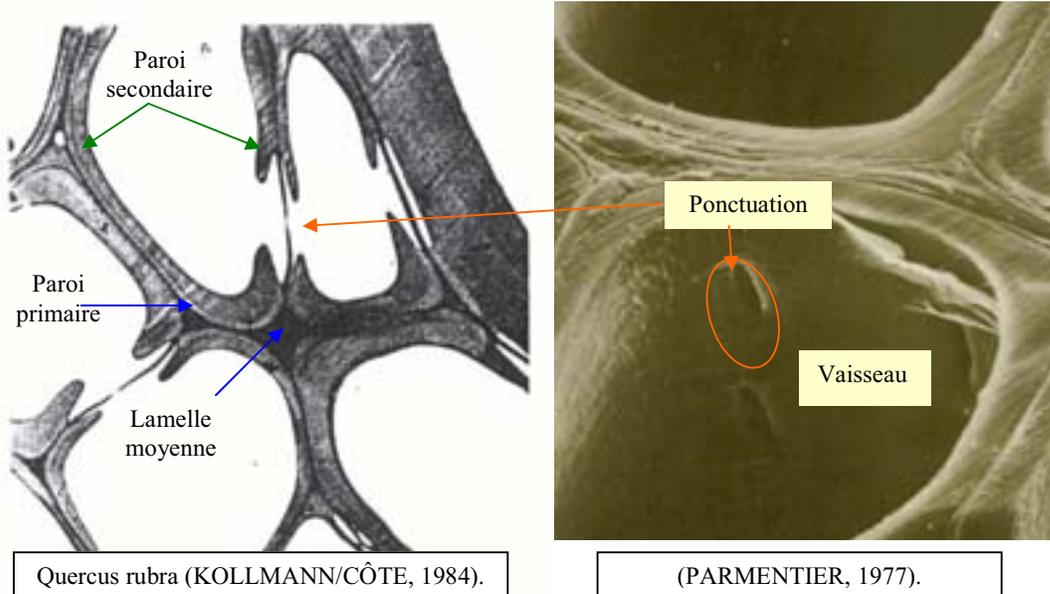


Figure I. 7 : La communication entre deux cellules.

Trois types de ponctuations assurent les échanges intercellulaires (*figure I.8*) :

- ◆ Des ponctuations simples existent entre les cellules de parenchyme, et entre les fibres.
- ◆ Des ponctuations aréolées sans torus existent entre les vaisseaux.
- ◆ Des ponctuations semi-aréolées qui apparaissent entre des cellules de fonctions différentes ; elles sont du type simple du côté du parenchyme et du type aréolé du côté du vaisseau.

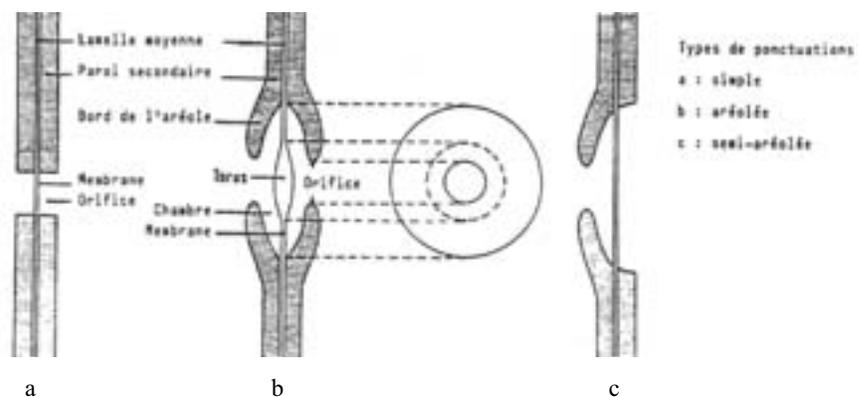


Figure I. 8 : Différents types de ponctuations (KELLER, 1994).

Une des difficultés rencontrée lors de séchage des résineux est que le torus peut se plaquer, par l'élasticité des microfibrilles qui le supportent (lamelle moyenne) contre l'un des bords de la ponctuation (paroi secondaire) et obturer le passage des fluides (PERRÉ, 1987). Ce phénomène (aspiration des ponctuations aréolées) affecte beaucoup plus le bois initial que le bois final puisque les ponctuations y sont plus épaisses et leur membrane plus rigide.

De l'observation du plan ligneux du chêne, on peut conclure que les transferts de masse sont favorisés dans la direction longitudinale principalement grâce au lumen des vaisseaux et des fibres qui sont orientés axialement ainsi que dans la direction radiale grâce aux rayons ligneux. De plus, la communication entre les éléments (vaisseaux, fibres, rayons ligneux,...) est assurée par les ponctuations qui jouent un rôle important dans les échanges d'air et d'eau au cours du séchage.

## I.2 L'eau dans le bois

L'eau, élément indispensable à la vie, circule dans les végétaux vivants pour rendre possible leur fonctionnement physiologique, leur métabolisme, leur croissance et leur reproduction.

Du point de vue du séchage, l'eau est le liquide qui circule à l'intérieur du bois sous plusieurs formes. Le processus de séchage consiste à diminuer la quantité de liquide jusqu'à une valeur compatible avec l'utilisation du bois. L'objet de ce paragraphe est, dans un premier temps, de décrire les divers états de l'eau présente dans le bois, et, dans un deuxième temps, de présenter les propriétés hygroscopiques et physiques du matériau.

### I.2.1 Types d'eau

Dans le bois, l'eau se présente sous trois formes : (figure I.9)

- L'eau dite « libre », est retenue dans les lumens des fibres ou trachéides et éventuellement dans les vaisseaux des feuillus. Elle est retenue dans le bois par le mécanisme de condensation capillaire. Ce phénomène est régi par l'interaction entre les molécules d'un liquide et d'une surface solide, à condition que cette dernière soit mouillable par le liquide.
- L'eau dite « liée » ou « hygroscopique » est retenue dans les parois cellulaires. Cette eau est adsorbée sur les fonctions hydroxyles des chaînes des polysaccharides et de la lignine.
- La vapeur d'eau qui est combinée avec l'air sec pour constituer l'air humide.

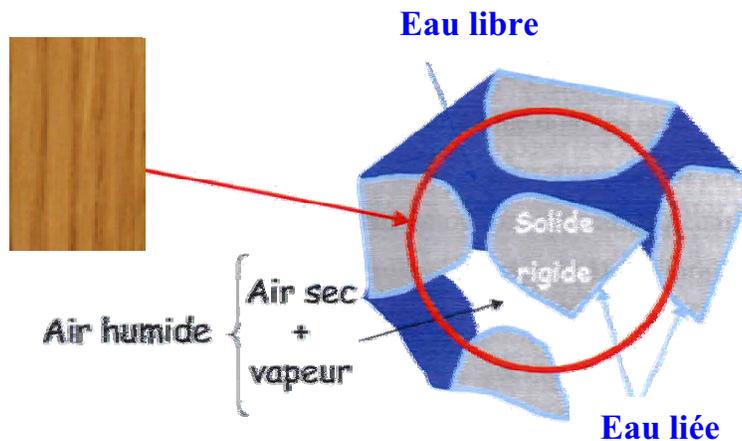


Figure I. 9 : Proportions relatives d'eau libre et liée dans un milieu capillaro-poreux hygroscopique (GOYENECHÉ, 2001).

Pour évaporer l'eau libre du bois, il suffit de fournir la chaleur latente d'évaporation ; pour évaporer l'eau liée, il faut fournir une énergie additionnelle, appelée «énergie de sorption » pour rompre ses liaisons avec la substance du bois (KAUMAN, 1983).

La figure (I.10) représente les modes de liaisons de l'eau sur les sites de sorption des parois :

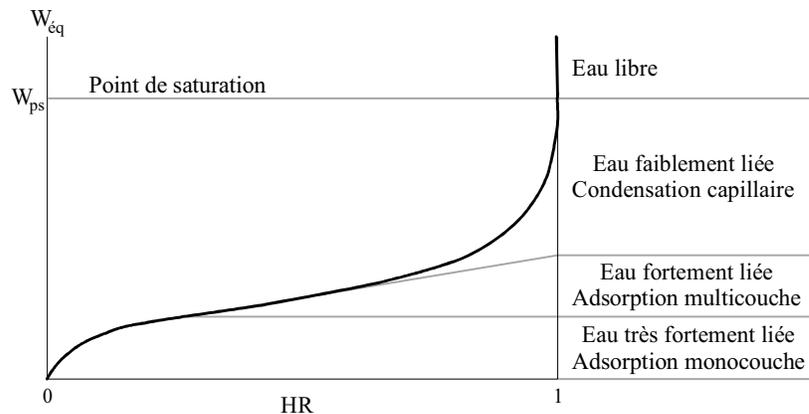


Figure I. 10 : modes de liaisons de l'eau (JOMAA et BRUNEAU, 1997).

La première zone, aux basses humidités relatives, correspond à la fixation de premières couches de molécules d'eau sur les sites de sorption des parois; l'énergie de liaison est importante et les molécules d'eau sont peu mobiles,

Pour les humidités relatives intermédiaires, les molécules d'eau viennent se fixer sur les premières couches déjà adsorbées; l'énergie de liaison diminue avec le rang de la couche,

Pour les fortes humidités relatives, voisines de 100%, les molécules adsorbées sur les différents sites vont interagir et former un film liquide continu sur la surface des pores (condensation capillaire); enfin, pour une humidité relative de 100%, la teneur en eau d'équilibre est celle du point de saturation des fibres.

### **1.2.2 Taux d'humidité**

La teneur en eau (taux d'humidité) d'un échantillon de bois est par définition, le rapport de la masse d'eau qu'il renferme à sa masse anhydre (totalement sec) s'il s'agit d'une base sèche (W) ou à sa masse humide si la base est humide (H) :

$$W = \frac{\text{masse d'eau titrable}}{\text{masse de produit sec}} \quad (\text{éq. I. 1})$$

$$H = \frac{\text{masse d'eau titrable}}{\text{masse du produit humide}} \quad (\text{éq. I. 2})$$

La teneur en eau présentée dans les équations précédentes est sans unité mais dans le langage courant cette teneur en eau est parfois exprimée en pourcentage. Dans notre travail, nous utiliserons la teneur en eau en base sèche exprimée dans l'équation (I.1). Par exemple si un morceau de bois de 12 kg à 20% de teneur en eau (base sèche) cela veut dire qu'il contient 10 kg de bois sec et 2 kg d'eau.

En général, le taux d'humidité du bois peut varier entre 40% et 200% ou même atteindre 800% pour des essences exceptionnelles telles le Balsa (*Ochroma boliviana*). Les feuillus européens ont une humidité à l'état vert d'environ 80% à 90% (ALEON et al., 1990).

Nous donnons ci-dessous des exemples de taux d'humidité de bois sur pied pour quelques essences (*tab. I.1*) (JOLY, MORE-CHEVALIER, 1980).

Résineux	Feuillus
Sapin 100 à 120 %	Peuplier 120 à 200%
Pin maritime 100 à 120%	Châtaignier 90 à 100%
Épicéa 120 à 150%	Chêne 80 à 90%
-----	Platane, Noyer 70%

Tableau I. 1 : Taux d'humidité de bois sur pied (JOLY, MORE-CHEVALIER, 1980).

La norme NFB51002 donne les valeurs des taux d'humidité correspondant aux qualifications couramment employées :

- Vert : humidité supérieure au point de saturation des fibres,
- Mi-sec : du point de saturation à 23%,
- Commercialement sec : de 22 à 18%,
- Sec à l'air : de 17 à 13%,
- Desséché : humidité inférieure à 13%,
- Anhydre : 0%.

### I.2.3 Propriétés hygroscopiques

Lors du séchage du bois, en un point donné d'un échantillon, l'eau qui part la première est l'eau libre ; il arrive un moment où à cet endroit il n'y a plus d'eau libre et il reste encore toute l'eau liée. Le bois atteint alors à cet endroit le «point de saturation des fibres» ( $W_{psf}$ ) qui correspond pour la quasi-totalité des essences à une humidité voisine de 0.3. Au-dessous de ce point, le bois se trouve dans le domaine hygroscopique, le séchage s'accompagne d'un retrait du bois.

Quant à l'équilibre hygroscopique du bois, il est défini comme l'humidité vers laquelle tend un échantillon de bois lorsqu'il est placé dans des conditions de température ( $T_{inf}$ ) et d'humidité relative de l'air (HR) définies. Cet équilibre est décrit par une relation macroscopique, reliant la teneur en eau d'équilibre ( $W_{eq}$ ) à l'humidité relative de l'air appelée isotherme de sorption (*figure I.11*) du type :

$$W_{eq} = f(HR, T_{inf}) \quad (\text{éq. I. 3})$$

L'équilibre ne dépend que des conditions atmosphériques locales où est placé le bois. En France est le plus souvent compris entre 12 et 16 % (KAUMAN, 1983).

On appelle :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un bois sec.
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

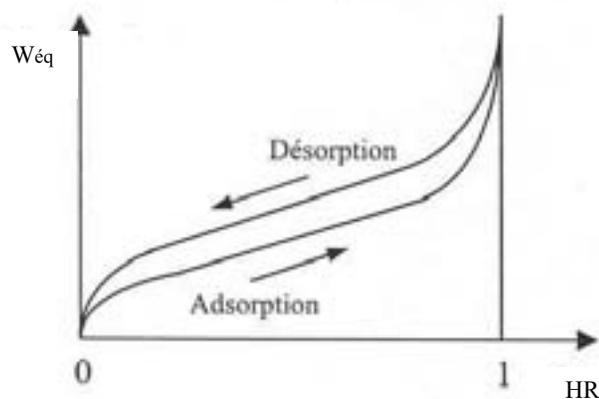


Figure I. 11 : Isotherme de sorption (JANNOT, 2003).

Sur la figure (I.11) les isothermes d'adsorption / désorption sont en général différentes car le séchage d'un produit entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles (JANNOT, 2003).

Nous avons déterminé expérimentalement l'isotherme de désorption pour un bois de chêne. Nous avons placé chaque échantillon (10 échantillons de dimension  $2 \times 1 \times 1$  cm) dans une solution saline saturée qui impose une humidité relative constante (voir LARTIGUE et PUIGGALI, 1987), l'ensemble étant maintenu à température constante ( $T=20$  °C). L'échantillon demeure dans cette atmosphère contrôlée jusqu'à la stabilisation de sa masse, signe que l'équilibre est atteint. Les résultats sont présentés sur la figure (I.12). Sur cette figure, nous avons reporté les points expérimentaux ainsi que la corrélation issue des travaux d'HERNANDEZ (1991) qui a été appliqué dans notre modélisation. Nous remarquons que cette corrélation est adaptée aux types de bois utilisés dans ce travail.

La corrélation est la suivante :

$$HR = \exp\left(a b^{100 \cdot W_{\text{éq}}} + c\right) \quad (\text{éq. I. 4})$$

$$a = 2.51 \cdot 10^{-4} T^2 - 0.1811 T + 35.719 \quad (\text{éq. I. 5})$$

$$b = -9.475 \cdot 10^{-4} T + 1.133 \quad (\text{éq. I. 6})$$

$$c = a \left( b^{(100 \cdot W_{\text{psf}})} \right) \quad (\text{éq. I. 7})$$

avec T : la température en K

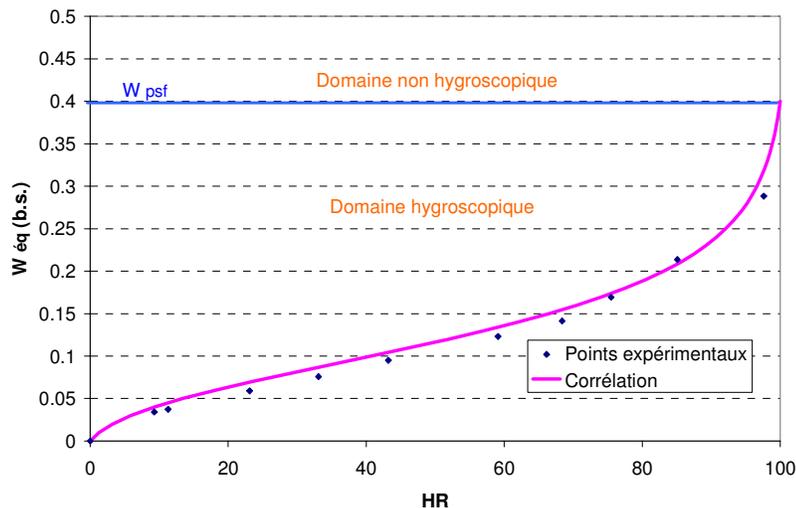


Figure I. 12 : Isotherme de désorption pour le chêne

## I.3 Propriétés physiques

### I.3.1 Rétractibilité

Nous avons déjà vu dans le paragraphe précédent que le retrait se manifeste en dessous du point de saturation des fibres lorsqu'on évacue l'eau des parois cellulaires. Ce retrait a une grande importance dans la qualité finale du produit car, généralement non uniforme au cours du séchage, il provoque un champ de contraintes dans le matériau qui peut mener à l'apparition de fentes externes ou internes et des changements de formes des sciages.

Les figures (I.13) expliquent le retrait du bois en dessous de  $W_{psf}$  lors des différentes étapes du séchage.

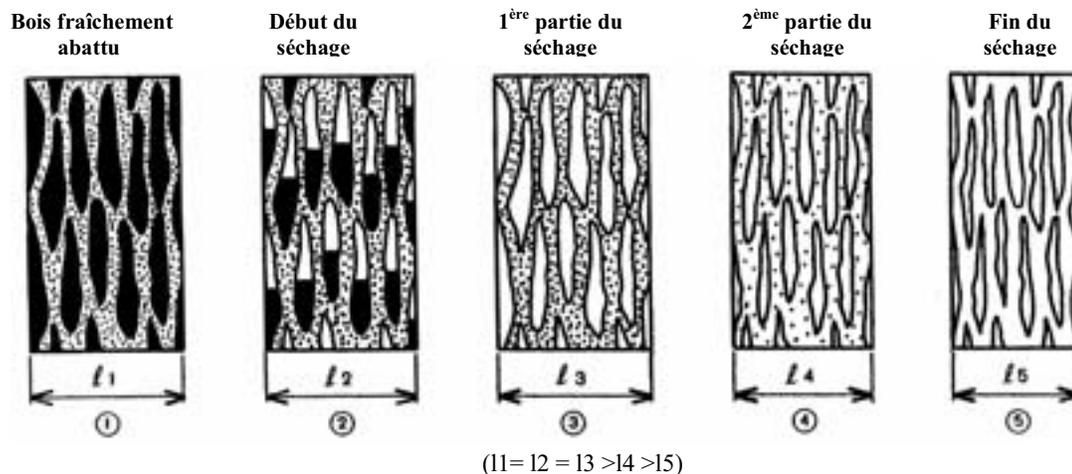


Figure I. 13 : L'état de l'eau lors de séchage du bois, (JOLY et MORE-CHEVALIER, 1980).

- ▶ La figure I.13 (1) représente l'état du bois après un abattage récent jusqu'à la fin du séchage : dans ce cas, l'eau libre remplit les vides cellulaires et les parois des cellules sont saturées d'eau,
- ▶ Le début du séchage commence à partir de la figure I.13 (2) : l'eau libre est partiellement évaporée, les parois des cellules sont toujours saturées,
- ▶ Sur la figure I.13 (3) : l'eau libre est entièrement éliminée mais les parois des cellules sont encore saturées, à ce moment le bois atteint le point de saturation des fibres,
- ▶ Dans la deuxième partie du séchage (figure I.13.4) : l'eau liée est en partie éliminée. A ce moment les parois cellulaires commencent à se rétrécir,
- ▶ En fin du séchage (figure I.13.5) : l'eau liée est complètement évacuée les cellules sont alors fortement rétrécies, le retrait est maximal.

La détermination du retrait volumique est importante pour les professionnels de séchage, cette grandeur est définie par la relation suivante :

$$R_V \% = \frac{V_s - V_0}{V_0} \quad (\text{éq. I. 8})$$

où,  $V_s$  : le volume saturé,  $V_0$  : le volume anhydre.

L'ordre de grandeur du retrait volumique est différent selon le matériau :  $R_V = 15 \%$  pour le bois et  $700 \%$  pour le gels. Pour le chêne le retrait volumique varie de  $15$  à  $20 \%$  (HERNANDEZ, 1991).

De même, pour chacune des trois directions (longitudinale, radiale, tangentielle), le retrait est défini comme :

$$R_D \% = \frac{D_s - D_0}{D_0} \quad (\text{éq. I. 9})$$

$D_s, D_0$  sont respectivement les dimensions dans la direction considérée à l'état saturé puis à l'état anhydre.

Le retrait dans la direction longitudinale est pratiquement négligeable devant celui des autres directions (*figure I.14*). Le retrait le plus fort est dans la direction tangentielle.

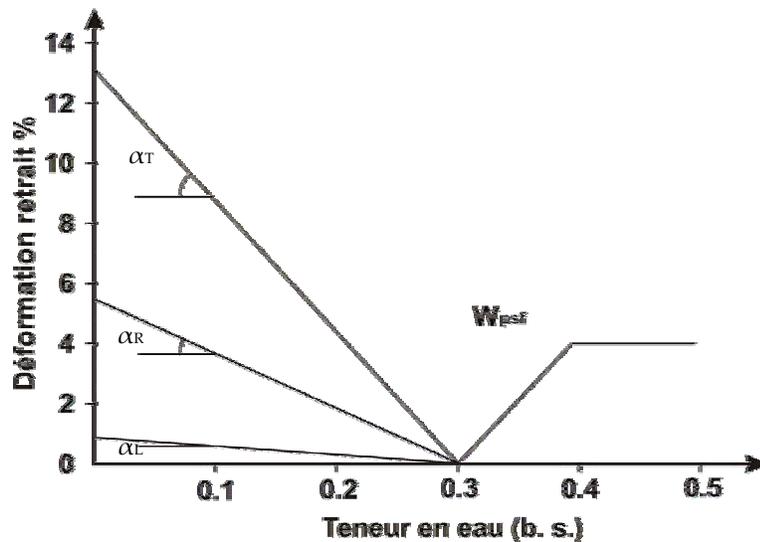


Figure I. 14 : Représentation schématique des coefficients des retraits (GUITARD, 1994).

### 1.3.2 Porosité

La porosité est définie par le ratio entre le volume de pores et le volume du matériau :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de pores}}{\text{volume total}} \quad (\text{éq. I. 10})$$

Les transferts d'eau sont directement liés à la porosité. Hernandez (1991) a mesuré la porosité moyenne du chêne qui a la valeur voisine de 0.5 (bois du cœur).

### 1.3.3 Masse volumique

On appelle masse spécifique ou masse volumique ou densité absolue d'un corps la masse de l'unité de volume de ce corps. Elle s'exprime en  $kg \cdot m^{-3}$ .

$$\rho = \frac{M_w}{V_w} \quad (\text{éq. I. 11})$$

où,  $M_w$  étant la masse à l'humidité  $W$  et  $V_w$  le volume à la même humidité. Ces deux paramètres variant avec l'humidité, on ne peut pas parler de masse volumique qu'en précisant l'ordre de grandeur de l'humidité.

On peut mesurer le volume par Volumétrie à mercure. Il permet en fait de mesurer le déplacement occasionné par immersion de l'échantillon dans une cellule étalonnée remplie de mercure.

La masse volumique est une caractéristique qui a une grande influence sur le séchage. En effet, un bois de masse volumique élevée, donc un bois lourd, sera constitué de cellules à parois épaisses et à vides cellulaires de faible diamètre. La circulation de l'eau à l'intérieur de celui-ci, et donc son séchage, sera plus difficile que dans un bois léger constitué de cellules à parois minces et à vides cellulaires de fort diamètre.

HERNANDEZ (1991), a mesuré la masse volumique des échantillons de chêne (bois de cœur), et a obtenu les résultats suivants qui montrent la masse volumique moyenne du chêne à l'état anhydre (*figure I.15*).

On remarque une très forte disparité des résultats, les masses volumiques variant de  $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  à  $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Cette disparité se rencontre aussi bien pour des échantillons provenant d'arbres différents que pour des échantillons pris de la même planche. Sur cette figure est indiquée la valeur moyenne obtenue. ( $\bar{\rho}_s = 740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

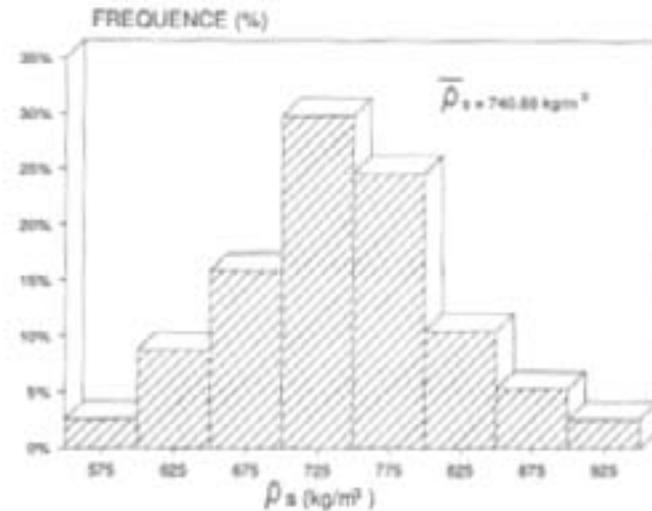


Figure I. 15 : Fréquence des masses volumiques sèches, (HERNANDEZ, 1991).

### 1.3.4 Perméabilité

La loi de Darcy caractérise la convection d'un fluide de masse volumique  $\rho$  et de viscosité dynamique  $\mu$  dans un milieu poreux, elle exprime un flux-masse (NADEAU et PUIGGALI, 1995) :

$$\vec{J} = -\rho \frac{1}{\mu} K \cdot \vec{\nabla} P \quad (\text{éq. I. 12})$$

avec K le tenseur de perméabilité et P la pression.

La perméabilité intrinsèque K caractérise la résistance qu'oppose un milieu poreux au passage des fluides.

La figure (I.16) montre les perméabilités intrinsèques du chêne dans le sens transverse, on observe que les résultats sont très dispersés et couvrent une plage de perméabilité allant de  $K = 2.5 \cdot 10^{-16}$  à  $10^{-19} \text{ m}^2$ , la moyenne se situant de  $2.5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ . Par ailleurs, SIAU (1984) donne une valeur de la perméabilité radiale du chêne blanc égale à  $2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ .

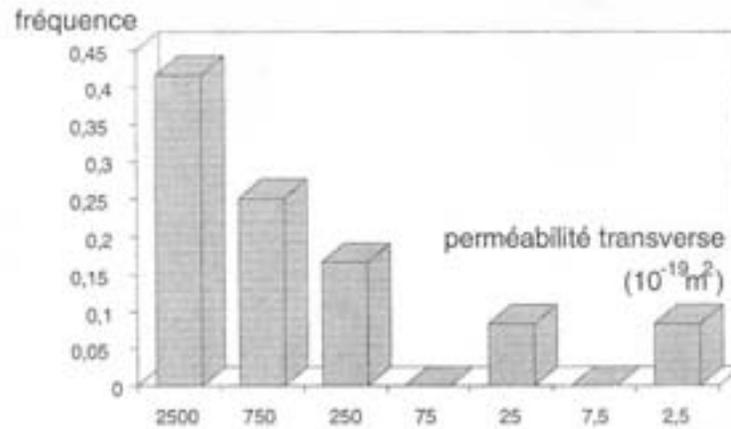


Figure I. 16 : Fréquence des perméabilités transverses pour un bois de chêne (NADEAU et PUIGGALI, 1995).

### 1.3.5 Propriétés thermiques

La loi de Fourier caractérise la conduction de la chaleur dans un milieu, elle exprime un flux thermique en fonction du gradient de température.

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot \vec{\nabla}T \quad (\text{éq. I. 13})$$

où  $\phi$  est le flux de chaleur ( $Wm^{-2}$ ),  $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ ) et  $\vec{\nabla}T$  est le gradient de température à l'interface considérée.

Matériaux	Masse volumique à 15 % (en kg/m <sup>3</sup> ) (1)	Conductivité thermique en W/m <sup>2</sup> °C	Rapport relatif
Pin maritime	450 - 500	0,12	base 1
Pin sylvestre	500 - 550	0,15	1,2
Panneaux de particules	450 à 540	0,12	1
Panneaux contreplaqué Okoumé ou Peuplier	350 à 450	0,12	1
Panneaux de fibre dar	850 à 1.000	0,20	1,66
Chêne et Hêtre massif	600 à 750	0,23	1,9
Verre	2.700	1,15	9,5
Terre cuite	1.800 à 2.000	1,15	9,5
Béton plein	2.200 à 2.400	1,4 à 1,75	13,00
Pierre calcaire dure	2.350 à 2.600	2,4	20,00
Granites	2.300 à 2.900	3,00	25,00
Acier	7.780	52,00	433
Aluminium	2.700	230	1.750
Cuivre	8.930	380	3.170

Tableau I. 2 : Comparaison entre la conductivité thermique des matériaux de construction utilisés (APEP, 1985)

Le bois est peu conducteur de la chaleur, ce par manque d'électrons libres, et de par sa grande porosité. Au fur et à mesure que sa teneur en eau augmente, son aptitude à conduire la chaleur augmente (LARTIGUE, 1987).

Le tableau comparatif montre que le bois est l'un des matériaux le mieux placé au point de vue isolation thermique (*tab.I.2*).

HERNANDEZ (1991) a effectué des mesures de la conductivité thermique du chêne pour différents teneurs en eau. Il a établi la relation suivante pour l'évolution de ( $\lambda$ ) en fonction de ( $W$ ).

$$\lambda(W) = 0,386W + 0,137 \quad (\text{éq. I. 14})$$

La figure (*I.17*) montre cette corrélation avec des résultats expérimentaux à la température 20 °C.

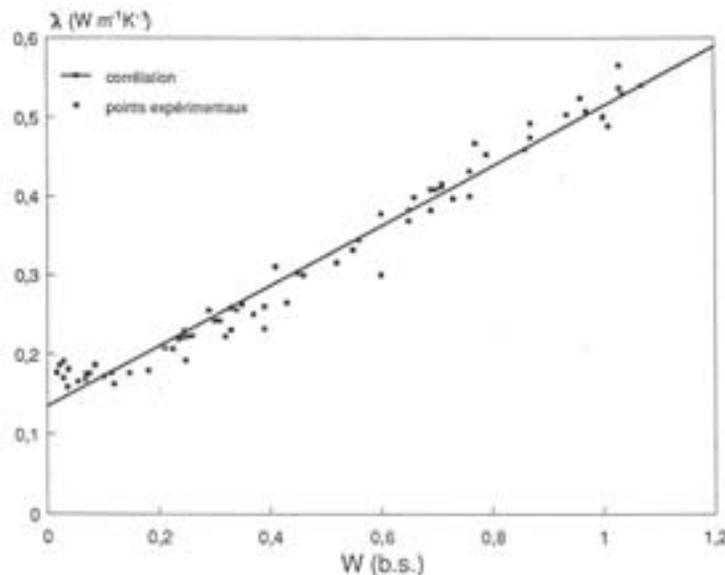


Figure I. 17 : Conductivité thermique d'un bois de chêne en fonction de la teneur en eau (HERNANDEZ, 1991)

La diffusivité thermique exprime l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Elle peut être déduite facilement de la conductivité si l'on connaît l'évolution avec la teneur en eau de la chaleur spécifique  $C_p$  et de la masse volumique  $\rho$ .

$$a(w) = \frac{\lambda(w)}{\rho(w)C_p(w)} \quad (\text{éq. I. 15})$$

Elle peut être mesurée directement à l'aide d'une méthode flash (GOBBE et al. 1989). Cette méthode consiste à soumettre une face d'un échantillon à une impulsion thermique de courte durée (1 à 10 ms), puis à enregistrer l'évolution de la température sur l'autre face. HERNANDEZ, (1991) a effectué des mesures sur des échantillons à différentes teneurs en eau. La figure (I.18) montre la variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau.

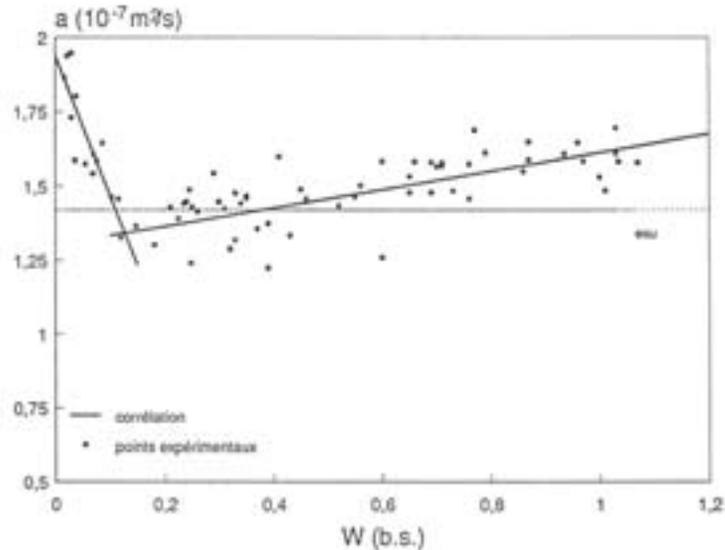


Figure I. 18 : Diffusivité thermique d'un bois de chêne en fonction de la teneur en eau ( $T = 20\text{ °C}$ ) (HERNANDEZ, 1991).

On observe deux domaines de teneur en eau pour lesquels la diffusivité thermique a des comportements totalement différents. Premièrement, partant du matériau sec, on constate une décroissance brutale de la diffusivité pour les basses teneurs en eau, puis une évolution lente quasi-linéaire de cette propriété avec des valeurs légèrement supérieures à celle de l'eau ( $1,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ).

## I.4 Conclusion

Nous avons vu que la structure anatomique du bois peut influencer l'opération de séchage car le bois est un matériau hétérogène, anisotrope et hygroscopique possédant une variabilité inter-essence ce qui le rend différent d'un milieu poreux habituel.

L'analyse d'un plan ligneux montre que les tissus conducteurs sont les vaisseaux, les tissus de soutien sont les fibres et les tissus de réserve sont les rayons ligneux. Le transfert de masse est favorisé dans les sens axiaux et radiaux grâce à ces tissus.

Dans le chêne, lors du passage du bois fonctionnel au bois inerte, des tyllés se développent à l'intérieur des vaisseaux, elles entraînent des difficultés lors du séchage. Des extraits tanniques peuvent aussi bloquer les voies de circulation de l'eau dans les lumens cellulaires et dans les ponctuations, mais ils peuvent aussi affecter les passages entre les fibres de la paroi cellulaire (DEMANET, 1998).

Il est par ailleurs important de différencier les types d'eau présents dans le bois afin de mieux comprendre le comportement du matériau au cours du séchage :

L'eau libre, retenue dans les lumens de bois, est évacuée pendant la première partie du séchage. Le moment où il n'y a plus d'eau libre, le bois atteint le point de saturation des fibres qui correspond pour la quasi-totalité des essences à une teneur en eau voisine de 0.3.

L'eau liée ou hygroscopique est retenue dans les parois cellulaires, elle part pendant la deuxième partie du séchage, son évacuation s'accompagne d'un retrait du bois.

Le taux d'humidité du bois varie considérablement selon l'essence. Les feuillus européens ont une humidité à l'état vert entre 80% à 90% d'humidité. On amène, grâce au séchage artificiel, le bois à une humidité entre 12% à 15 % selon l'ambiance.

# **CHAPITRE II**

## **MODÉLISATION DU SÉCHAGE A L'ÉCHELLE DU SÉCHOIR**

Ce chapitre présente notre contribution au développement de la modélisation du séchage sous vide discontinu du bois. Le travail actuel s'appuie principalement sur une étude effectuée précédemment au laboratoire en 1995 par BAIXERAS. Il a modélisé le problème du séchage à deux échelles : échelle du produit et échelle du séchoir. Dans la modélisation à l'échelle du séchoir, BAIXERAS traite la phase de vide dans sa globalité, nous introduisons ici une distinction entre le régime actif (pompe à vide en fonctionnement) et le régime passif (pompe à vide est à l'arrêt). Dans ce dernier régime nous introduisons une expression directe pour le flux de vapeur sortant du bois.

La première partie de ce chapitre présente le modèle de séchage proposé précédemment et la deuxième partie présente le modèle du flux masse ajoutée au modèle de base.

<b>II</b>	<b>MODELISATION DU SECHAGE A L'ECHELLE DU SECHOIR .....</b>	<b>29</b>
<b>II.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>II.2</b>	<b>Description du fonctionnement d'un séchoir sous vide discontinu .....</b>	<b>31</b>
<b>II.3</b>	<b>Développement de la modélisation .....</b>	<b>32</b>
<b>II.4</b>	<b>Description de la modélisation à l'échelle du séchoir .....</b>	<b>33</b>
II.4.1	Hypothèses fondamentales .....	33
II.4.2	La phase convective.....	34
II.4.3	La phase de vide .....	35
II.4.4	Conditions aux limites .....	37
II.4.5	Description des échanges pendant le régime passif.....	39
II.4.6	Résolution numérique.....	45
<b>II.5</b>	<b>Commentaire .....</b>	<b>50</b>



## II Modélisation du séchage à l'échelle du séchoir

### II.1 Introduction

Le séchage artificiel du bois s'est développé de façon significative au cours des dernières décennies. Par rapport au séchage naturel, il présente plusieurs avantages concernant la rapidité et la qualité du produit final. Selon le CTBA (1990) (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement), ces avantages sont :

- Le séchage artificiel permet d'éviter le transport du bois humide, le prix du litre d'eau transporté revient en effet très cher (selon les essences, le séchage d'un bois vert ramené à un taux d'humidité résiduelle de 10% permet d'éliminer 350 à 400 litres par mètre cube de bois, ce qui représente jusqu'à la moitié du poids final !),
- Il permet d'atteindre des taux d'humidité inférieurs à ceux obtenus par séchage naturel, moins de 15%,
- Il présente également l'intérêt de réduire notablement le temps de séchage du produit, ce qui en matière de coût, de gestion des stocks et de souplesse face à la demande, est un atout considérable.

Par contre le séchage naturel :

- Est moins brutal grâce à l'alternance du jour et de la nuit au cours de laquelle l'humidité relative de l'air remonte toujours à une valeur élevée,
- Pour les feuillus durs (chêne), un ressuyage à l'air libre est conseillé pour préserver une bonne qualité de séchage,
- La température et l'hygrométrie de l'air ne sont pas maîtrisées : quelques essences présentent de nombreuses gerces (fentes de surface peu profondes),
- Il est favorable aux attaques biologiques par les insectes et les champignons,
- Il exige beaucoup de temps et de grandes surfaces de terrain.

En effet, le séchage naturel est suffisant pour des usages à l'extérieur tandis que, il est indispensable de pratiquer le séchage artificiel quand le bois est destiné à des usages intérieurs.

Dans les séchoirs sous vide, la dépression est un facteur déterminant : l'eau circule cinq fois plus vite que dans le matériau à pression atmosphérique (ALEON et al., 1990). L'action du vide se traduit par un abaissement de la température d'ébullition de l'eau. La chaleur peut être transmise au bois par convection, conduction, ou rayonnement, puisque le vide ne transmet pas la chaleur. On doit alors soit interrompre le vide, soit mettre le bois en contact avec des éléments chauds (plaques en aluminium dans lesquelles circule de l'eau chaude) : nous avons alors séchage sous vide continu, soit par l'apport de vapeur surchauffée via des ventilateurs (cette vapeur est renouvelée continuellement), soit interrompre le vide par des intervalles réguliers et réchauffer en atmosphère (séchage sous vide discontinu).

L'intérêt du séchage sous vide réside sur la rapidité et la bonne qualité finale. Ce procédé est plus onéreux que le séchage convectif à haute température : il est réservé aux essences nobles qui ne supportent pas des températures élevées. Il est en particulier assez répandu pour sécher le chêne (voir PERRE, 1994, 1998).

Selon le CTBA les principaux avantages du séchage sous vide sont :

- La possibilité de sécher, dans de bonnes conditions, des essences feuillues de forte épaisseur.
- Une mise en oeuvre facile (dispositif monobloc et raccordement faciles).
- La capacité de pouvoir sécher des bois de toutes épaisseurs en obtenant facilement une faible humidité finale.
- La rapidité : La durée de séchage est 4 à 5.5 fois plus courte qu'un séchage par air chaud climatisé et les déformations sont très sensiblement plus faibles (ALEON et al. 1990,1991).

JOLY., MORE-CHEVALIER (1980), ont remarqué des points sur le séchage sous vide continu et discontinu, il paraît :

- 1 Qu'il n'y a pratiquement pas de différence en ce qui concerne les temps de séchage : les deux méthodes donnent des résultats voisins (le temps de 2 à 5 fois plus courts que dans le procédé dit « traditionnel »).
- 2 Qu'en ce qui concerne la qualité du séchage, si la différence n'est pas sensible pour des bois déjà ressuyés, il existe une dispersion de l'humidité finale plus importante

lorsqu'on utilise un séchoir à plaque (donc à vide continu) pour sécher des lots entièrement humides.

- On peut conclure que le séchage sous vide continu est mieux adapté aux bois ressuyés tandis que le séchage sous vide discontinu permet de traiter des bois initialement humides. Il faut remarquer toutefois que de nombreux constructeurs proposent actuellement des appareils pouvant fonctionner alternativement en vide continu ou discontinu

## II.2 Description du fonctionnement d'un séchoir sous vide discontinu

Pendant le déroulement d'un cycle de séchage sous vide discontinu, nous distinguons deux phases :

- Une phase convective pendant laquelle le séchage a lieu à pression atmosphérique normale. Le fonctionnement du ventilateur permet de transférer au bois la chaleur emmagasinée dans les parois du séchoir.
- Une phase de vide présente une succession de deux régimes (*figure II.1*) au cours desquels une basse pression est maintenue pendant un temps déterminé :

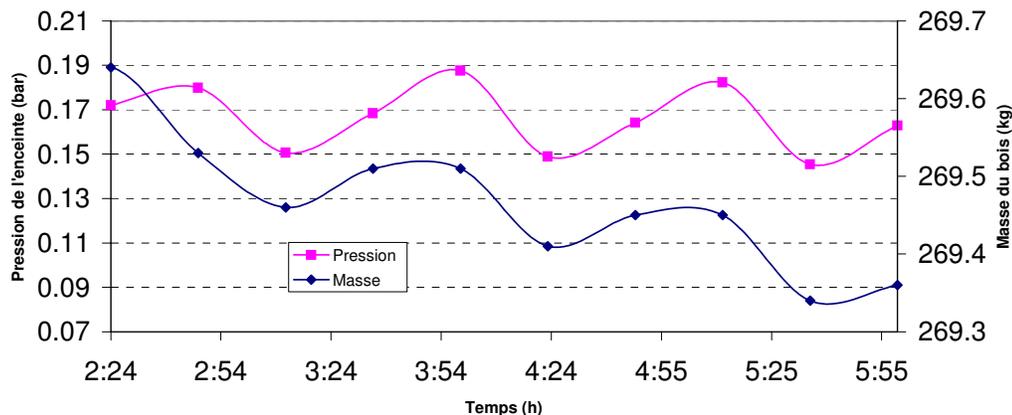


Figure II. 1 : Evolution de la masse totale du bois et de la pression d'enceinte au cours d'une phase de vide.

- Un régime actif où la pompe à vide fonctionne, ce qui permet d'abaisser la pression en dessous de la pression atmosphérique. Le flux de matière extrait est directement lié au débit de la pompe.

- Un régime passif où la pompe est arrêtée. Pendant ce régime, l'environnement dans l'enceinte est quasiment statique et l'évaporation à la surface est beaucoup moins importante du fait de l'équilibrage de la pression et de l'augmentation de la température à la surface du bois.

### **II.3 Développement de la modélisation**

La proposition d'un modèle de connaissance relatif au séchage sous vide du matériau capilaro-poreux tel que le bois est récente. Mais les travaux scientifiques et les constatations sur le séchage datent des années 1920 (voir : TOEI, 1985 ; SHERWOOD, 1929 ; MOYNE, 1982 et 1987 ; GUILMAIN, 1997).

Lors du séchage sous vide d'un bois résineux, MARTIN et MOYNE (1982) ont constaté une accélération du transfert de masse due au gradient de pression de la phase gazeuse. La prise en compte des gradients de température et de teneur en eau ne sont plus alors suffisantes pour décrire parfaitement le comportement au séchage.

Puis d'autres chercheurs (voir GUILMAIN, 1997) ont contribué à mettre en évidence (pendant un séchage sous vide) l'apparition de fronts et la présence de trois zones dans les milieux poreux :

- Une zone monophasique constituée de vapeur au voisinage de la surface chaude où le transfert de chaleur par conduction est prédominant,
- Puis une zone diphasique liquide-vapeur sensiblement isotherme dont la température est proche de la température d'ébullition. Le transfert de chaleur est essentiellement assuré par mécanisme d'évaporation-condensation,
- Enfin, une zone monophasique liquide où le transfert de chaleur est à nouveau essentiellement conductif.

Puis, BAIXERAS (1995) a mis en place une méthode permettant de déterminer le flux masse qui fait passer de l'état initial à l'état final tout en satisfaisant aux conditions limites. Plus récemment, GUILMAIN (1997), a mis en place des corrélations dépendant du niveau de séchage et exprime le coefficient de transfert de chaleur en fonction des nombres de REYNOLDS et de PRANDTL dans le cas d'un séchage sous vide en vapeur surchauffée.

## II.4 Description de la modélisation à l'échelle du séchoir

La description de la modélisation à l'échelle du séchoir s'articule en deux parties. La première partie est consacrée à la présentation des hypothèses simplificatrices caractérisant le séchage d'un amas de planches. Ces hypothèses permettant de décrire le fonctionnement du séchoir sous vide discontinu afin d'aboutir au modèle complet. La deuxième partie détaille l'écriture des équations de bilans et les équations aux niveaux des transferts thermique et massique avec les conditions aux limites.

### II.4.1 Hypothèses fondamentales

Nous supposons que toutes les planches subissent les mêmes conditions de séchage. L'empilement est supposé constitué de planches identiques. La planche type est celle noyée dans l'amas comme le montre la figure (II.2) et les conditions aux limites étudiées sont celles que subit pareille planche. Cette hypothèse peut encore être mise en défaut si on considère le cas de planches situées aux extrémités de cet amas. Ces dernières reçoivent un apport de chaleur supplémentaire par rayonnement avec les parois. Pourtant, tant au niveau du laboratoire qu'au niveau industriel, cette hypothèse s'avère justifiée au regard de la cinétique globale.

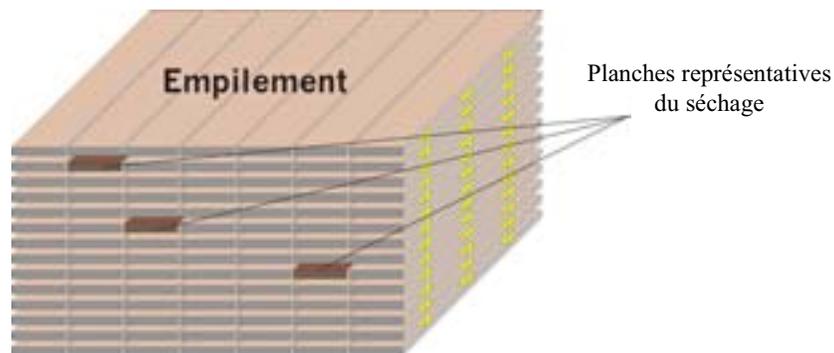


Figure II. 2 : Empilement et planches représentatives du séchage.

Les propriétés du mélange gazeux de l'enceinte (pression, température, humidité relative) sont supposées identiques en tout point de séchoir. En revanche, pour traduire le couplage produit procédé, nous prendrons en compte les variations temporelles de ces grandeurs. Les grandeurs considérées sont la pression, la température et la fraction massique de vapeur, notées respectivement  $P_{enc}$ ,  $T_{enc}$ ,  $C_{enc}$ , aussi, la phase gazeuse ou l'air humide est un mélange binaire idéal d'air sec et de vapeur d'eau.

## II.4.2 La phase convective

### II.4.2.1 Bilan des échanges

Le système à considérer est le volume libre gazeux  $V$  de l'enceinte, constitué d'air humide et caractérisé par sa pression, sa température et sa fraction de massique de vapeur (*figure II.3*). De cette configuration, on va définir la nature des échanges entre l'intérieur et l'extérieur et le bilan des échanges thermiques et massiques d'un séchoir sous vide discontinu.

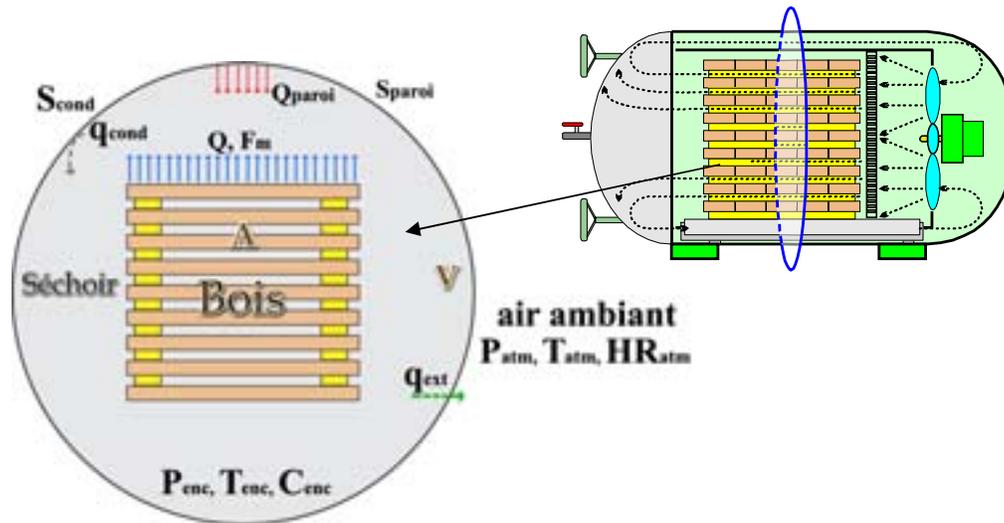


Figure II. 3 : Bilan des échanges au niveau du séchoir.

- ▶ Soit  $F_m$  le flux masse de vapeur échangé par le bois avec l'enceinte, il traduit le séchage du produit. En appelant  $A$  la surface totale d'échange, le débit masse  $\mathfrak{S}_m$  total échangé par unité de temps est :  $\mathfrak{S}_m = F_m A$
- ▶ Soit  $q_{ext}$  le débit volume d'air échangé par l'enceinte avec l'air ambiant.
- ▶ Soit  $q_{cond}$  le débit volume correspondant à la condensation de la vapeur sur les parois froides du séchoir de surface totale  $S_{cond}$ .
- ▶ Soit  $Q_{paroi}$  la chaleur échangée par unité de temps par les parois de l'enceinte ( $S_{paroi}$ ) avec l'air de l'enceinte.

- Soit  $A \times Q$  la chaleur échangée, par unité de temps, par la surface totale d'échange  $A$  du bois avec l'enceinte.  $Q$  est l'énergie qui concerne directement le séchage du produit, à coupler avec le flux masse  $F_m$ .

### II.4.2.2 Equations des conservations

Les variables choisies sont la masse volumique de l'air sec, la masse volumique de la vapeur et la température, notées respectivement  $\rho_{a\,enc}$ ,  $\rho_{v\,enc}$ ,  $T_{enc}$ .

Le bilan de masse s'écrit, en gardant les mêmes notations :

$$\frac{d\rho_{a\,enc}}{dt} = -\rho_{a\,enc} \frac{q_{ext}}{V} \quad \text{pour l'air sec} \quad (\text{éq. II. 1})$$

$$\frac{d\rho_{v\,enc}}{dt} = -\rho_{v\,enc} \frac{q_{ext} + q_{cod}}{V} + F_m \frac{A}{V} \quad \text{pour la vapeur} \quad (\text{éq. II. 2})$$

Le bilan d'énergie s'écrit, en considérant la conservation de l'énergie interne :

$$\begin{aligned} \frac{dT_{enc}}{dt} = & \frac{F_m A}{V(\rho C_v)_g} (Cp_v - Cv_v) T_{enc} - \frac{q_{con}}{V C v_v} T_{enc} (Cp_v - Cv_v) \\ & + \frac{q_{ext}}{V} T_{enc} \left( 1 - \frac{(\rho Cp)_g}{(\rho Cv)_g} \right) + \frac{(Q_{paroi} + Q)}{V(\rho Cv)_g} \end{aligned} \quad (\text{éq. II. 3})$$

avec,

$$(\rho Cv)_g = \rho_{a\,enc} Cv_a + \rho_{v\,enc} Cv_v \quad (\text{éq. II. 4})$$

$$(\rho Cp)_g = \rho_{a\,enc} Cp_{enc} + \rho_{v\,enc} Cp_v \quad (\text{éq. II. 5})$$

où  $Cv_a$ ,  $Cp_a$ ,  $Cv_v$ ,  $Cp_v$  représentent les chaleurs massiques à volume et pression constants pour l'air sec et la vapeur.

## II.4.3 La phase de vide

### II.4.3.1 Bilan des échanges

La nature des échanges (*figure II.4*) est quasiment identique à celle établie au paragraphe précédent pour la phase convective. Seul le débit volume de la pompe à vide

$q_{pompe}$  remplace le débit volumique de refoulement  $q_{ext}$ , les autres notations restent inchangées. Il faut également rajouter un débit de fuite  $q_{fuite}$  qui traduit l'imparfaite étanchéité de l'enceinte.

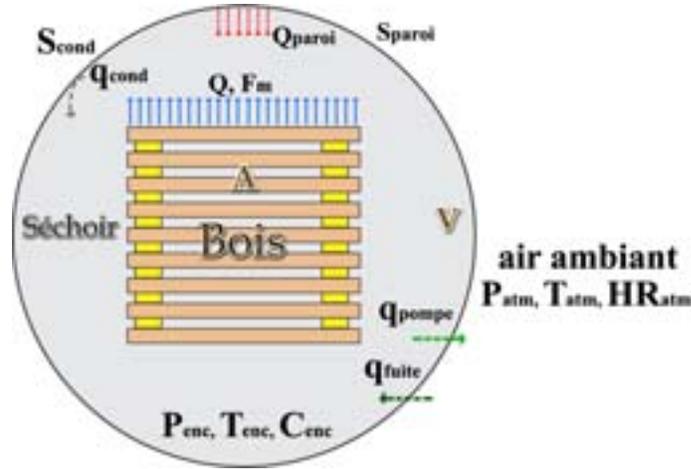


Figure II. 4 : Bilan des échanges pour la phase de vide.

Rappelons que :

- Les phases de pompages sont atteintes si  $q_{pompe} > 0$  alors,  $P_{enc} > P_{vide} + \Delta P$
- Ainsi,  $q_{pompe} = 0$  pendant les phases de régulation alors,  $P_{vide} < P_{enc} < P_{vide} + \Delta P$

### II.4.3.2 Equation des conservation

Les équations de conservations de masse s'écrivent :

- Pour la vapeur :

$$\frac{d\rho_{Venc}}{dt} = -\rho_{Venc} \frac{q_{pompe} + q_{cond}}{V} + \rho_{Vatm} \frac{q_{fuite}}{V} + F_m \frac{A}{V} \quad (\text{éq. II. 6})$$

- Pour le résidu d'air sec :

$$\frac{d\rho_{a enc}}{dt} = -\rho_{a enc} \frac{q_{pompe}}{V} + \rho_{a atm} \frac{q_{fuite}}{V} \quad (\text{éq. II. 7})$$

- En considérant la conservation de l'énergie interne, le bilan d'énergie donne :

$$\begin{aligned} \frac{dT_{enc}}{dt} = & \frac{F_m \cdot A}{V(\rho C_v)_g} (C_{p_v} - C_{v_v}) T_{enc} - \frac{q_{cond}}{V C_{v_v}} T_{enc} (C_{p_v} - C_{v_v}) \\ & + \frac{q_{pompe}}{V} T_{enc} \left( 1 - \frac{(\rho C_p)_g}{(\rho C_v)_g} \right) - \frac{q_{fuite}}{V} T_{enc} \left( 1 - \frac{(\rho C_p)_{atm}}{(\rho C_v)_{atm}} \right) + \frac{(Q_{paroi} + Q)}{V(\rho C_v)_g} \end{aligned} \quad (\text{éq. II. 8})$$

#### II.4.4 Conditions aux limites

La configuration considérée pour la phase convective est celle de l'écoulement d'un fluide (air de séchage) sur une paroi, supposée hydrodynamiquement lisse, où règnent une température  $T_{surf}$  et une pression de vapeur donnée. Les échanges externes constituent alors la seule résistance aux échanges de chaleur et de masse entre le milieu et son environnement.

Le flux de chaleur par unité de surface et de temps  $Q$  transmis par convection est exprimé comme :

$$Q = h_T (T_{surf} - T_{enc}) \quad (\text{éq. II. 9})$$

où  $h_T$  est le coefficient de transport thermique qui dépend de paramètres tels que les conditions de séchage (température, pression, vitesse).

Quant à la pression, nous supposons classiquement qu'il n'y a pas de gradient de pression transversal dans la couche limite. Autrement dit, la pression à la surface est égale à la pression qui règne dans l'écoulement principal :

$$P_{surf} = P_{enc} \quad (\text{éq. II. 10})$$

où,  $P_{surf}$  désigne la pression totale à la surface du produit et  $P_{enc}$  est la pression de l'enceinte.

L'écriture des conditions aux limites pour la phase de vide est beaucoup plus délicate. En effet, le débit de la pompe à vide ( $75\text{m}^3/h$ ) conduit à des vitesses d'écoulement très faibles qui peuvent même être nulles lorsque la pompe ne fonctionne pas (phase de régulation). Dans ses conditions, la valeur du nombre de REYNOLDS est très faible et on ne peut pas parler de l'approche classique de couche limite. Le transfert de chaleur est donc :

- Pour le produit, l'apport d'énergie est quasiment nul :  $Q = 0$
- En ce qui concerne l'air de l'enceinte, vu le rapport entre la masse thermique de l'air et celle du bois on peut considérer en première

approximation qu'il y a équilibre thermique entre le bois et l'air (BAIXERAS, 1995).

$$T_{enc} = T_{surf} \quad (\text{éq. II. 11})$$

En ce qui concerne le flux massique pendant la phase convective, il est décrit par la relation suivante :

$$F_m = h_m (\rho_{Vsurf} - \rho_{Venc}) \quad (\text{éq. II. 12})$$

où,

$h_m$  est le coefficient d'échange massique.

$\rho_{Vsurf}$  et  $\rho_{Venc}$  désignent respectivement les masses volumiques de la vapeur à la surface du matériau et à l'extérieur de la couche limite massique.

Par contre pendant la phase de vide, BAIXERAS a montré qu'il est possible de supposer le système comme étant quasi-statique en posant la relation :

$$P_{Vsurf} = P_{Venc} \quad (\text{éq. II. 13})$$

Cette équation traduit la continuité de la pression partielle de vapeur à la traversée de l'interface produit/enceinte. Ce choix de condition limite suppose aussi l'uniformité des conditions du séchage entre deux lits de planches, justifiée par la faible distance entre ces deux lits. Dans les travaux de BAIXERAS, cette égalité est supposée valable pour les deux régimes (actif et passif). Or, Pendant le régime passif (pompe de vide à l'arrêt) l'égalité n'est pas valable entre la surface du bois et la paroi de l'enceinte à cause de la diffusion de la vapeur d'eau de la surface du bois vers le séchoir. Le paragraphe suivant va s'intéresser à la description du transfert de masse pendant ce régime passif.

### II.4.5 Description des échanges pendant le régime passif

Au cours du régime passif (pompe à l'arrêt) la vapeur sortant à la surface du bois est évacuée vers l'enceinte par diffusion. La loi de Fick peut décrire ce flux

L'équation de conservation de la masse de vapeur est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \vec{\nabla} C) = 0 \quad (\text{éq. II. 14})$$

- C est la concentration ou la fraction massique de vapeur d'eau est définie par le rapport de la masse volumique de vapeur sur la masse volumique de l'air humide

$$C_v = \frac{\rho_v}{\rho_a} .$$

- D est le coefficient de diffusion en  $(m^2 \cdot s^{-1})$ .

#### II.4.5.1 Formulation du problème de diffusion

On considère un lot de planches humides, placé dans le système de séchage de volume V correspond au volume d'air humide.

BAIXERAS (1995) a considéré que la concentration dans le séchoir en tout moment est égale à la concentration d'équilibre  $C_{eq}$  (figure II.5). Il suppose qu'il n'y a pas de gradient de concentration entre le bois et la paroi. Cela conduit à une pression uniforme dans toute l'enceinte  $P_{v_{surf}} = P_{v_{enc}}$  même à la surface du bois.

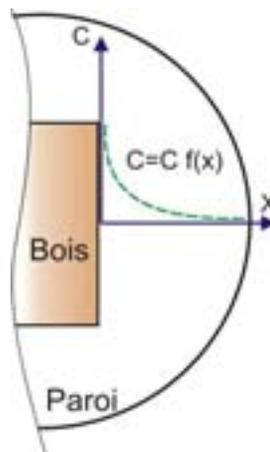


Figure II. 5 : Concentration de vapeur d'eau dans l'enceinte.

Nous supposons pendant le régime passif que la concentration à la surface est en fonction de la distance entre la paroi et le bois ce qui revient à considérer la pression comme étant non uniforme.

A partir de cette vision, nous avons traité le problème de diffusion en appliquant, en premier lieu, la loi de Fick unidimensionnelle sur une géométrie concrète dans un logiciel de résolution d'équations différentielles, puis nous avons étudié la variation de la concentration à deux échelles :

- une petite échelle : la diffusion entre deux planches (*figure II.6*).

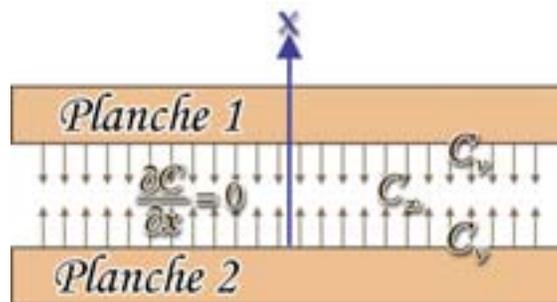


Figure II. 6 : Diffusion entre deux planches.

Le résultat de cette simulation est présenté dans la figure (*II.7*). Cette figure montre que l'espace entre les deux planches arrive à l'équilibre pendant un temps très court de l'ordre de 2 secondes, ce temps est négligeable devant le temps caractéristique du régime passif qui s'élève à 6 minutes.

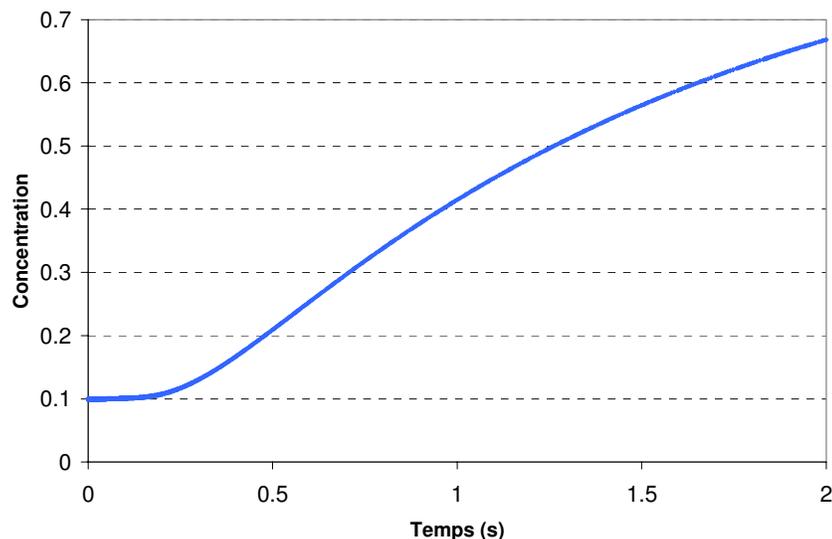


Figure II. 7 : Evolution de la concentration sur le plan médian en fonction du temps

- Une échelle plus grande considère que les planches constituent un amas du bois (figure II.8), la surface du bois est celle de l'extérieur de l'amas (dans ce cas la surface d'échange A est inférieure de la surface présentée dans le modèle de séchage déjà décrit). On applique les mêmes conditions de simulations précédentes, on étudie la variation de la concentration suivant la distance bois-séchoir.

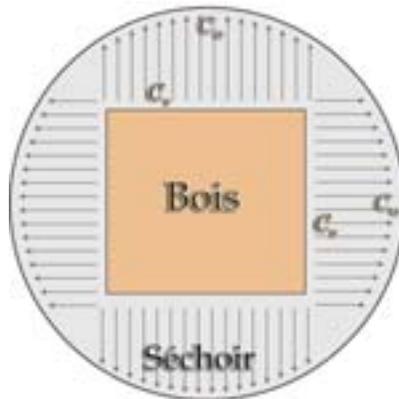


Figure II. 8 : Diffusion entre l'amas des planches et la paroi du séchoir.

La figure (II.9) montre que la saturation en vapeur d'eau dans le séchoir peut atteindre l'équilibre dans un temps approprié de l'ordre de 40 minutes. Ce temps est suffisant et grand par rapport à la durée d'un régime passif réel dans nos conditions.

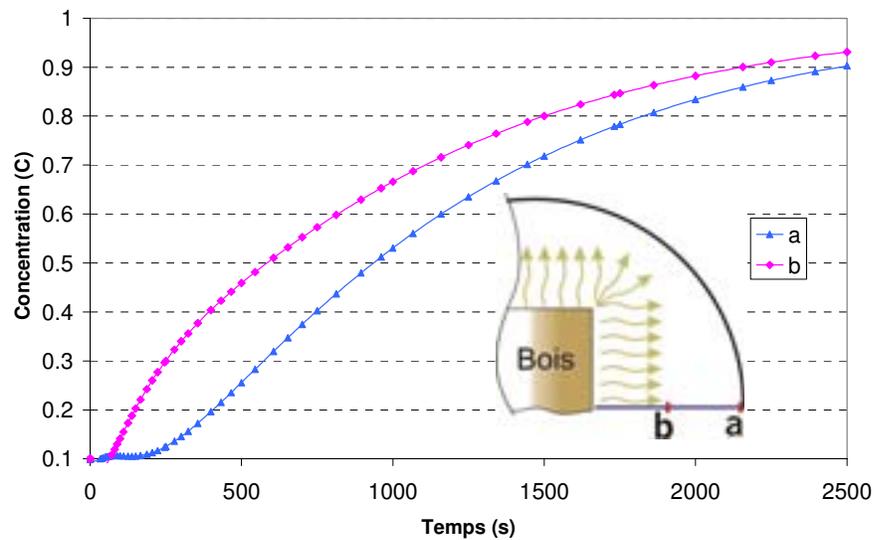


Figure II. 9 : variation de la concentration en fonction de temps aux points a et b dans l'enceinte

La figure (II.10) présente un profil de concentration entre la surface du bois et la paroi du séchoir à un instant donné. Ce profil respecte la nature parabolique de l'équation (II.15). Il est intéressant alors d'écrire une solution approchée de cette équation sous forme analytique afin d'en déduire une expression simple du flux masse.

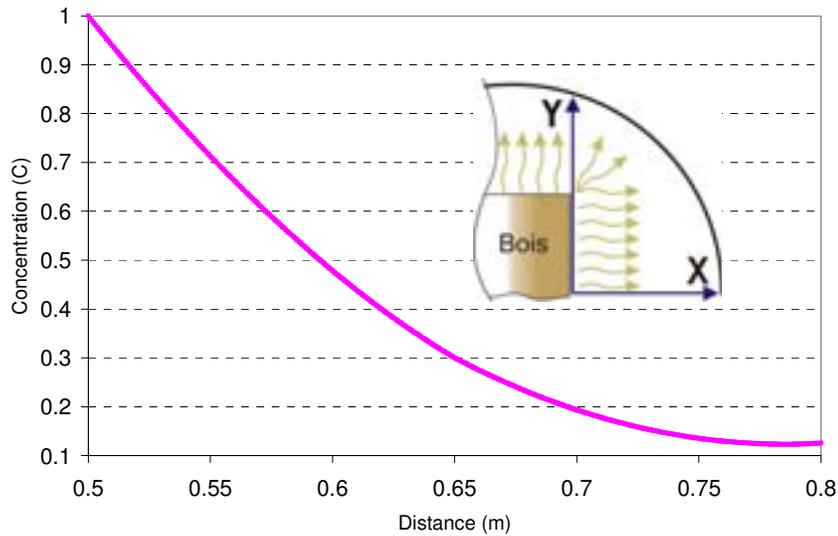


Figure II. 10 : Evolution spatiale de la concentration entre la pile de bois et l'enceinte.

#### II.4.5.2 Expression analytique

Nous allons postuler un profil parabolique pour la concentration en vapeur. Le polynôme est de la forme :

$$C = \gamma x^2 + \beta x + \alpha \quad (\text{éq. II. 15})$$

Où  $x$  est la distance à partir de la surface du bois

Les conditions aux limites sont :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad \text{à la paroi du séchoir (} x = R_f - R_b \text{)} \quad (\text{éq. II. 16})$$

$$C = C_v \quad \text{la surface du bois (} x = R_b \text{)} \quad (\text{éq. II. 17})$$

En intégrant les conditions aux limites dans l'équation (II.15), il en résulte

$$C = \frac{C_v - C_\infty}{(R_f - R_b)^2} x^2 - 2 \frac{C_v - C_\infty}{(R_f - R_b)} x + C_v \quad (\text{éq. II. 18})$$

où,

$R_f$  et  $R_b$  représentent respectivement le rayon du séchoir et celui du bois.

$C_v$  est la concentration à la surface du l'amas

$C_\infty$  est la concentration de vapeur d'eau aux parois de séchoir.

le flux masse de vapeur d'eau est définie comme :

$$F_m = -\rho_\alpha D \vec{\nabla} C \quad (\text{éq. II. 19})$$

avec  $\rho_\alpha$  est la masse volumique totale de l'air humide  $kg \cdot m^{-3}$ .

Enfin, On peut donc écrire le flux de vapeur en remplaçant (grad C) par sa valeur calculé dans l'équation (II.18), on obtient la relation suivante qui exprime le flux masse de la vapeur d'eau sortante du bois vers la paroi du séchoir :

$$F_m = 2\rho_\alpha D \frac{(C_v - C_\infty)}{(R_f - R_b)} \quad (\text{éq. II. 20})$$

$F_m$  est proportionnel à  $C_v - C_\infty$  et inversement proportionnel à  $R_f - R_b$ .

Comme l'amas possède une forme parallélépipédique, la distance entre la surface du bois et celle de l'enceinte n'est pas constante, Par conséquent, nous avons intégré la distance moyenne entre le bois et la paroi du séchoir  $d_{moy}$  afin de généraliser le problème et de faciliter les calculs. On peut écrire l'équation (II.20) sous la forme suivante :

$$F_m = 2\rho_\alpha D \left( \frac{C_v - C_\infty}{d_{moy}} \right) \quad (\text{éq. II. 21})$$

La comparaison du flux moyen résultant de notre solution analytique et celle numérique obtenu de l'application de loi de Fick dans des conditions classiques de séchage est présentée dans la figure (II.11).

La comparaison entre l'expression analytique et la solution numérique montre globalement un bon accord, mais une significative différence apparaît au début du régime passif où le flux masse est maximum.

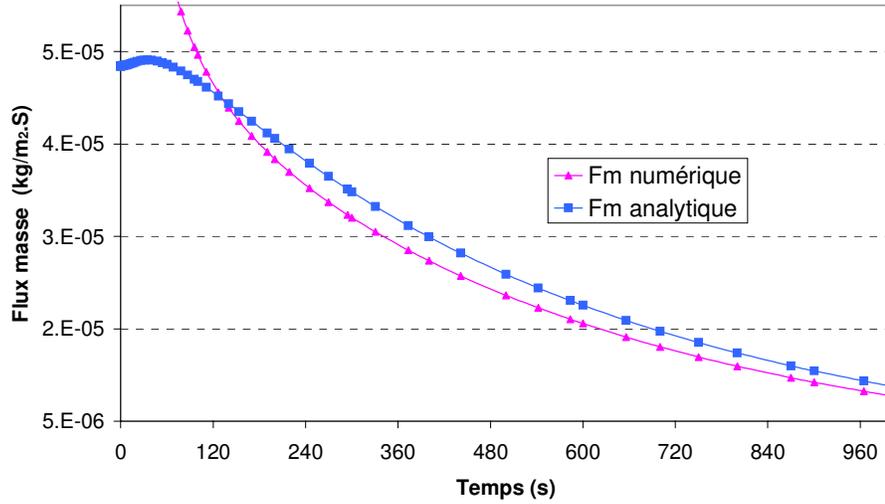


Figure II. 11 : Comparaison entre la solution analytique et numérique.

Nous pouvons en définitif écrire le bilan de masse de vapeur dans le séchoir pendant un régime passif d'un cycle de séchage sous vide discontinu en introduisant l'expression  $F_m$  dans l'équation de base (II.6) on obtient alors :

$$\frac{d\rho_{venc}}{dt} = -\frac{\rho_{venc}q_{cond}}{V} + \rho_{vatm} \frac{q_{fuite}}{V} + 2\rho_{\alpha}D \frac{(C_{vsurf} - C_{venc}) A}{d_{moy} V} \quad (\text{éq. II. 22})$$

la fraction massique de vapeur d'eau étant définie comme :

$$C_v = \frac{\rho_v}{\rho_{\alpha}} \quad (\text{éq. II. 23})$$

alors, le bilan de masse de la vapeur :

$$\frac{d\rho_{venc}}{dt} = -\frac{\rho_{venc}q_{cond}}{V} + \rho_{vatm} \frac{q_{fuite}}{V} + 2D \frac{(\rho_{vsurf} - \rho_{venc}) A}{d_{moy} V} \quad (\text{éq. II. 24})$$

le bilan de masse de l'air sec :

$$\frac{d\rho_{a\text{ enc}}}{dt} = -\frac{\rho_{a\text{ enc}}}{V} + \rho_{a\text{ atm}} \frac{q_{\text{fuite}}}{V} \quad (\text{éq. II. 25})$$

### II.4.6 Résolution numérique

Le système d'équations décrit précédemment (équations II.24, II.25) est composé des inconnues  $\rho_{v\text{ enc}}, \rho_{a\text{ enc}}$  et pour résoudre le système il faut déterminer un certain nombre de paramètres du séchoir.

#### Détermination du débit de condensation ( $q_{\text{cond}}$ )

La condensation se produit due de la mauvaise isolation thermique de certaines parties de l'enceinte vis-à-vis de l'air extérieur. Une représentation du phénomène est faite (figure II.12)

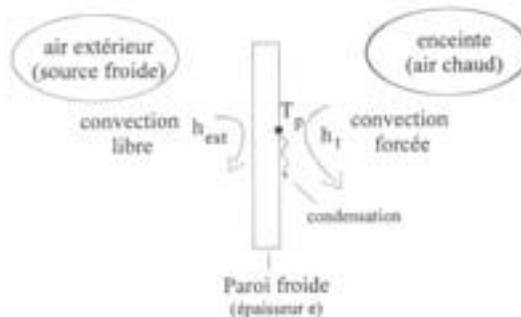
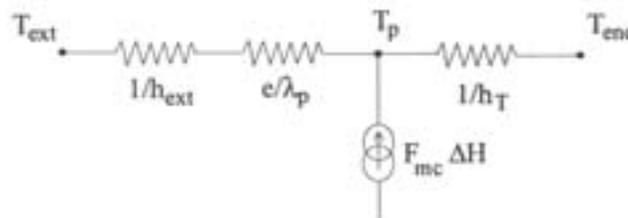


Figure II. 12 : Schématisation de la condensation sur la paroi froide du séchoir.

Il est possible de mener l'analogie électrique suivante (BAIXERAS, 1995) :



en considérant le régime stationnaire, le bilan des flux s'écrit :

$$(T_p - T_{ext}) \frac{1}{1/h_{ext} + e/\lambda_p} + h_T (T_p - T_{enc}) - F_{mc} h_v = 0 \quad (\text{éq. II. 26})$$

$$F_{mc} = \left[ (T_p - T_{ext}) \frac{1}{1/h_{ext} + e/\lambda_p} + h_T (T_p - T_{enc}) \right] / h_v \quad (\text{éq. II. 27})$$

avec,

$T_p$  : est la température de paroi,

$F_{mc}$  : est le flux masse de condensation,

$h_v$  : est la chaleur latente d'évaporation,

en effet, l'existence de condensation suppose :  $T_p \leq T_{rosée}$  ou encore  $F_{mc} \geq 0$

où  $T_{rosée}$  désigne la température de rosée de l'air humide situé dans l'enceinte.

le flux masse de condensation  $F_{mc}$  est donné par la relation :

$$F_{mc} = h_{mc} (\rho_{venc} - \rho_{v sat(TP)}) \quad (\text{éq. II. 28})$$

où  $\rho_{v sat(TP)}$  désigne la masse volumique de la vapeur à la saturation pour la température  $T_p$  et  $h_{mc}$  le coefficient d'échange massique donné par l'analogie de Chilton-Colburn.

Pendant le régime passif, il n'y a pas de ventilateur. La paroi, très conductrice, est refroidie par convection naturelle avec l'air ambiant.

De la connaissance du coefficient d'échange  $h_T$ , on peut déduire  $h_{mc}$  et donc déterminer  $F_{mc}$  grâce à la résolution du système non linéaire (éq. II.27 et II.28).  $q_{cond}$  est alors déterminé par la relation :

$$\rho_{venc} q_{cond} = F_{mc} S_{cond} \quad (\text{éq. II. 29})$$

### Détermination du débit de fuite ( $q_{fuite}$ )

Afin de connaître le débit de fuite, il suffit de réaliser une expérience de mise sous vide du séchoir en présence d'une pile de bois sec.

Afin d'exprimer  $q_{fuite}$  on va partir des équations de conservation de la vapeur et de l'air sec sachant que le flux masse  $F_m$  est nul et le débit de condensation est négligeable puisqu'il n'y a pas de production de vapeur par séchage.

$$\frac{d\rho_{v enc}}{dt} = -\rho_{v enc} \frac{q_{pompe}}{V} + \rho_{v atm} \frac{q_{fuite}}{V} \quad (\text{éq. II. 30})$$

$$\frac{d\rho_{a enc}}{dt} = -\rho_{a enc} \frac{q_{pompe}}{V} + \rho_{a atm} \frac{q_{fuite}}{V} \quad (\text{éq. II. 31})$$

en notant

$$\rho_{enc} = \rho_{v enc} + \rho_{a enc} \quad (\text{éq. II. 32})$$

$$\frac{d\rho_{enc}}{dt} = -\rho_{enc} \frac{q_{pompe}}{V} + \rho_{atm} \frac{q_{fuite}}{V} \quad (\text{éq. II. 33})$$

la résolution de cette équation différentielle nous donne :

$$\rho_{enc} = \left[ \rho_{enc atm} - \frac{q_{fuite}}{q_{pompe}} \right] e^{-t \frac{q_{pompe}}{V}} + \frac{q_{fuite}}{q_{pompe}} \quad (\text{éq. II. 34})$$

$q_{fuite}$  s'écrit donc à  $t = t_0$  :

$$q_{fuite}(t_0) = \left[ P_{enc}(t_0) \frac{MV}{RT_{enc}(t_0)} - \rho_{enc atm} e^{-t_0 \frac{q_{pompe}(t_0)}{V}} \right] / \left[ \frac{1}{q_{pompe}(t_0)} - \left( e^{-t \frac{q_{pompe}(t_0)}{V}} / q_{pompe}(t_0) \right) \right] \quad (\text{éq. II. 35})$$

avec,

M : la masse molaire, R : constante des gaz parfaits.

**Calculer des masses volumiques  $\rho_{v surf}$ ,  $\rho_{v atm}$ ,  $\rho_{a atm}$** 

On peut calculer la masse volumique de chacun des constituants  $i$  à partir de loi de gaz parfait comme suit :

$$\rho_{vi} = \frac{M_v P_{vi}}{R T_i} \quad (\text{éq. II. 36})$$

**Surface totale d'échange A**

La surface totale d'échange du bois avec l'enceinte se traduit directement par la relation suivante :

$$A = 2 \frac{\text{volume total du bois}}{e} \quad (\text{éq. II. 37})$$

en considérant les transferts unidirectionnels dans le sens de la plus petite épaisseur ( $e$ ).

**Coefficient de diffusion moléculaire D**

Nous avons calculé le coefficient de diffusion pour la vapeur d'eau selon la relation de SCHIRMER, utilisable entre 20 et 90 C (MERIGOUX , 1978) :

$$D = 2,26.10^{-5} \frac{1}{P} \left( \frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (\text{éq. II. 38})$$

avec,

T : la température en Kelvin..

**II.4.6.1 Comparaison des modèles actuel et précédent**

Une simulation numérique a été effectuée pour comparer le modèle actuel qui distingue le régime passif avec le modèle de BAIXERAS. Nous avons appliqué les conditions de séchage d'un essai effectué pendant mon stage de DEA (2000) sur les deux simulations. Le tableau (II.1) résume les conditions.

Essai n° 6	Conditions
Durée totale de séchage	198 heures
Temps préchauffage	6h20
Temps de vide	60 minutes
Temps de chauffe	40 minutes
Température de chauffe	65 °C
Volume du bois	0.03 m <sup>3</sup>
P <sub>vide</sub> : pression de vide	15000 Pa
Régulation de la pression	4800 Pa
Teneur en eau initiale	0.64
Surface du bois séché	20.33 m <sup>2</sup>

Tableau II. 1 : Conditions expérimentales de l'essai 6 (ASSOUAD, 2000).

### Cinétiques de séchage

La figure (II.13) illustre une comparaison de la teneur en eau moyenne entre le modèle de BAIXERAS et celui présenté dans ce travail. On constate l'équivalence entre les deux courbes simulées. Cela signifie que notre amélioration n'a pas une influence remarquable sur le comportement du bois pendant le séchage à l'échelle du séchoir.

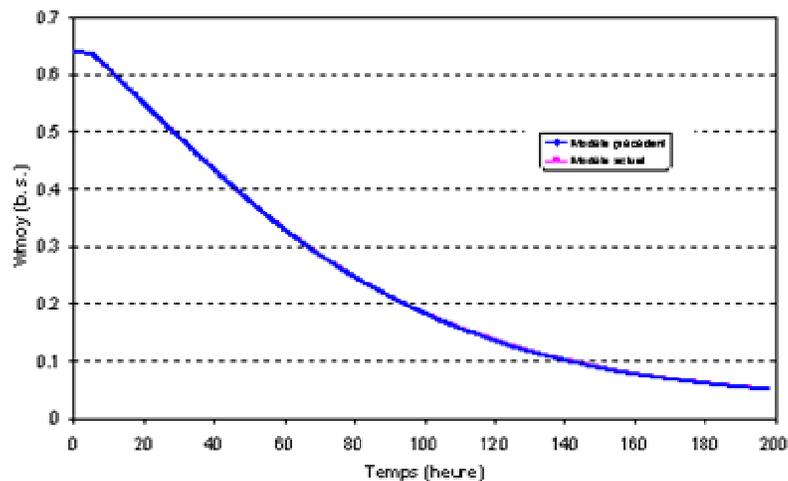


Figure II. 13 : Comparaison des cinétiques de séchage entre le modèle de BAIXERAS et notre modèle.

## Flux masse

Le comportement en masse est présenté sous forme d'une flux masse évoluant au cours du temps (*figure II.14*).

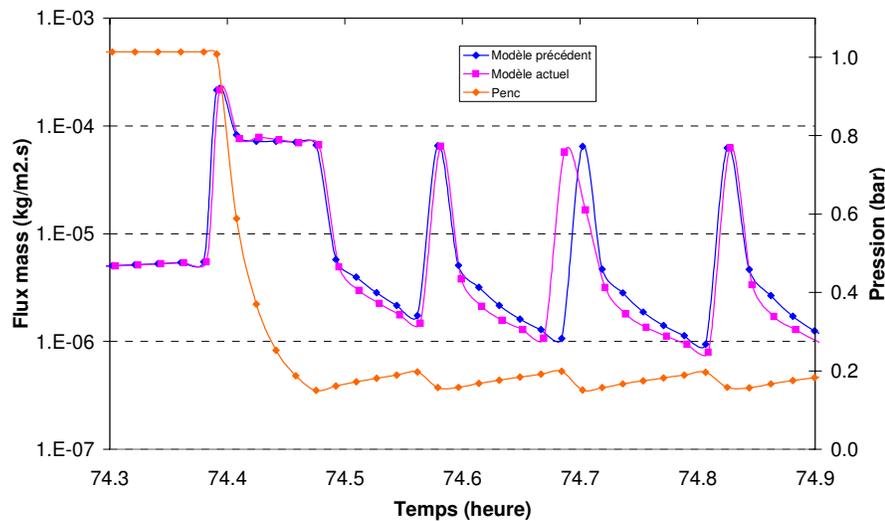


Figure II. 14 : Comparaison du flux masse entre les deux modèles avec l'évolution de pression de l'enceinte.

Là encore, on distingue bien deux régimes : un régime actif où le flux masse est important à cause du fonctionnement de la pompe (diminution de la pression de l'enceinte). Le flux masse dans ce régime est le même dans les deux modèles.

Par contre dans le régime passif, l'évaporation est beaucoup moins intense (augmentation de la pression de l'enceinte). On remarque que la différence entre les deux flux est très légère. En conséquence, on peut considérer cette comparaison comme une validation de l'hypothèse de BAIXERAS qui dit que la pression à la surface du bois est égale à la pression de l'enceinte pour tous les régimes (actifs et passifs).

## II.5 Commentaire

Les résultats de la modélisation que nous avons faite de la phase de vide, notamment en régime passif, montrent une légère différence avec le modèle de BAIXERAS, cette différence est due à l'effet du flux massique de la vapeur d'eau.

En effet, BAIXERAS a supposé le système quasi-statique : il a considéré que le flux masse est le même pendant les régimes passif et actif de la phase de vide. il en résulte que

la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du bois est la même que celle de l'enceinte :  $P_{V_{surf}} = P_{V_{enc}}$

En revanche, notre modélisation s'est appuyée sur l'hypothèse qui suppose que la pression partielle de la vapeur d'eau à la surface du bois est supérieure à celle de l'enceinte.

La concentration en vapeur d'eau à la surface du bois est évidemment plus grande que celle près de la paroi du séchoir d'où une augmentation locale de la pression.

Les résultats obtenus par notre modèle sont très proches de ceux obtenus avec l'hypothèse de BAIXERAS. Toutefois, même si l'hypothèse de BAIXERAS est acceptable en première approximation, la prise en compte du terme de flux masse semble utile pour donner plus de précision au modèle utilisé.

Par ailleurs la condition à la limite utilisée par BAIXERAS suppose une méthode itérative pour la résolution du problème (détermination de  $F_m$  permettant de respecter ( $P_{V_{surf}} = P_{V_{enc}}$ ) alors que l'expression proposée pour le flux masse dans ce travail permet une résolution directe du problème, ce qui est significatif pour les temps de calcul.

# CHAPITRE III

## LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS LORS DU SÉCHAGE

---

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous décrivons la qualité des sciages après la première transformation (débit) et après le séchage. Puis nous qualifions le séchage par des critères différents.

Dans un second temps, nous abordons la modélisation pour évaluer le niveau des contraintes internes du bois au cours du séchage. Ces contraintes sont l'origine principale des dégradations du matériau et en particulier de la présence des fissurations. La comparaison de ces contraintes avec la contrainte admissible du bois permettra de servir de critère de qualification.

<b>III</b>	<b>LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BOIS LORS DU SECHAGE.....</b>	<b>55</b>
<b>III.1</b>	<b>Qualité des produits après transformation (débit, séchage) .....</b>	<b>55</b>
III.1.1	Défauts liés au mode de débit.....	55
III.1.2	Défauts liés au séchage.....	58
III.1.3	Qualification du séchage.....	62
<b>III.2</b>	<b>Modélisation des contraintes internes dans le matériau bois.....</b>	<b>64</b>
III.2.1	Éléments de littérature .....	65
III.2.2	Choix du modèle.....	69
III.2.3	Modèle simplifié de la contrainte .....	71
III.2.4	Mesure le Module d'Young $E_T$ .....	73
<b>III.3</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>76</b>



### **III Le comportement mécanique du bois lors du séchage**

Le bois est un matériau hygroscopique poreux, son comportement et ses propriétés mécaniques sont conditionnées par la présence d'eau dans sa structure.

Les processus de séchage et d'humidification du bois met en jeu trois mécanismes physiques plus ou moins couplés : le transfert thermique, le mouvement d'eau et le retrait et les déformations mécaniques.

Le phénomène du retrait du bois accompagné de gradient d'humidité donne naissance à des contraintes internes qui sont à l'origine des dégradations dans le matériau. Afin de mettre l'accent sur ces dernières, une brève description permet de différencier l'origine des défauts rencontrés après transformation.

#### **III.1 Qualité des produits après transformation (débit, séchage)**

Le bois est un matériau de l'origine vivante, il est influencé par des différents paramètres (environnementaux, écologiques, génétiques, ...) qui entraînent des modifications dans sa structure. Le bois résultant alors est considéré comme un bois différent du bois normal qui est développé dans des conditions naturelles normales et stables.

Les défauts les plus importants qui subsistent même après la transformation sont : les nœuds, bois de réaction, bois à fibres torsés, bois résultant d'un tronc incliné. Ces bois possèdent des caractéristiques morphologiques et mécaniques différentes du bois normal.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux défauts liés au séchage et en particulier les fissures. Pour cela, notre étude va partir d'un bois humide de bonne qualité initiale visible sans nœuds et sans fentes.

Le paragraphe suivant montre l'impact des modes de débit sur le changement de forme des sciages ainsi que les défauts liés à l'opération de séchage.

##### **III.1.1 Défauts liés au mode de débit**

La coupe exerce une influence sur la qualité finale du bois. Nous avons deux types principaux de débits :

### III.1.1.1 Débit sur dosse

Un billon débitée sur dosse correspond à un débit du tronc en planches parallèles entre elles et tangentes aux cernes annuelles : l'avantage est d'obtenir des sciages larges, le bois est moins cher et il sèche plus vite. Dans ce débit on rencontre des morceaux du bois scié sur faux quartiers (*figure III.1*)

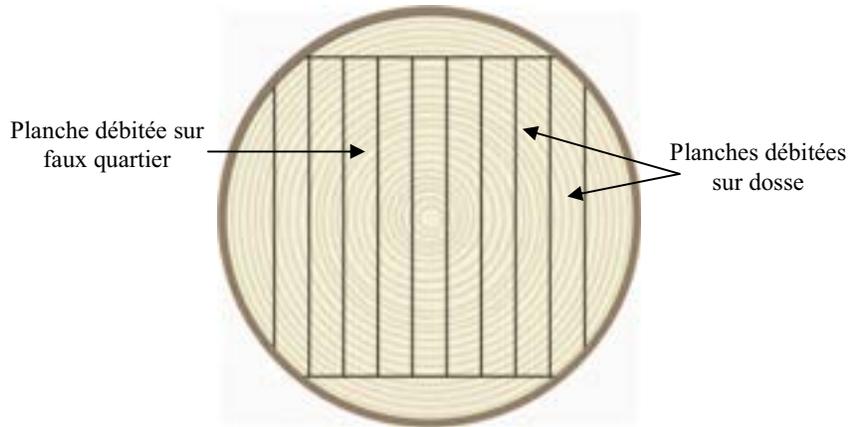


Figure III. 1 : Billon débité sur dosse.

### III.1.1.2 Débit sur quartier

Le résultat recherché dans les débits sur quartier est l'obtention d'un maximum de sciages orientés dans la direction radiale (*figure III.2*) : l'avantage est que le bois ne se tord pas, il gauchit moins et subit moins de retrait sur la largeur et se fend moins en surface.

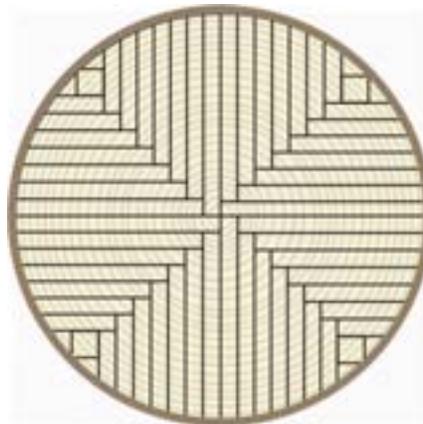


Figure III. 2 : Billon débité sur quartier.

Le mode de débit ainsi que la morphologie des sciages jouent un rôle sur la qualité du bois. En effet, nous pouvons rencontrer quatre types de changement de forme des sciages même avant le séchage. Ces types sont (*figure III.3*) : flèche de face, flèche de chant, tuilage et gauchissement.

	GAUCHISSEMENT OU VOILEMENT Warp	Distorsion hélicoïdale de la pièce dans le sens longitudinal.
	BOMBEMENT OU TUILAGE Cup or bow	Concavité ou convexité transversale de la pièce (en largeur). On dit que le bois a «tiré à cœur» lors de son séchage.
	ROND DE FACE OU FLECHE DE FACE Face deflection	Déformation de la face formant une flèche avec le plan d'origine de la face.
	ROND DE RIVE OU FLECHE DE CHANT Edge deflection	Déformation de la rive formant une flèche avec l'axe longitudinal de la pièce.

Figure III. 3 : Différents types de changement de formes des sciages (APEF, 1985).

La cause principale de ces défauts est liée à l'anisotropie du retrait, cette anisotropie provient de la localisation des sciages dans le billon. Le retrait tangentiel est de 1.5 à 2.5 fois plus élevé que le retrait radial et le retrait axial est 15 fois plus faible que le retrait tangentiel. Cette anisotropie provoque un changement de forme des sciages. Par exemple, au cours du séchage, une planche débitée sur dosse, à cause de la courbure des cernes annuels, a une face supérieure plus tangentielle que sa face inférieure, sa face supérieure va donc se rétracter plus que la face inférieure. La planche sera alors en fin de séchage tuilée (*figure III.4*). Par contre on n'a pas des déformations notables pour une planche débitée sur quartier, le retrait se manifeste seulement par la diminution de son volume.

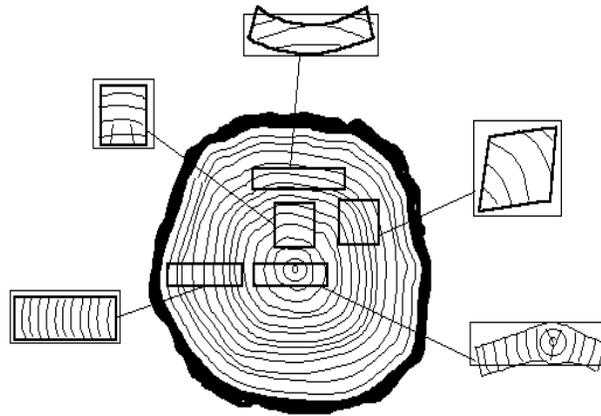


Figure III. 4 : Changement de forme dû à l'anisotropie du retrait.

### III.1.2 Défauts liés au séchage

Outre les changements de dimensions et certaines détériorations dues à la position de la planche dans la grume, de nouvelles détériorations peuvent apparaître au cours du séchage si ce dernier est mal conduit :

#### III.1.2.1 Collapse

Le collapse est caractérisé par des effondrements cellulaires localisés. Il est facilement reconnaissable par une ondulation des faces des échantillons (*figure III.5*). Il 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. S'il est important, le collapse peut entraîner des fentes à l'intérieur des pièces, mais ceci n'est pas systématique.



Figure III. 5 : Collapse généralisé sans fentes (ALEON et al., 1990).

Le collapse est dû à des pressions capillaires qui s'exercent sur les parois des cellules à cause du développement d'une tension hydrostatique dans les capillaires du bois totalement saturés d'eau libre à l'état métastable<sup>1</sup> qui provoque l'effondrement des parois cellulaires lorsque la tension hydrostatique dépasse la résistance limite en compression de ces dernières (DEMANET, 1998).

Le collapse est favorisé si la température de l'air est trop élevée, ceci provoquant une plasticité des parois cellulaires. Le remède consiste donc, pour les cycles de séchage ultérieurs, à utiliser une température plus faible jusqu'au point de saturation des fibres (ALEON et al. 1990).

On peut distinguer deux types de collapse : généralisé (celui qui affecte toute la structure) et localisé (celui qui affecte seulement les gros rayons ligneux) (*figure III.6*). :

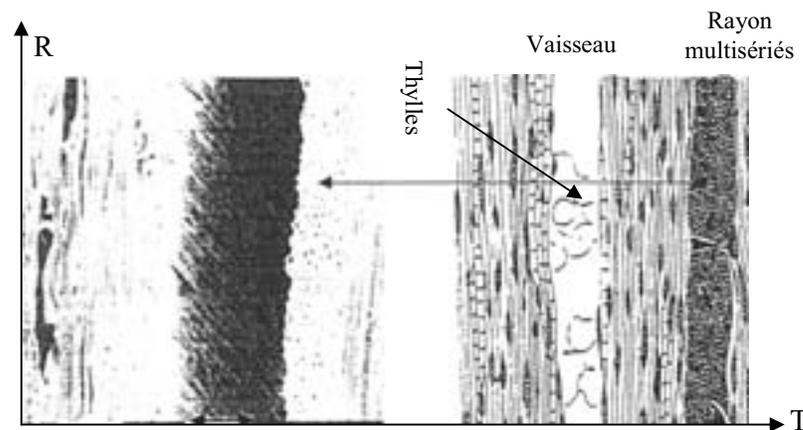


Figure III. 6 : Collapse localisé au centre d'un gros rayon ligneux après un séchage sous vide (DEMANET, 1998).

L'étude des propriétés hygroscopiques des tissus cellulaires des rayons ligneux a bien confirmé que ces éléments retiennent la majeure partie de l'eau microcapillaire à l'état métastable dans leur structure poreuse : le risque de collapse du chêne est localisé dans les rayons ligneux uniquement (DEMANET, 1998).

### III.1.2.2 Discolorations

Les phénomènes de coloration peuvent altérer la qualité esthétique du bois séché (*figure III.7*) (discolorations, brunissement superficiel lors du séchage à haute température)

<sup>1</sup> La métastabilité intervient lorsque un élément, l'eau, est hors équilibre thermodynamique mais se maintient dans un état presque stationnaire.

et elles ne disparaissent pas lors de transformations ultérieures (rabotage par exemple). En effet, elles se développent dans l'épaisseur, de la surface vers le centre de la planche.



Figure III. 7 : Discolorations du chêne (ALEON et al., 1990).

L'apparition de discolorations pendant le séchage produit des hétérogénéités de teintes très importantes qui occasionnent un déclassement du lot de planches. Ce changement de catégorie entraîne une perte financière qui peut aller jusqu'à 30% du prix de vente initial. Ce problème qui concerne plus particulièrement les sciages usinés, rabotés, poncés et collés comme dans la fabrication des panneaux, constitue un souci majeur pour l'industrie du séchage (GUILMAIN, 1997), d'autant plus que les marchés nationaux et internationaux sont actuellement demandeurs de teintes claires et homogènes.

Les professionnels du séchage du chêne ont dégagé empiriquement trois paramètres importants dans les phénomènes d'apparition des discolorations pendant le séchage : la température, l'humidité relative du fluide séchant et la teneur en eau des planches.

WEGENER et FENGEL (1987) ont montré, par des mesures de PH, que les discolorations correspondent à une acidification du bois. Les réactions d'oxydations ne sont pas les seules causes du problème et il pourrait exister des mécanismes de brunissement non enzymatique de type réaction de « Maillard ». Ces mécanismes mettent en jeu, entre autres, les fonctions réductrices des sucres. Ces réactions complexes peuvent se développer dans un milieu acide, basique ou bien à température élevée (supérieure à 100 C°) (CHARRIER, 1992).

Pour limiter le risque d'apparition des taches et leur développement, il convient de rester à basse température, 30 °C, tant que l'humidité du bois est supérieure à 30% (ALEON et al., 1990).

### III.1.2.3 Cémentation en surface

Sous l'effet d'un dessèchement trop intense de la surface des planches, dû à un air trop sec ou à une vitesse d'air trop élevée, il se forme une sorte de croûte qui empêche l'eau de migrer du centre vers l'extérieur. Le séchage se trouve ainsi bloqué. On peut remédier à ce phénomène en traitant le bois sous une atmosphère humide. Si la cémentation n'est pas décelée à temps, elle peut créer des tensions importantes pouvant entraîner des défauts plus graves (RICOLLEAU, 1987).

Dans la méthode du séchage sous vide envisagée, rarement on rencontre les trois types des défauts mentionnés ci-dessus parce que ces défauts se développent dans une ambiance très sèche ou la température est élevée, ce qui n'est pas le cas dans le séchage sous vide grâce à la température douce (autour de 60 °C) qui est atteinte.

En revanche, on rencontre des fentes lorsque les gradients d'humidité imposent des contraintes trop importantes au matériau. Nous distinguons trois catégories des fentes : fentes superficielles, fentes internes et fentes du bout. Dans ce type de défauts, on peut intervenir par l'amélioration des conditions du séchage en diminuant les forces du séchage. Cette amélioration conduit à diminuer le niveau des contraintes internes dans le bois et bien entendu les risques des fissures. Le but de ce chapitre est de calculer cette contrainte interne au cours du séchage.

### III.1.2.4 Fentes superficielles et en bout

Au début de séchage, la surface du bois (ou les extrémités) voit sa teneur en eau chuter rapidement en dessous du point de saturation des fibres ( $W_{psf}$ ). Le bois dans ces zones tendent donc à se rétracter alors que les zones internes (ou milieu des planches) restent pendant une proportion importante du temps de séchage total au-dessus du  $W_{psf}$  et elles ne tendent pas à se rétracter. Il apparaît donc des contraintes de traction en surface du bois (ou aux extrémités), si ces contraintes dépassent la résistance mécanique du bois, elles entraînent des fentes qui progressent vers l'intérieur (ou vers le milieu).

Le remède pour éviter les fentes superficielles et les fentes en bout est d'utiliser un air plus humide au début du séchage tant que toute la masse du bois n'a pas atteint le point de saturation des fibres.

### III.1.2.5 Fentes internes

À partir du moment où les zones internes ont leur humidité en dessous du point de saturation des fibres  $W_{psf}$ , toute la masse du bois va se rétracter. Mais les zones superficielles qui, jusque là avaient séché sous contraintes de traction, vont avoir un retrait plus faible que les zones internes. Ces zones internes vont être soumises à des contraintes de traction. Si les contraintes de traction sont plus importantes que la résistance mécanique du bois, il apparaît des fentes internes (*figure III.8*).



Figure III. 8 : Fentes internes (CANTERI, 1996).

### III.1.3 Qualification du séchage

Les auteurs s'intéressent de manières différentes à la qualité du bois à la sortie du séchoir, certains d'entre eux se contentent de mesurer la longueur des fentes suivant des critères empiriques. D'autres utilisent des méthodes plus sophistiquées mais uniquement après le séchage qui peuvent détecter de manière non destructive, la présence de fente, de collapse ou de nœuds, par l'augmentation du temps de transmission d'ultrasons des échantillons.

CANTERI (1999) a proposé deux critères pour caractériser la qualité du séchage :

1. Le premier est la dispersion autour de la courbe de retrait moyen ( $\alpha$ ) observé sur les différentes courbes représentant l'évolution des retraits élémentaires ( $\alpha_i$ ), elle considère que l'écart type comme indicateur de la fissuration en surface,
2. Le deuxième résulte d'une comparaison entre retrait moyen et libre.

BAIXEARS (1995) a fixé comme critère de qualité l'apparition ou non des fentes superficielles, défaut qu'il suppose prépondérant devant tout autre défaut majeur. Il détermine le rapport  $\beta$  défini par la relation :

$$\beta = \text{Max} \left( \left| \frac{\sigma_{yy}(z)}{\sigma_{\text{max}}(z)} \right| \right) \quad (\text{éq III. 1})$$

$\sigma_{yy}$  désigne la contrainte transverse dans l'épaisseur du bois et  $\sigma_{\text{max}}$  la contrainte maximale admissible correspondante.

Si  $\beta < 1$ , le séchage est considéré comme bon mécaniquement,

Si  $\beta > 1$ , le séchage est considéré comme mauvais.

GUILMAIN (1997), a caractérisé la qualité du bois séché par de défauts mécaniques (fentes, déformations, collapse,...), par la présence des discolorations, et par les critères d'homogénéisation de l'humidité finale dans la pile de bois et au sein de l'épaisseur des planches.

Le CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement) apprécie la qualité du bois par l'homogénéité de l'humidité finale, pour les bois épais par la répartition de l'humidité finale dans l'épaisseur des échantillons, par la proportion de bois qui se sont fendus lors du séchage et par l'importance des déformations (ALEON et al., 1991).

Le CTBA suggère pour obtenir un séchage de qualité les recommandations suivantes :

- Un empilage soigné (épaisseur et humidité uniforme des baguettes, alignement rigoureux)
- Des sciages présentant des caractéristiques similaires (même épaisseur, même essence, même humidité initiale)
- Un chargement de cellule étudié (éviter les espaces vides, bien disposer les piles des sciages, forcer l'air à passer à travers les piles)
- Une formation sérieuse du conducteur (connaissance des principes de base du séchage et de fonctionnement du matériel)
- Choisir d'un programme de séchage adapté à l'essence
- Un suivi journalier du cycle (enregistrement des données de séchage, conduite, contrôle et surveillance)

- Un séchoir bien dimensionné (vitesse d'air, puissance calorifique, dispositifs de régulation) (ALEON et al., 1990).

Dans ce travail, on considère que la contrainte maximale est la cause de l'endommagement des bois, notamment, la fissuration. Notre critère est donc de garantir une faible valeur de cette contrainte pour qu'elle soit toujours inférieure à la contrainte de rupture et proche de la contrainte admissible pour diminuer les risques de fissuration.

### III.2 Modélisation des contraintes internes dans le matériau bois

Au cours de séchage, le matériau est soumis à un gradient d'humidité qui entraîne des variations dimensionnelles importantes. Celles-ci ne pouvant pas s'exprimer librement, le retrait va générer des contraintes internes. La connaissance de ces contraintes devrait permettre de contrôler ce phénomène pour limiter l'apparition de fissurations.

Nous pouvons expliquer l'évolution de la contrainte au cours d'un séchage convectif comme suit : au début du séchage, l'eau migre du centre vers la surface. Cette zone aura toujours une teneur en eau inférieure à celle du centre. Elle va donc se rétracter en premier et, de ce fait, va exercer une compression sur la zone centrale, d'où l'apparition des contraintes. Pour assurer l'équilibre des forces, la partie externe est sous une tension correspondante (*figure III.9, A*). Selon l'intensité de cette tension, des fentes en surface vont apparaître et provoquer une relaxation partielle des contraintes.

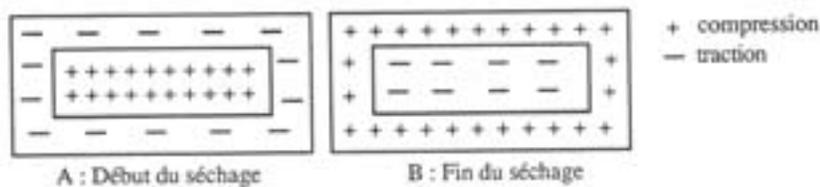


Figure III. 9 : Evolution des contraintes au cours du séchage.

Le phénomène est inverse pour la fin du séchage (*figure III.9, B*) où des fentes internes peuvent apparaître.

### III.2.1 Éléments de littérature

Plusieurs modèles rhéologiques du comportement du bois ont été proposés pendant les dernières années, la plupart de ces modèles sont basés sur un modèle qui tient compte du fait que les propriétés mécaniques changent pendant le séchage.

Martensson et Svensson (1997 et 1999) dans deux publications ont développé un modèle de contrainte / déformation ayant pour but d'enrichir la connaissance du comportement mécanique et d'améliorer la qualité du bois pendant le séchage. Leur travail est effectué sur des sections transversales (radiale et tangentielle) du pin (*Pinus radiata*). Ils ont calculé le tuilage par un calcul géométrique simple et les contraintes internes dans une configuration unidimensionnelle et une configuration bidimensionnelle et ils ont montré que selon le but de l'étude on peut envisager l'utilisation d'un modèle unidimensionnel ou d'un modèle bidimensionnel.

Au cours du séchage, la contrainte dans le bois provoque une déformation mécanique totale composée de quatre déformations secondaires :

1. la déformation mécanique élastique  $\varepsilon^{el}$ .
2. la déformation du retrait  $\varepsilon^r$  qui se produit quand la teneur en eau est inférieure au point de saturation de fibre  $W_{psf}$ ,
3. la déformation du fluage  $\varepsilon^f$  qui exprime le comportement visqueux du bois et qui dépend du temps,
4. la déformation mécanosorptive  $\varepsilon^{ms}$  qui est due à une interaction entre les changements des contraintes et les changements de la teneur en eau.

PANG (2000) a ajouté un terme lié à la température

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^{el} + \varepsilon^r + \varepsilon^f + \varepsilon^{ms} + \varepsilon^T \quad (\text{éq III. 2})$$

selon la loi de Hooke :

$$\sigma = E \varepsilon^{el} \quad (\text{éq III. 3})$$

avec  $\sigma$  est la contrainte et  $E$  est le module d'élasticité

la contrainte peut alors s'écrire :

$$\sigma = E(\varepsilon^{tot} - \varepsilon^r - \varepsilon^f - \varepsilon^{ms} - \varepsilon^T) \quad (\text{éq III. 4})$$

- **Le comportement élastique** pur aux différentes températures et niveaux d'humidités a été étudié par plusieurs scientifiques. Les études prouvent que la rigidité diminue avec la teneur en eau et la température. Pour cela le module élastique est une fonction de ces grandeurs physiques.
- **La vitesse du retrait libre** est définie par plusieurs chercheurs par :

$$\frac{d\varepsilon_{ii}^r}{dt} = \alpha_{ii} \frac{dw}{dt} \quad (\text{éq III. 5})$$

où  $\alpha_{ii}$  est le coefficient du retrait, W est la teneur en eau.

Le coefficient du retrait peut être fonction de la densité et de la température, indépendamment de la teneur en eau.

La figure (III.10) présente une représentation schématique des déformations induites par une variation du taux d'humidité.

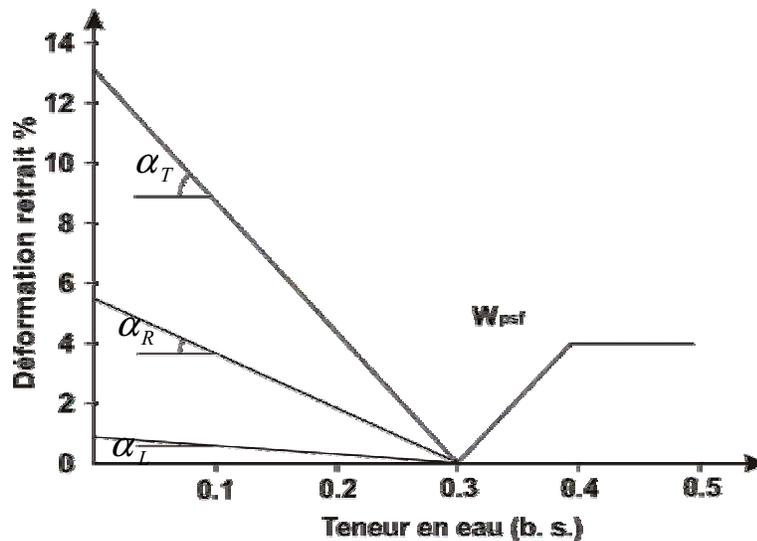


Figure III. 10 : Représentation schématique des déformations induites par une variation du taux d'humidité (GUITARD, 1994).

De cette figure on remarque que le coefficient du retrait  $\alpha_{ii}$  est nul si la teneur en eau dans le bois est supérieure à celle du point de saturation des fibres (30% pour la plupart des essences) et ce coefficient augmente d'une façon différente d'une direction à une autre en conservant toujours l'inégalité  $\alpha_T > \alpha_R \gg \alpha_L$ .

GUITARD (1994) a montré que ces coefficients tendent à augmenter proportionnellement avec la densité du bois. Les valeurs de ces coefficients pour le chêne ayant une masse volumique de  $630 \text{ kg.m}^{-3}$  sont :  $\alpha_T = 0.43 \%$ ,  $\alpha_R = 0.18 \%$ ,  $\alpha_L = 0.028 \%$ .

- **La déformation due au fluage** reflète l'incrément de déformation d'un matériau soumis à une contrainte qui augmente avec le temps écoulé.

La déformation du fluage est décrite par l'équation suivante :

$$\varepsilon^f(t) = \int_0^t J(t-\tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (\text{éq III. 6})$$

avec J la complaisance du fluage. J peut être représenté à l'aide d'un modèle de Maxwell.

$$J_{(T,W,t)} = \sum_{i=1}^n A_i \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (\text{éq III. 7})$$

$A_i$  et  $\tau_i$  sont des paramètres du matériau dépendant de la température.

- **Effet mécano-sorptif**

Dans la publication de RANTA-MAUNUS (1990), nous trouvons une explication concrète de l'effet mécanosorptif : il considère que le fluage normal avec une teneur en eau constante peut être erroné. Une petite variation de l'humidité est responsable d'une majeure partie du fluage du bois. Le fluage provoqué par la variation de l'humidité est connu sous le nom de fluage mécanosorptif.

Plusieurs hypothèses ont été proposées (PITTET, 1995) pour tenter d'expliquer l'effet mécanosorptif à différents niveaux de la structure du bois.

- Certains auteurs considèrent comme importants les mécanismes intervenant au niveau des liaisons secondaires (ponts hydrogènes) des chaînes de cellulose.

- Une hypothèse basée sur l'ultrastructure explique l'effet mécanosorptif en termes d'interactions physiques entre composants amorphes et cristallins de la paroi cellulaire.
- Une autre hypothèse, basée sur la microstructure du bois considère que l'effet mécanosorptif est dû à une rupture momentanée de l'interface entre les couches S1 et S2 lors du passage d'une front d'eau.

Cette déformation dépend linéairement de la contrainte et du changement de la teneur en eau. Cette définition conduit à formuler la relation suivante :

$$\frac{d\epsilon^{ms}}{dt} = m \sigma \frac{dW}{dt} \quad (\text{éq III. 8})$$

avec  $m$  la complaisance du fluage mécanosorptif :  $m^+$  pour le séchage et  $m^-$  pour l'humidification.

(PITTET, 1995) a présenté aussi une solution analytique et numérique pour analyser le changement de distribution de la contrainte résultant de la variation de l'humidité (cycles d'humidifications). L'état de la contrainte change avec les changements de la teneur en eau dans différentes profondeurs de la section transversale. Il a confirmé que la déformation mécanosorptive dépend linéairement du volume du bois qui est affecté par le changement de l'humidité.

RANTA-MAUNUS (1993) présente, dans une autre publication sur le comportement du bois dans la direction transversale du pin et du sapin, la contrainte du séchage au travers d'un modèle viscoélastique prend en compte le retrait et l'effet mécanosorptif.

La plupart des auteurs se basent sur le modèle de RANTA-MAUNUS pour expliquer le fluage mécanosorptif (voir MARTENNSON, SVENSSON, 1997 et 1999, FELIX 1990, et PANG 2000). Ils le considèrent comme une déformation indépendante des autres déformations.

- **Effet de la température**

PANG (2000) considère que le bois se dilate lorsqu'on le chauffe et se contracte lorsqu'on le refroidit. Cependant, un bois vert peut montrer un comportement différent du au changement du point de saturation des fibres avec la température.

$$\frac{d\varepsilon^r}{dt} = -C \frac{dT}{dt} \quad (\text{éq III. 9})$$

avec C une constante déterminée expérimentalement.

Le terme de la température peut être négligeable pendant un séchage sous vide discontinu car les variations de température sont faibles.

### III.2.2 **Choix du modèle**

Nous avons déjà vu que le bois est un matériau fortement anisotrope, ses propriétés mécaniques diffèrent d'une direction à une autre. Un modèle tridimensionnel est nécessaire pour exprimer le comportement du bois dans les trois directions. Mais comme notre but dans ce travail est de décrire la contrainte maximale dans la direction la plus sensible aux fissurations (direction tangentielle) : il apparaît qu'un modèle unidimensionnel est suffisant :

- Le retrait dans la direction tangentielle est très supérieur aux autres directions :

$$\alpha_T = 2.4 \alpha_R, \quad \alpha_T = 15.4 \alpha_L$$

- A l'issue de l'étude SVENSSON et MARTENSSON (1999) : une vérification a été faite entre un modèle unidimensionnel et bidimensionnel de la contrainte dans la direction transversale du bois de pin. Leur résultat montre que le modèle unidimensionnel est capable de décrire le comportement du bois et est suffisant pour calculer la contrainte maximale pendant le séchage. Ce modèle prend en compte les déformations élastiques, visqueuses et mécanosorptives, il est validé par eux-mêmes par des expériences de séchage convectif dont la température varie entre 20 et 80 °C. Le modèle présenté dans l'équation (III.2) a été appliqué pour effectuer des simulations. Les résultats sont utilisés pour analyser les risques de fissures superficielles. Le risque des fissures est estimé sur le fait que la contrainte maximale se trouve près de la surface.

La température était constante (60°C) dans toute la période du séchage (120 heures). Cette période est suffisante pour atteindre la contrainte maximale mais pas l'équilibre. L'humidité relative était de 90% pendant les premières 24 heures puis de 60% jusqu'à la fin.

Le profil de la simulation bidimensionnelle suivant la ligne de symétrie pour différents temps de séchage est donné dans la figure (III.11). On trouve que la contrainte maximale est produite après 29 heures du séchage, le gradient d'humidité (à la surface du bois) le plus important est aussi atteint à ce même instant.

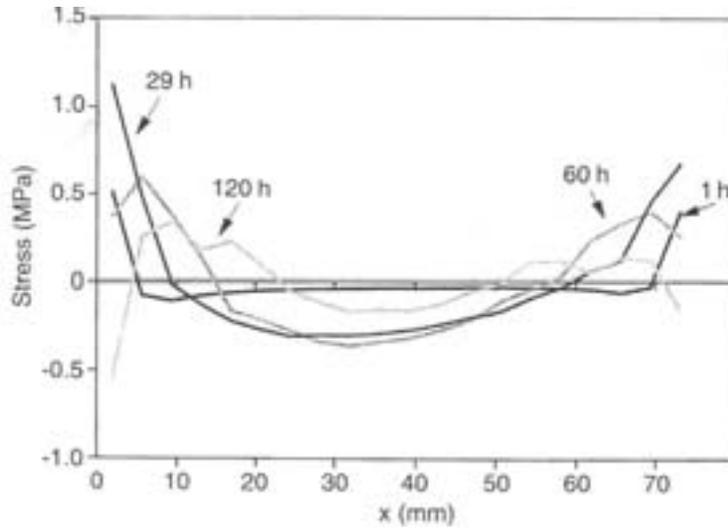


Figure III. 11 : Contrainte tangentielle en fonction de l'espace (calcul en 2D).

La figure (III.12) présente les mêmes composantes de la figure précédente avec une simulation unidirectionnelle.

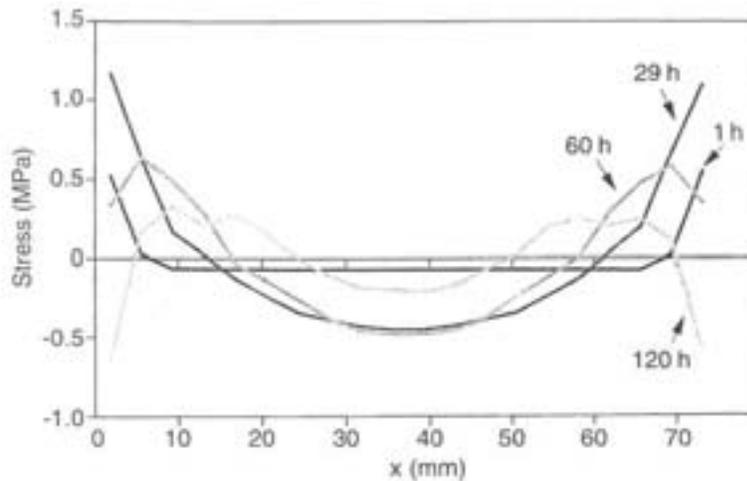


Figure III. 12 : Contrainte tangentielle en fonction de l'espace (calcul en 1D).

La comparaison entre les figures (III.11) et (III.12) montre que les différences dans la contrainte tangentielle maximale entre un calcul unidimensionnel et bidimensionnel sont

faibles. Pour une durée du séchage de 29 heures par exemple, le profil de contrainte est différent pour les deux simulations mais la contrainte maximale observée est toujours de l'ordre 1 Mpa et est observée pour des temps similaires.

Dans la suite de notre travail, nous nous baserons sur un modèle unidimensionnel pour prédire la contrainte tangentielle à la surface du matériau. Par ailleurs, seul le comportement élastique du bois va être conservé dans le modèle rhéologique. Ceci va avoir tendance à majorer la contrainte maximale. Cette erreur sur la valeur de la contrainte maximale n'est pas néfaste puisque l'objectif de l'utilisation du modèle mécanique est de comparer le comportement du bois soumis à différents scénarios de séchage.

L'enjeu de ce travail est de jouer sur les paramètres de séchage pour avoir une contrainte maximale raisonnable inférieure à la contrainte admissible (définie dans la littérature) et loin de la contrainte de la rupture où il y a risque de fissuration.

### III.2.3 Modèle simplifié de la contrainte

Avant de déterminer l'état des contraintes dans la direction tangentielle de bois, un petit changement d'échelle est nécessaire pour comprendre les directions naturelles de l'anisotropie du bois par rapport aux référentiels cylindrique et cartésien.

Une grume est représentée par un tronç idéal continu, homogène et orthotrope cylindrique (GUITARD, 1987 et 1994). Tout point matériel P est repéré dans la grume par les coordonnées cylindriques ( $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ ). Ces coordonnées correspondent aux directions naturelles principales d'anisotropie du bois (*radiale R*, *tangentielle T*, *longitudinale L*). Ces directions sont normées ( $oy$ ,  $ox$ ,  $oz$ ) dans un référentiel cartésien (*figure III.13*).

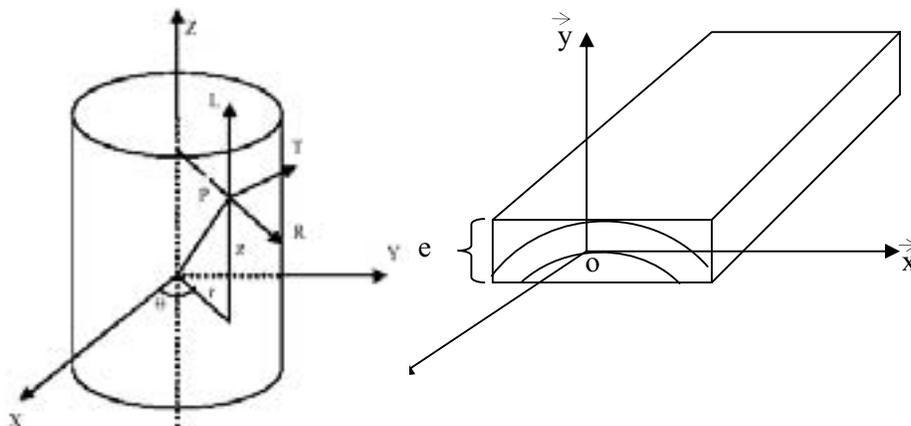


Figure III. 13 : définition géométrique et repérage spatial d'une pièce du bois.

Notre travail consiste à proposer un modèle unidirectionnel capable de déterminer au cours du séchage les champs des contraintes tangentielles du bois  $\sigma_{xx}$  dans l'épaisseur (le chemin le plus court pour le séchage) (figure III.14).

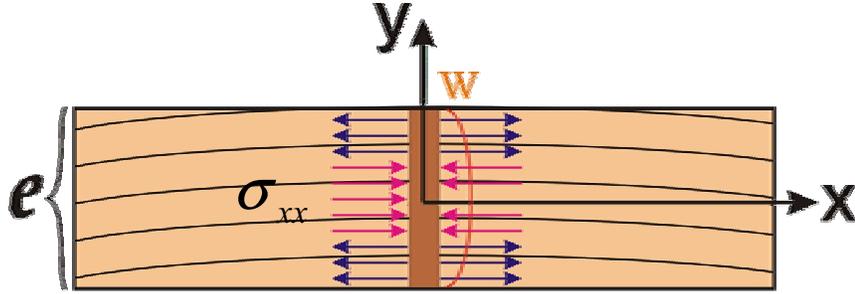


Figure III. 14 : pièce du bois modélisée.

La déformation totale résultante est composée de deux déformations secondaires : déformation élastique  $\varepsilon_{xx}^{el}$  et déformation du retrait  $\varepsilon_{xx}^r$ .

$$\varepsilon_{xx}^{tot}(y) = \varepsilon_{xx}^{el}(y) + \varepsilon_{xx}^r(y) \quad (\text{éq III. 10})$$

selon la loi de Hooke généralisée, on peut définir le comportement élastique du bois par :

$$\sigma_{xx} = E_{xx} \varepsilon_{xx}^{el} \quad (\text{éq III. 11})$$

le retrait est donné par cette relation :

$$\varepsilon_{xx}^r(y) = \alpha_{xx} (W_{psf} - W_{(y,t)}) \quad (\text{éq III. 12})$$

on remplace (III.11) et (III.12) dans (III.10), on obtient la déformation totale :

$$\varepsilon_{xx}^{tot}(y) = \frac{\sigma_{xx}(y,t)}{E_{xx}} + \alpha_{xx} (W_{psf} - W_{(y,t)}) \quad (\text{éq III. 13})$$

De cette relation on peut exprimer la contrainte à la surface du bois suivant la direction tangentielle (x) en fonction de y par :

$$\sigma_{xx(y,t)} = E_{xx} \left[ \frac{\Delta l}{l} - \alpha_{xx} (W_{psf} - W_{(y,t)}) \right] \quad (\text{éq III. 14})$$

Pour calculer les champs de contraintes, il est nécessaire de déterminer la déformation totale.

à l'équilibre, la somme de la force est nulle alors :

$$\int_{-e/2}^{+e/2} \sigma_{xx} L dy = 0 \quad (\text{éq III. 15})$$

$$\int_{-e/2}^{+e/2} E_{xx} \left[ \frac{\Delta l}{l} - \alpha_{xx} (W_{psf} - W_{(y,t)}) \right] dy = 0 \quad (\text{éq III. 16})$$

$$L \int_{-e/2}^{+e/2} E_{xx} \frac{\Delta l}{l} dy = L \int_{-e/2}^{+e/2} E_{xx} \alpha_{xx} (W_{psf} - W_{(y,t)}) dy \quad (\text{éq III. 17})$$

la variation dimensionnelle  $\Delta l / l$  s'écrit alors comme :

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\int_{-e/2}^{+e/2} E_{xx} \alpha_{xx} (W_{psf} - W_{(y,t)}) dy}{E_{xx}} \quad (\text{éq III. 18})$$

La détermination de  $\Delta l / l$  permet de calculer la contrainte en fonction du temps et de l'épaisseur de la planche pour différentes conditions de séchage.

### III.2.4 Mesure le Module d'Young $E_T$

#### III.2.4.1 Compression perpendiculaire aux fibres

L'obtention du module d'Young est réalisée grâce à des expériences de compression dans la direction tangentielle aux fibres

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine de traction / compression électromécanique. Cette machine est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité est fixée à une traverse mobile (*figure III. 15*).

Le principe de cette machine consiste à soumettre une éprouvette du matériau à une compression ou traction et à mesurer la variation de la longueur ( $\Delta L$ ) correspondant à une force F appliquée.

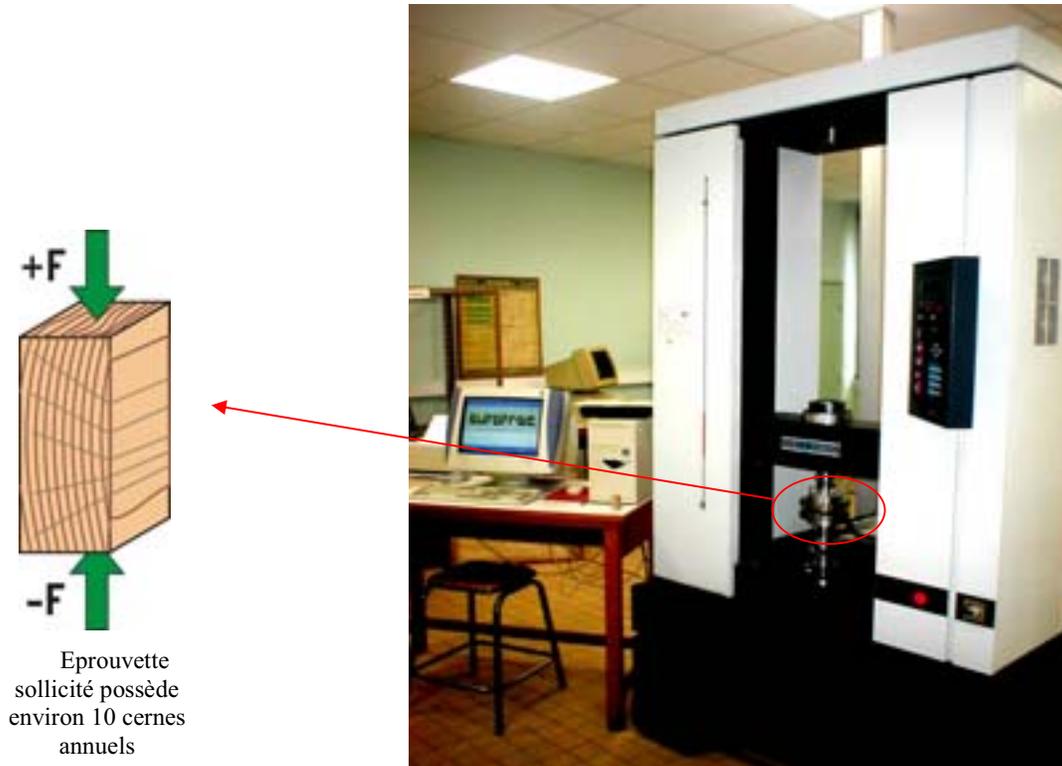


Figure III. 15 : Machine de Compression/Traction.

Les éprouvettes doivent être de droit fil et sans défauts, posséder des faces parfaitement perpendiculaires entre elles, leurs sections est de 20 x 20 mm et leur longueur est de 60 mm soit 3 fois le côté de la section. MARTIN (1983) avait, à la suite de différentes expériences, conclu que le meilleur rapport  $L/a$  devait être compris entre 3 et 4. En dessous la friction des faces sur les plateaux entrave les déformations latérales, au-dessus il n'y a plus compression pure mais flambage.

Les éprouvettes testées ont chacune entre 9 et 10 cernes annuels. Tous les essais ont été effectués à température ambiante et à différentes teneurs en eau.

### III.2.4.2 Résultats

La figure (III.16) montre le comportement du matériau au cours d'un essai de compression à la teneur en eau  $W=0.12$  (base sèche) et à la température ambiante.

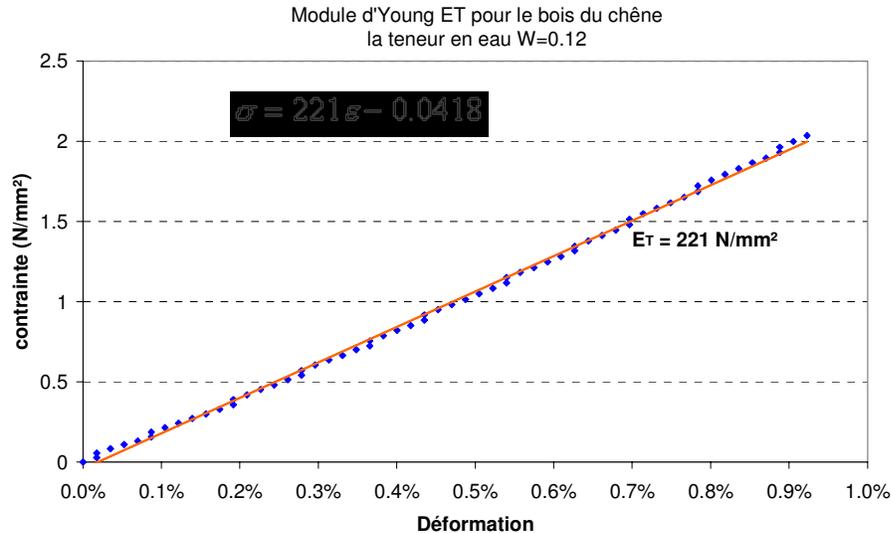


Figure III. 16 : Module d'Young déterminé à la direction tangentielle  $E_T$  pour le bois du chêne à la teneur en eau 0.12.

La corrélation entre la contrainte et la déformation détermine la valeur du Module d'élasticité  $E_T = 221 \text{ N/mm}^2$ . Cette valeur n'est pas tout à fait compatible avec les valeurs trouvées dans la littérature qui sont comprises entre 614 et 1320  $\text{N/mm}^2$  (GUITARD, 1987), cette différence peut être due à l'espèce du chêne utilisée.

Cette grande diversité dans les différents résultats, est liée au grand nombre de paramètres qui influencent l'anisotropie mécanique du bois et sa mesure.

Ces différents paramètres peuvent être (OUDJEHANE, 1992), des paramètres physiques (taux d'humidité, température, densité, histoire de déformations, mode de rupture...), des paramètres de structure (orientation et largeur des cernes, texture, composition chimique des constituants...) ou des paramètres « d'histoire naturelle » (âge et provenance de l'arbre, conditions de croissance, débit et découpe de l'arbre...). Alors on peut noter que plus un bois est dense, plus il contient de matière ligneuse dans un volume donné, et plus ses caractéristiques élastiques sont fortes.

Les résultats obtenus de l'application d'essai de compression sur deux échantillons à la température ambiante, à différente teneur en eau (de  $W = 0.1$  à  $W = 1$ ) sont présentés dans la figure (III.17). Cette figure montre que la rigidité du bois  $E_T$  est quasiment constante entre 0.4 (le point de saturation des fibres) et 1, en dessous de ce point le bois se rigidifie avec le séchage.

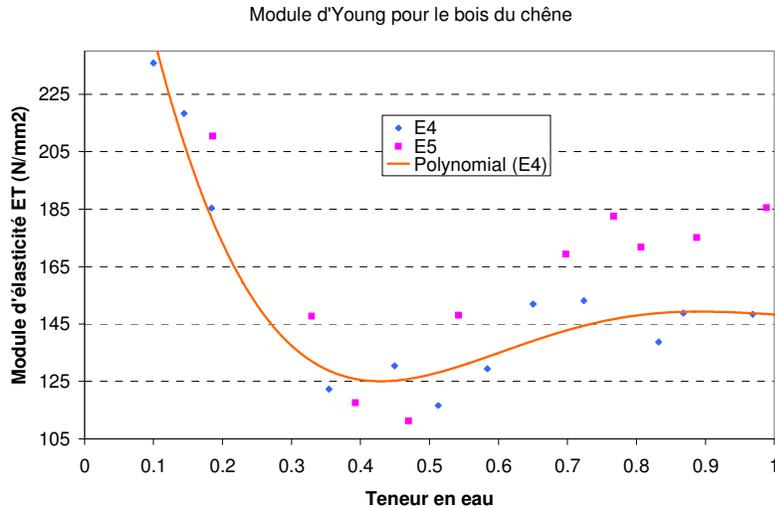


Figure III. 17 : Évolution de  $E_T$  en fonction de la teneur en eau

Le chapitre suivant présentera des résultats des simulations qui prennent en compte le modèle de contraintes choisi ainsi que le module d'élasticité présenté en fonction de la teneur en eau.

### III.3 Conclusion

Nous avons évoqué les différents types des défauts dans le bois ainsi que la notion qualité mécanique : Les défauts naturels et ceux liés au mode de débit deviennent un inconvénient après la transformation. Ces types de déformations ne sont pas contrôlables par les conditions de séchage appliquées. En revanche, on peut maîtriser les défauts liés au séchage par l'amélioration du programme de séchage suivi. Pour cela, il faut bien savoir comment se produit l'endommagement et à quel moment ?

Nous avons vu que l'influence des retraits est relative au mode de débit de la pièce du bois. Il est très important dans la direction transversale (surtout tangentielle). Cela entraîne des contraintes très importantes dans cette direction. Les résultats de ces contraintes à l'échelle macroscopique se manifestent par des fissures et des défauts mécaniques ou esthétiques qui altèrent la qualité du bois.

Nous avons choisi comme critère de qualité l'apparition ou non des fentes superficielles. Une contrainte maximale inférieure à la contrainte de rupture et proche de la contrainte admissible traduira à un séchage de qualité sans fissures.

Nous nous basons sur un modèle unidimensionnel pour prédire la contrainte tangentielle à la surface du matériau. Par ailleurs seul le comportement élastique du bois est conservé. L'objet du prochain chapitre est de définir des conditions de séchage optimales tant au niveau des temps de séchage qu'au niveau des contraintes maximales.

# CHAPITRE IV

## OPTIMISATION DES CONDITIONS OPÉRATOIRES

---

Les temps importants nécessaires au séchage convectif du bois du chêne ainsi que la particularité de cette essence qui la rend difficile à sécher et l'exigence du marché sur la qualité mécanique conduisent à envisager l'utilisation d'une technique performante telle que le séchage sous vide. Mais l'utilisation de cette technique exige une véritable connaissance des bonnes conditions du séchage pour assurer un séchage à la fois rapide et de bonne qualité mécanique. Ce chapitre a pour objectif de définir, à l'aide des modèles de séchage et de comportement mécanique mis en place dans les chapitres précédents, des conditions de séchage optimales en terme de durée et de contrainte maximale. Une étude expérimentale servira de support de validation de ces travaux.

<b>IV</b>	<b>OPTIMISATION DES CONDITIONS OPERATOIRES .....</b>	<b>81</b>
<b>IV.1</b>	<b>Définitions des conditions optimales .....</b>	<b>81</b>
IV.1.1	Première approche : .....	81
IV.1.2	Sensibilité à la pression et à la température .....	85
IV.1.3	Recherche des conditions optimales .....	89
<b>IV.2</b>	<b>Etude expérimentale du séchage sous vide discontinu .....</b>	<b>91</b>
IV.2.1	Description du séchoir «MASPELL» .....	91
IV.2.2	Mesures et acquisitions .....	93
IV.2.3	Conditions des essais .....	96
<b>IV.3</b>	<b>Résultats expérimentaux .....</b>	<b>97</b>
IV.3.1	Cinétiques de séchage .....	97
IV.3.2	Contraintes maximales .....	100
IV.3.3	Comportement en température .....	101
IV.3.4	Homogénéité .....	102
IV.3.5	Défauts observés .....	105
<b>IV.4</b>	<b>Validation de la modélisation .....</b>	<b>113</b>
IV.4.1	Comparaison modèle / expérience .....	113
IV.4.2	Conditions numériques .....	116
<b>IV.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>117</b>



## IV Optimisation des conditions opératoires

### IV.1 Définitions des conditions optimales

Le modèle mécanique établi au chapitre (III), complété avec la détermination expérimentale du module d'élasticité dans la direction tangentielle en fonction de la teneur en eau, permet de simuler l'évolution des contraintes mécaniques au cours du séchage. Si ces contraintes dépassent des certaines valeurs admissibles, nous supposons que les conditions de séchage proposées peuvent conduire à la fissuration du matériau. L'enjeu de cette partie est de trouver les meilleures conditions de séchage c'est-à-dire celle conduisant à temps de séchage le plus court et admettant une contrainte autorisée.

#### IV.1.1 Première approche :

Dans une première approche, une étude de sensibilité du modèle aux paramètres du procédé est conduite. Nous adoptons comme condition de séchage de référence celle préconisée par le constructeur du séchoir. Chacun des paramètres du séchoir a été successivement testé autour de cette référence dont les paramètres sont les suivants :

- La pression de l'enceinte :  $P = 0.14$  bar,
- La régulation de la pression :  $\Delta P = 4800$  Pa,
- La température de chauffe :  $T_{ch} = 65$  °C,
- Le temps de chauffage :  $t_{ch} = 45$  min,
- Le temps de vide :  $t_{vide} = 60$  min.
- Le temps de préchauffage  $t_{préch}$  est fixé par 6 heures de chauffage pendant lesquelles une montée douce de la température jusqu'à la température souhaitée.
- Epaisseur du bois : 27 mm.
- Longueur des planches est de l'ordre de 90 cm.

Les paramètres liés au séchoir appliqués ainsi que les coefficients d'échanges sont constants pour toute l'étude de sensibilité, ces coefficients sont déterminés préalablement par BAIXERAS (1995). Le tableau (IV.1) montre leurs valeurs :

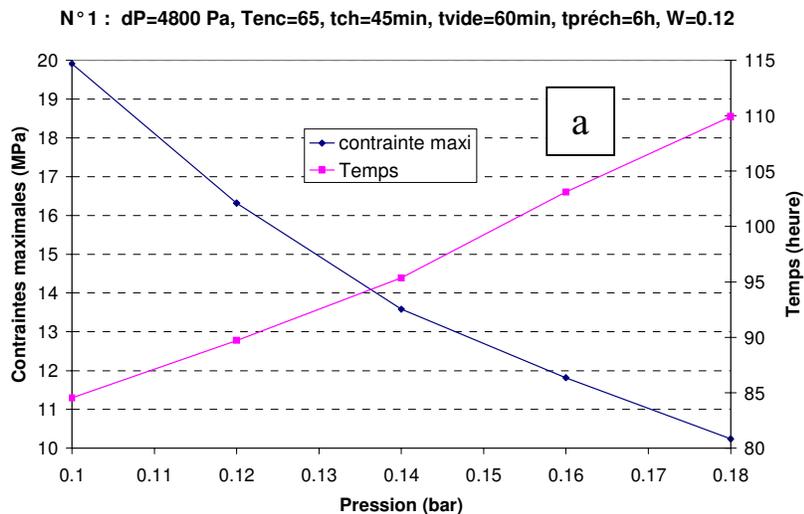
Caractéristiques du séchage sous vide discontinu	
ht0 = 30	Coefficient d'échange entre l'air et le bois
H <sub>t paroi</sub> = 55	Coefficient d'échange entre l'air et la paroi
HR <sub>atm</sub> = 60 %	Humidité relative de l'extérieur
T <sub>atm</sub> = 25 °C	Température de l'extérieur
XQ = 75 m <sup>3</sup> /h	Débit de la pompe à vide
S <sub>paroi</sub> = 11 m <sup>2</sup>	Surface de la paroi chauffante
S <sub>cond</sub> = 4 m <sup>2</sup>	Surface équivalente de la condensation

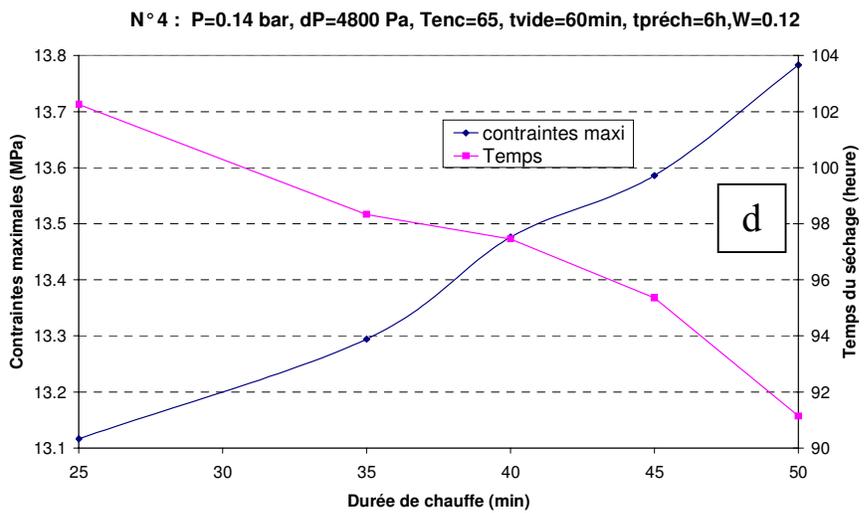
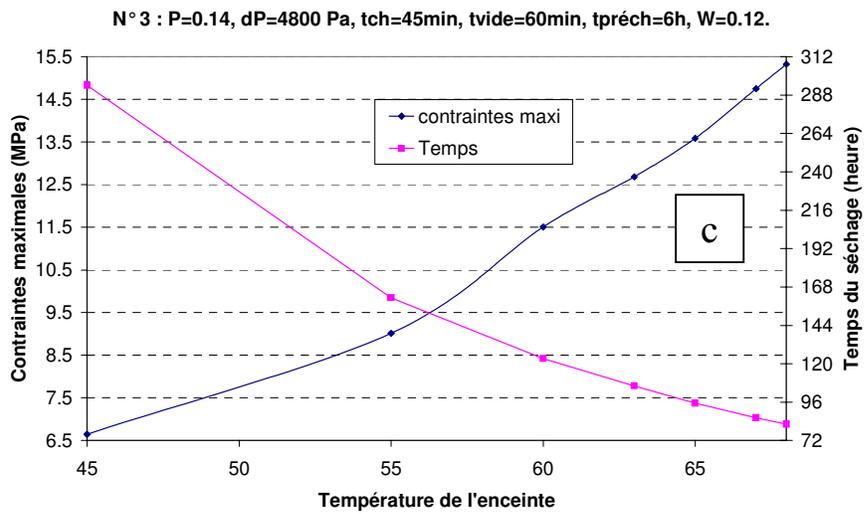
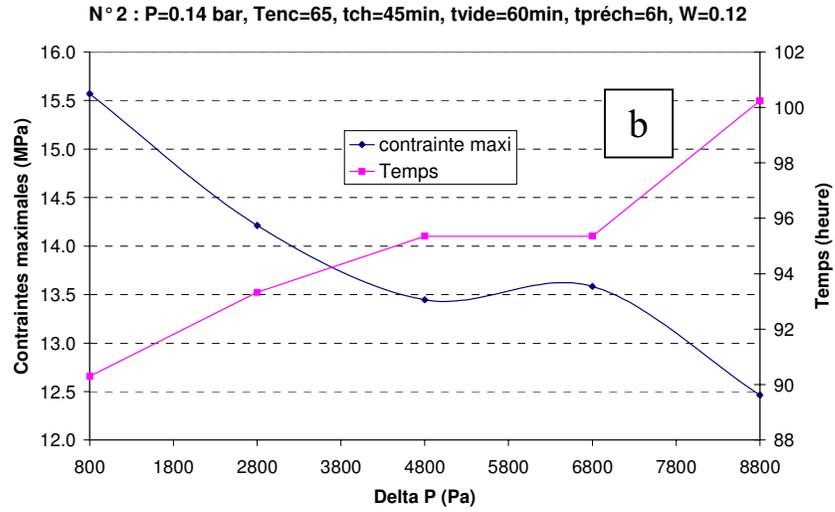
Tableau IV. 1 : Caractéristiques du séchage sous vide discontinu utilisées dans les simulations

Le tableau (IV.2) montre les conditions de séchage des simulations. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures (IV.1, a, b, c, d et e). Chaque figure représente l'évolution des contraintes maximales et du temps global du séchage en fonction du paramètre considéré. L'arrêt des simulations est effectué quand la teneur en eau moyenne du bois atteint 0.12.

P (bar)	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	Pression de l'enceinte		
ΔP (Pa)	800	2800	4800	6800	8800	Régulation de la pression		
T <sub>ch</sub> (°C)	45	55	60	63	65	67	68	Température de chauffage
t <sub>ch</sub> (min)	25	35	40	45	50	55	Temps de chauffe	
t <sub>vide</sub> (min)	40	50	60	70	80	Temps de vide		

Tableau IV. 2 : Paramètres d'un séchage sous vide discontinu.





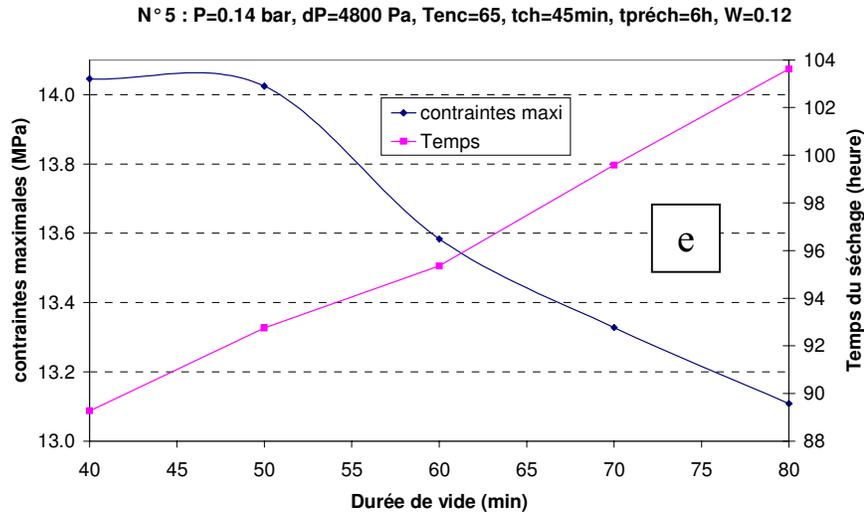


Figure IV. 1 : Les effets des paramètres du séchoir sur les temps du séchage et les contraintes maximales.

La figure (IV.1, a) représente l'effet de la pression sur le temps de séchage et les contraintes maximales. On remarque que la contrainte augmente considérablement avec la diminution de la pression.

L'effet de la régulation de la pression est montré sur la figure (IV.1, b). On constate qu'une valeur faible de la marge de régulation entraîne une augmentation forte des contraintes maximales. Au delà d'une certaine valeur (4800 Pa) cet effet est moins significatif. En effet une valeur faible de la marge de régulation entraîne des transitions entre le régime passif et le régime actif très rapide. Le bois est alors souvent sollicité. Inversement, une longue phase de régulation entraînerait une perte du temps.

On s'aperçoit sur la figure (IV.1, c) que la température de l'enceinte est un facteur important et déterminant où la contrainte maximale croît considérablement avec une petite augmentation de la température, en revanche, le temps diminue fortement

Sur la figure (IV.1, d) on voit que l'effet de la durée de chauffe est moins important sur la contrainte maximale et le temps de séchage : cette durée doit être suffisante pour fournir assez d'énergie au matériau et pour garantir l'homogénéisation de la température de l'enceinte en fin de phase de chauffe. Il apparaît que cette durée doit être comprise entre 35 et 45 minutes pour un bois d'épaisseur 27 mm.

Ainsi sur la figure (IV.1, e), la durée de vide n'est pas très significative par rapport à la contrainte maximale et au temps de séchage. Cette durée doit être grande par rapport à la durée nécessaire pour passer de la pression atmosphérique à la pression désirée, et supérieure à la durée de la phase de chauffe parce que l'opération du séchage s'effectue principalement

pendant le régime actif d'une phase de vide. Par contre, une durée très importante va amener un refroidissement trop important au bois et donc à une perte du rendement de l'installation. Nous adapterons d'une durée autour de 60 minutes pour un bois d'épaisseur 27 mm.

En conclusion, sur l'ensemble des figures présentées, nous avons remarqué que les valeurs des contraintes maximales sont très élevées entre 8.5 MPa et 13 MPa. Ces valeurs ont largement dépassé les contraintes admissibles pour le bois du chêne qui sont au voisinage de 4 MPa si on adopte un coefficient de sécurité de 5 sachant que la contrainte à la rupture est voisine de 20 MPa. Nous avons par ailleurs observé que le temps de séchage pour avoir un bois final à 0.12 d'humidité est très court (environ 4 jours) pour les conditions testées dans cette étude de sensibilité.

En conséquence, il apparaît intéressant de chercher des conditions de séchage permettant de diminuer les niveaux de contraintes même si le temps de séchage est augmenté. Nous avons vu au préalable que les deux paramètres prépondérants sur l'évolution des contraintes sont la température de séchage et la pression de l'enceinte. Dans ce qui suit seuls ces deux paramètres sont modifiés.

#### **IV.1.2 Sensibilité à la pression et à la température**

Les simulations effectuées dans le paragraphe précédent permettent de fixer quelques paramètres du séchoir à des valeurs qui paraissent optimales. Nous fixons la durée de la phase de chauffe à 40 minutes, la durée de la phase de vide à 60 minutes et la régulation à 6000 Pa.

Nous faisons alors varier la température entre 45 et 65 °C et la pression de l'enceinte entre 0.16 et 0.3 bar.

Par ailleurs l'effet du taux de remplissage du séchoir a été exploré au travers de deux valeurs différentes (0.14 et 0.2). Le taux de remplissage est un paramètre exprimé par la relation suivante :

$$\tau = \frac{V_{bois}}{V_{enc}} \quad (\text{éq IV 1})$$

$V_{enc}$  et  $V_{bois}$  représente respectivement le volume de l'enceinte et du bois

Le tableau (IV. 3) montre les résultats obtenus pour un taux de remplissage de 0.14. On peut immédiatement éliminer beaucoup des conditions qui ne sont pas compatibles avec notre objectif (conditions 1, 2, 3, 4, a, 5, 6, 7, 8, b, 9, 10, 12, c, 13, 14, 15, d, e, f, et g). Ces

conditions donnent des valeurs dépassant soit le temps de séchage prévu, soit le seuil de la contrainte admissible.

La comparaison entre les cas 4, 8, 12, 16 et h montre une réduction de la contrainte maximale de 8.4 à 5.9 MPa pour une augmentation de la pression de 0.16 à 0.3 et pour la même température (60°C). Pour ces conditions, le temps du séchage varie de 9 à 12 jours pour obtenir la teneur en eau désirée 0.12. Cette même remarque peut être effectuée pour les autres niveaux de température.

Condition	T <sub>ch</sub> (°C)	P (bar)	Durée (J)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$t_{sig \max}$ (h)	$W_{sig \max}$
1	45	0.16	19.3	5.5	269	0.22
2	50	0.16	14.5	6.4	199	0.21
3	55	0.16	11.1	7.3	153	0.20
4	60	0.16	8.7	8.4	114	0.20
a	65	0.16	6.9	9.8	91	0.18
5	45	0.18	20.3	5.1	277	0.23
6	50	0.18	15.2	6	207	0.22
7	55	0.18	11.8	6.8	159	0.21
8	60	0.18	9.3	7.7	126	0.20
b	65	0.18	7.3	9	98	0.19
9	45	0.2	21.2	4.9	292	0.23
10	50	0.2	16	5.7	222	0.22
11	55	0.2	12.4	6.4	171	0.21
12	60	0.2	9.9	7.3	134	0.21
c	65	0.2	7.8	8.3	106	0.20
13	45	0.25	23.3	4.4	314	0.24
14	50	0.25	17.8	5.1	246	0.23
15	55	0.25	13.8	5.7	189	0.23
16	60	0.25	11	6.4	149	0.22
d	65	0.25	8.8	7.2	123	0.21
e	45	0.3	25.0	4	332	0.25
f	50	0.3	19.0	4.7	257	0.24
g	55	0.3	14.9	5.2	202	0.23
h	60	0.3	12.0	5.9	164	0.23
i	65	0.3	9.6	6.4	136	0.21

Tableau IV. 3 : Résultats des simulations avec taux de remplissage 0.14.

Nous avons par ailleurs reporté sur ce tableau le temps pour lequel la contrainte maximale est atteinte. On remarque pour la même température (60 °C par exemple), un décalage du temps de la contrainte maximale de 114 à 164 heure cela signifie qu'avec l'augmentation de la pression de l'enceinte, on peut retarder l'apparition de la contrainte maximale. On peut imaginer que ce retard est bénéfique pour éviter le collapse qui se produit

au début du séchage quand le bois est très humide. Le même phénomène est aussi remarqué quand la température du séchage est diminuée.

La dernière colonne du tableau (IV.3) représente la teneur en eau à la surface du bois au moment où apparaît la contrainte maximale. On voit évidemment (ceci est lié au modèle adopté) que toutes les contraintes ont été produites au dessous du point de saturation des fibres et que les valeurs de la teneur en eau en surface à la contrainte maximale ont tendance à diminuer avec l'augmentation de la température à pression constante ou avec la diminution de la pression à température constante.

Le tableau (IV.4) montre les résultats des simulations pour un taux de remplissage de 0.2.

Condition	T <sub>ch</sub> (°C)	P (bar)	Durée (J)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	t <sub>sig max</sub> (h)	W <sub>sig max</sub>
1	45	0.16	23.6	4.6	332	0.23
2	50	0.16	17.7	5.3	245	0.22
3	55	0.16	13.5	6	187	0.21
4	60	0.16	10.4	7	141	0.21
a	65	0.16	8	8.4	106	0.2
5	45	0.18	25.1	4.3	350	0.24
6	50	0.18	18.9	4.9	265	0.23
7	55	0.18	14.6	5.6	202	0.22
8	60	0.18	11.2	6.6	156	0.21
b	65	0.18	8.6	7.6	116	0.21
9	45	0.2	26.6	4.1	371	0.24
10	50	0.2	20	4.6	283	0.23
11	55	0.2	15.5	5.2	217	0.22
12	60	0.2	12.0	6.1	171	0.21
c	65	0.2	9.3	6.9	131	0.2
13	45	0.25	29.1	3.6	399	0.25
14	50	0.25	22.1	4.1	307	0.24
15	55	0.25	17.4	4.6	244	0.23
16	60	0.25	13.6	5.3	192	0.23
d	65	0.25	10.7	5.9	152	0.22
e	45	0.3	32.1	3.3	431	0.26
f	50	0.3	24	3.8	320	0.26
g	55	0.3	18.9	4.2	261	0.24
h	60	0.3	15	4.7	210	0.23
i	65	0.3	11.9	5.2	171	0.22

Tableau IV. 4 : Résultats des simulations avec taux de remplissage 0.2.

La comparaison entre les tableaux (IV.3) et (IV.4) montre une diminution considérable des contraintes maximales dans les cas où le taux de remplissage est égale à 0.2. La diminution observée (environ 1 MPa) est accompagnée d'une augmentation du temps de séchage qui peut être acceptable pour les conditions qui possèdent des températures élevées (60 et 65 °C). Pour une condition donnée, on observe aussi un retard du temps pour arriver à la contrainte maximale. Les autres remarques citées auparavant reste inchangées pour cette série de simulations.

Afin de mieux visualiser les résultats de ces séries de simulations, nous présentons dans les figures (IV.2) et (IV.3) l'effet de la pression et de la température sur la contrainte maximale et la durée du séchage pour les taux de remplissages 0.14 et 0.2.

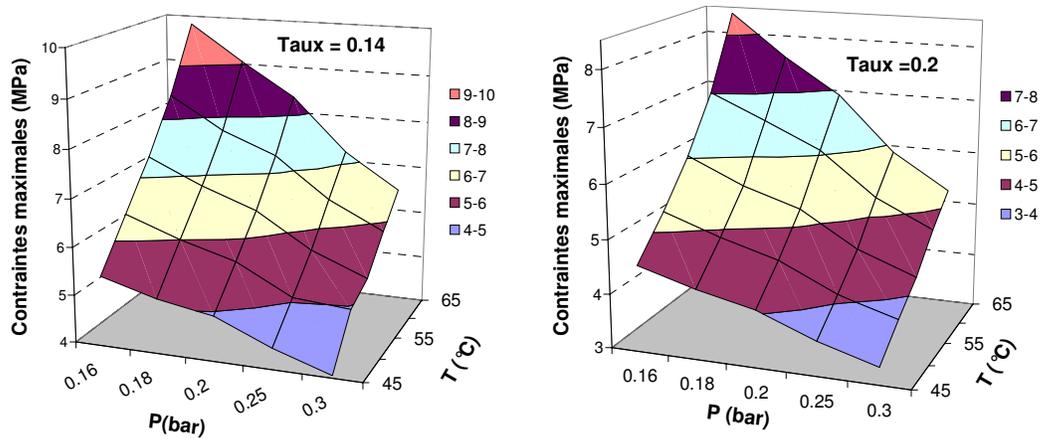


Figure IV. 2 : Les effets de P et T sur les contraintes maximales pour des taux de remplissage 0.14 et 0.2.

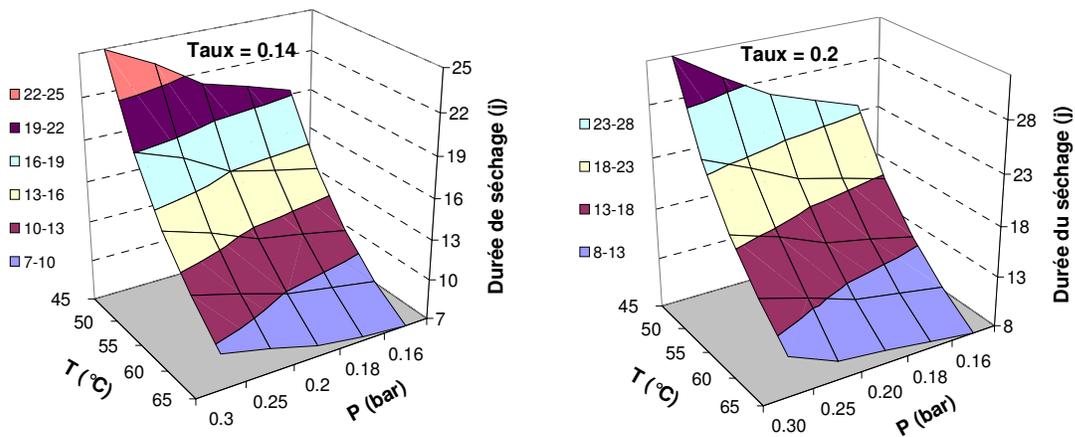


Figure IV. 3 : Les effets de P et T sur la durée totale du séchage pour des taux de remplissage 0.14 et 0.2.

Sur ces figures on remarque que les contraintes maximales augmentent avec l'augmentation de la température ou avec la diminution de la pression. Par contre, la durée du séchage diminue avec l'augmentation de la température ou avec la diminution de la pression

Sur la figure (IV.2), pour les deux taux de remplissage, on remarque que l'effet de la température sur les contraintes maximales est un peu plus important que l'effet de la pression.

La comparaison entre les contraintes maximales dans les deux configurations montre que le taux de remplissage joue un rôle important sur la diminution des contraintes maximales. À titre d'exemple, grâce à l'augmentation du taux de remplissage de 0.14 à 0.2, les contraintes maximales ont diminué de 6.4 à 5.3 MPa pour la condition 16 (tab. IV.2 et IV.3)

La figure (IV.3) montre, pour les deux taux de remplissages, que l'effet de la température sur la durée totale du séchage est beaucoup plus important que l'effet de la pression surtout pour les températures douces (45, 50 et 55 °C). Par exemple, pour une pression constante, le passage de la température 45 °C à 50 °C fait diminuer d'environ 6 jours le temps de séchage et au même temps fait augmenter d'environ 1 Mpa les contraintes maximales.

Nous pouvons résumer ce paragraphe par quelques points importants :

- L'effet de l'augmentation de la température sur les contraintes maximales est un peu plus important que l'effet de la diminution de pression.
- L'effet de la température sur la durée totale du séchage est beaucoup plus important que l'effet de la pression.
- La grande quantité du bois introduite dans le séchoir est un facteur de diminution des contraintes au sein du matériau grâce à l'ambiance humide produite par la vapeur d'eau évacuée du bois.

### **IV.1.3 Recherche des conditions optimales**

Au vu des résultats obtenus il apparaît clairement qu'il est préférable d'avoir un taux de remplissage élevé, une pression élevée (0.25 à 0.3 bar) et une température d'enceinte au voisinage de 60 °C. Par ailleurs nous avons vu que la température joue un rôle majeur, il serait alors intéressant de voir l'effet de la variation de cette température au cours du séchage sur les paramètres contrainte et temps.

Nous allons maintenant voir l'effet de la modulation de la température au cours d'une opération de séchage. Le tableau (IV.5) représente les variations de température adoptées pour ce test.

	<b>Préchauffage De 25 à 45 °C</b>	<b>T<sub>ch</sub> = 45 °C</b>	<b>T<sub>ch</sub> = 50 °C</b>	<b>T<sub>ch</sub> = 55 °C</b>	<b>T<sub>ch</sub> = 60 °C ou 65 °C</b>
<b>Condition X</b>	0 < t < 4 heures	4 < t < 5 heures	5 < t < 6 heures	-----	t > 6 heures
<b>Condition X_1</b>	0 < t < 6 heures	6 < t < 100 heures	100 < t < 150 heures	150 < t < 200 heures	t > 200 heures
<b>Condition X_2</b>	0 < t < 5 heures	5 < t < 6 heures	-----	6 < t < 24 heures	t > 24 heures
<b>Condition X_3</b>	0 < t < 1 heures	1 < t < 2 heures	Augmentation progressive de T pendant 4 heures		t > 6 heures

Tableau IV. 5 : programme du temps appliqué dans les nouvelles simulations.

Trois conditions de séchage sont retenues pour observer les effets de la modulation de température (tab. IV.6). Ces conditions sont issues des simulations précédentes et présentant un bon compromis contrainte / temps.

Condition	Température (°C)	Pression (bar)	Taux de remplissage
I	65	0.3	0.14
II	65	0.25	0.2
III	60	0.25	0.2

Tableau IV. 6 : Conditions choisies pour affiner les simulations.

Les tableaux (IV.7) résument les résultats des simulations effectuées en respectant les programmes des températures définies.

<b>Tableau a</b>		
<b>T<sub>ch</sub> = 65 °C, P = 0.3 bar, <math>\tau</math> = 0.14</b>		
<b>Conditions</b>	<b>Durée (J)</b>	<b><math>\sigma_{\max}</math> (MPa)</b>
Condition I	9.6	6.4
Condition I_1	13.8	6.5
Condition I_2	9.9	6.5
<b>Condition I_3</b>	<b>9.5</b>	<b>6.5</b>

<b>Tableau b</b>		
<b><math>T_{ch} = 65\text{ °C}, P = 0.25\text{ bar}, \tau = 0.2</math></b>		
<b>Conditions</b>	<b>Durée (J)</b>	<b><math>\sigma_{max}</math> (MPa)</b>
Condition II	10.7	5.9
Condition II_1	15.1	5.9
Condition II_2	11.1	5.9
<b>Condition II_3</b>	<b>10.6</b>	<b>5.9</b>

<b>Tableau c</b>		
<b><math>T_{ch} = 60\text{ °C}, P = 0.25\text{ bar}, \tau = 0.2</math></b>		
<b>Conditions</b>	<b>Durée (J)</b>	<b><math>\sigma_{max}</math> (MPa)</b>
Condition III	13.6	5.3
Condition III_1	17	5.2
Condition III_2	13.8	5.3
<b>Condition III_3</b>	<b>13.5</b>	<b>5.2</b>

Tableau IV. 7 : Résultats d'une simulation plus fine dépend du programme de température de l'enceinte.

Nous remarquons des tableaux a, b et c que les différences entre les contraintes maximales, dues au changement du programme de température, ne sont pas significatives, alors que ces différences deviennent remarquables pour la durée du séchage surtout entre les conditions X\_1 et X\_3. Nous pouvons résumer de ces tableaux que le meilleur programme de température suivi est celui des conditions X\_3. Ce programme consiste à augmenter la température progressivement pendant 6 heures de préchauffage jusqu'à atteindre la consigne souhaitée au bout de cette période. Notons par ailleurs que ce mode de pilotage de la température est proche de celui préconisé par le constructeur du séchoir.

## IV.2 Etude expérimentale du séchage sous vide discontinu

### IV.2.1 Description du séchoir «MASPELL»

Les expériences du séchage sont effectuées sur un séchoir de l'échelle semi-industrielle à vide discontinu dont la réalisation par la société Maspell (Italie) en collaboration avec l'EDF. La capacité utile de ce séchoir est de  $1\text{ m}^3$ .

La figure (IV.4) nous permet de dégager les fonctions principales des différentes parties du séchoir :

- La paroi : est en tôle en acier résistant à la dépression et de forme cylindrique à axe horizontal, elle entoure la chambre de séchage.
- La paroi métallique 3 extérieure à la paroi 5 forme avec celle-ci un espace 4 à l'intérieur duquel de l'eau chaude circule, alimentée par un collecteur d'arrivée 6 et recueillie dans un collecteur de retour 9.

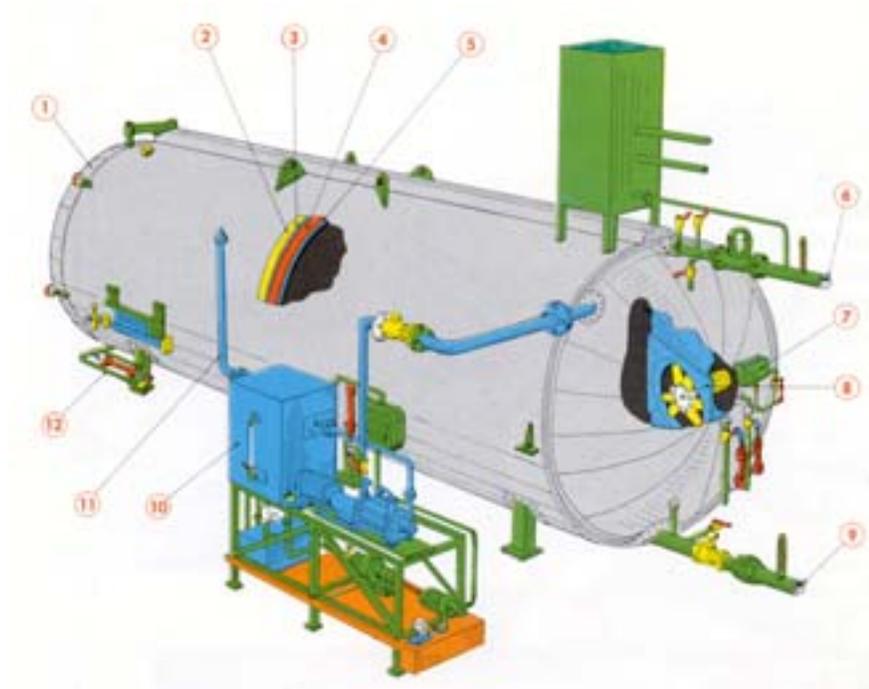


Figure IV. 4 : Description de séchoir MASPELL.

- La paroi 3 est recouverte d'un isolant thermique 2 de laine de verre de façon à éviter les pertes d'énergie vers l'extérieur et augmenter le rendement énergétique de l'opération de chauffage de l'enceinte qui se fait par l'intermédiaire de la paroi.
- Une de deux extrémités de la paroi principale est fermée hermétiquement par un fond courbe, soudé périphériquement à la paroi principale. L'autre extrémité de la paroi se forme par une porte étanche 1, également de forme courbe.

- Ventilateur : à l'intérieur de l'enceinte, au fond, est disposé un ventilateur 8. Son axe est l'axe longitudinal de l'autoclave. L'air pulsé par le ventilateur, transmet la chaleur de la paroi chaude au bois que l'on veut chauffer.
- Pompe à vide 10 : C'est une pompe à anneau liquide que, pour des raisons d'environnement, nous ferons fonctionner à l'eau. Elle permet, via la cheminée d'extraction 11, l'évacuation de la vapeur et la mise sous vide de l'enceinte.
- Evacuation des condensats : Il existe lors du séchage des parties froides qui provoquent la condensation de la vapeur. Il est alors indispensable d'éliminer cette eau de condensation qui pourrait stagner dans le séchoir et compromettre le séchage. C'est pourquoi l'évacuation des condensats se fait pendant les phases de chauffe, par ruissellement, au bas de l'autoclave 12 et commandée par une électrovanne.

## **IV.2.2 Mesures et acquisitions**

### **IV.2.2.1 Paramètres contrôlés**

Pendant un cycle de séchage, nous avons la possibilité de contrôler quelques paramètres du séchage à l'aide du tableau électrique qui gère le séchoir (*figure IV.5*). Ces paramètres sont :



Figure IV. 5 : Séchoir MASPELL avec son tableau électrique.

### **Le temps de préchauffage $t_{\text{préch}}$**

C'est la durée de toute première phase de chauffe qui, en général, doit permettre au matériau de s'homogénéiser et d'atteindre la température souhaitée. La durée de cette phase dépend de l'épaisseur et de l'humidité initiale du bois. Pendant cette période, une humidification peut se faire à l'intérieur de la cellule pour éviter un début de séchage trop brutal.

### **Le temps de vide $t_{\text{vide}}$**

C'est la durée de la phase de vide. Elle est gérée par un temporisateur.

### **Le temps de chauffe $t_{\text{ch}}$**

La durée de la phase convective peut être gérée soit par un temporisateur, soit par la température au cœur du bois, obtenue à l'aide d'une sonde PT100.

### **La pression de vide $P_{\text{vide}}$ considérée et l'écart toléré $\Delta P_{\text{rég}}$**

Deux manomètres fixent la pression de consigne pour la phase de vide et la régulation envisagée autour de cette valeur.

### **La température de chauffe $T_{\text{ch}}$**

Elle correspond à la température de l'eau qui est chauffée par une résistance électrique et régulée par l'intermédiaire d'un thermostat.

### **La phase d'équilibrage :**

Une phase d'équilibrage est importante à la fin d'un cycle de séchage, elle permet de garantir un refroidissement très doux du produit. Nous avons remarqué que cette phase d'équilibrage est très bénéfique pour la disparition de fente de surface et de bout.

## **IV.2.2.2 Paramètres mesurés**

Comme le montre le schéma (IV.6) ci-dessous, l'instrumentation du séchoir permet la mesure et l'acquisition simultanées au cours du séchage, de la masse totale du lot de bois, de la teneur en eau et la température à l'intérieur du matériau, de la pression et de la température de l'enceinte.

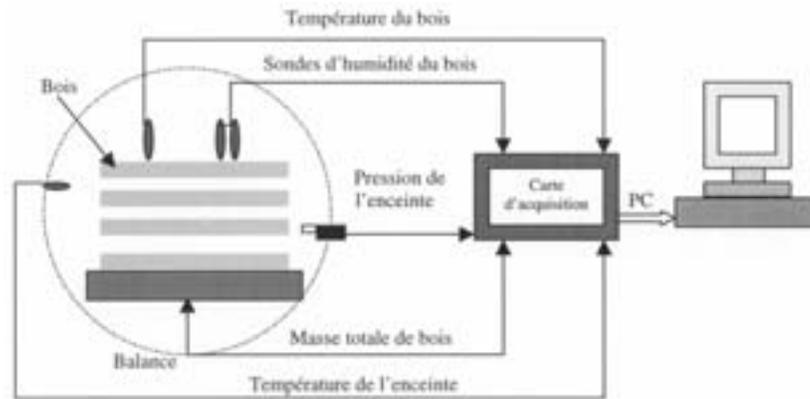


Figure IV. 6 : Acquisitions et mesures du dispositif expérimental.

### **Masse**

La mesure de la masse est réalisée par une balance Mettler, à jauges de contraintes, dont l'étendue de mesure est de 0 à 1500 kg et dont la précision est, pour une plage de 500 kg, de  $\pm 0.05$  kg.

### **Pression**

La pression de l'enceinte est donnée par un capteur de pression absolu Keller à mesure résistive, préalablement calibré.

### **Température**

La température de l'enceinte est celle indiquée par un thermocouple (précis à  $\pm 0.5$  °C en valeur absolue).

Les capteurs de température pour le bois sont des thermocouples de type K précis à  $\pm 0.5$  en °C, en valeur relative et préalablement étalonnés par un bain thermostaté.

### **Humidité du bois**

La mesure d'humidité dans le bois est réalisée à l'aide d'une mesure résistive au moyen d'aiguilles plantées dans l'épaisseur de la planche et parcourues par un courant d'intensité connue. Cette méthode exige une mesure préalable de la résistivité de l'essence de bois considérée en fonction de sa teneur en eau.

Nous soulignons que ce type de mesures n'est qu'un indicateur de la teneur en eau au cours du séchage, il est peu précis et ne donne pas exactement la teneur en eau finale obtenue.

Pour connaître la teneur en eau initiale et finale réelles des planches séchées, une méthode par pesée a été appliquée (*figure IV.7*) :

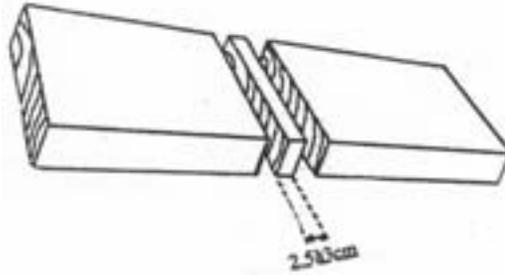


Figure IV. 7 : Méthode pour accéder aux profils d'humidité par pesée.

Cette méthode consiste à découper perpendiculairement au fil du bois l'échantillon dont on va mesurer l'humidité. Les éprouvettes prélevées au milieu des planches ont pour longueurs les largeurs des planches, des largeurs de 2.5 à 3 cm et pour épaisseurs celles des planches (30 mm). La détermination de la teneur en eau des éprouvettes nécessite une mesure avant et après dessiccation (passage en étuve à 80 °C jusqu'à stabilisation du poids à plus de 48 heures). On considère  $M_H$  la masse humide et  $M_S$  la masse sèche; l'humidité  $W$  sera donnée par la formule :

$$W = \frac{M_H - M_S}{M_S} \quad (\text{éq IV 2})$$

Cette technique donne une valeur de  $W_{\text{fin}}$  proche de sa valeur réelle, mais a pour principal inconvénient les destructions des échantillons et l'impossibilité de comparer le profil au même endroit à différents instants de séchage.

### **IV.2.3 Conditions des essais**

Les essais ont été réalisés sur du chêne, à l'état vert, de 30 mm d'épaisseur. Le bois qui est utilisé provient directement d'une scierie située en Dordogne.

Le séchoir est rempli de planches de 1 m de longueur, d'une même épaisseur. Les planches sont empilées par l'intermédiaire de baguettes de 2 cm d'épaisseur (trois baguettes par lit de planches). La quantité de bois introduite dans le séchoir n'est pas la même lors de chaque essai. Le tableau (*IV.8*) regroupe les conditions de nos essais.

N°	A (m <sup>2</sup> )	$\tau$	$T_{ch}$ (°C)	$P_{vide}$ (bar)
1	21.57	0.14	66	0.3
2	30.36	0.2	64	0.24
3	30.68	0.2	59	0.24

Tableau IV. 8 : Conditions expérimentales des essais.

avec,

A : la surface d'échange (m<sup>2</sup>)

$\tau$  : taux de remplissage

Pour les trois essais, nous avons fixé le temps du préchauffage à 6 heures, la durée de la phase de chauffe à 40 minutes, la durée de la phase de vide à 60 minutes et la régulation de pression à 6000 Pa.

### IV.3 Résultats expérimentaux

#### IV.3.1 Cinétiques de séchage

Nous présentons ci-dessous les cinétiques de séchage, ces cinétiques sont exprimées d'une part, par la variation de la masse totale en fonction de la durée totale du séchage (*figure IV.8*), et d'autre part, par l'évolution de la teneur en eau moyenne globale du lot de planches en fonction du temps (*figure IV.9*).

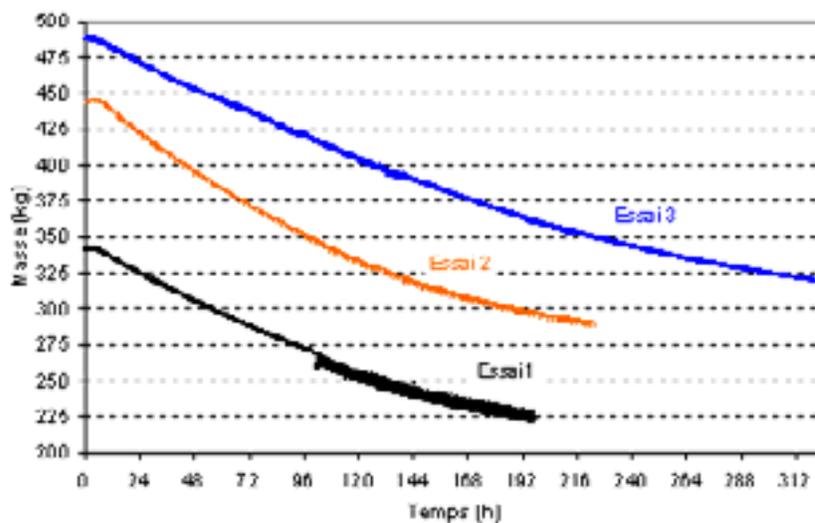


Figure IV. 8 : Cinétiques de séchage pour les lots du bois.

La teneur en eau moyenne a été déterminée par la méthode de par pesée. Cette méthode suppose l'homogénéité du séchage au niveau de l'amas et de la planche (des profils d'humidités seront présentés plus tard pour confirmer ou non cette homogénéité).

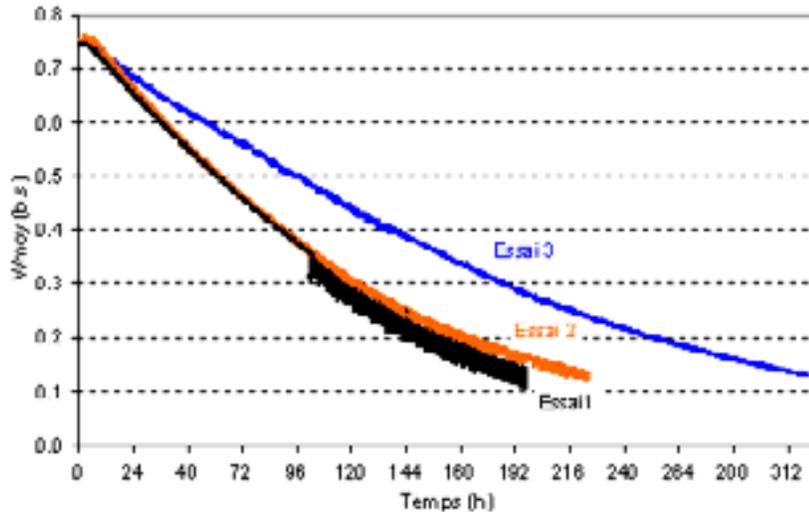


Figure IV. 9 : Cinétiques de séchage : Teneur en eau moyenne du lot du bois en fonction du temps.

Nous observons globalement de la figure (IV.9) que les temps totaux du séchage sont différents d'un essai à un autre. Ceci peut s'expliquer par deux paramètres : le premier est la quantité introduite dans le séchoir n'est pas la même, cela entraîne des taux de remplissage différents, le deuxième est la teneur en eau est différente et la teneur en eau finale obtenue n'est pas exactement à 0.12 (tab. IV.9). Nous précisons que la contrainte maximale présentée dans le tableau ci-dessous résulte des simulations en appliquant les mêmes conditions expérimentales de séchage pour les trois essais.

Essai	$W_{moy\ ini}$	$W_{moy\ fin}$	$T_{ch}$ (°C)	P (bar)	$\tau$	Temps (j)	$\sigma_{max}$ (MPa)
1	0.744	0.12	66	0.3	0.141	8.2	7.2
2	0.755	0.13	64	0.24	0.198	9.3	6.8
3	0.748	0.13	59	0.24	0.2	13.4	5.6

Tableau IV. 9 : Caractéristiques des essais.

Nous retrouvons aussi de ces expériences la rapidité du procédé sous vide (séchage entre 8 et 13 jours) qui est influencée fortement par la température de l'enceinte (terme moteur) et par la pression.

La comparaison entre les essais 2 et 3 montre qu'à pression constante (0.24 bar), plus la température est forte, plus le séchage est rapide : on gagne 100 heures du fait de l'augmentation de la température de 59 à 64 °C.

Sur la figure (IV.10), nous présentons un « zoom » de variation de la masse au cours d'un intervalle du temps de séchage ainsi que la pression de l'enceinte (phases de chauffe et phases de vide). Sur cette figure, les phases de chauffe contribuent faiblement à l'opération de séchage. Au début de la phase convective, nous constatons une forte diminution de la masse (3 kg environ), cette diminution est due à l'action du ventilateur sur la balance et n'est pas significative du processus de séchage.

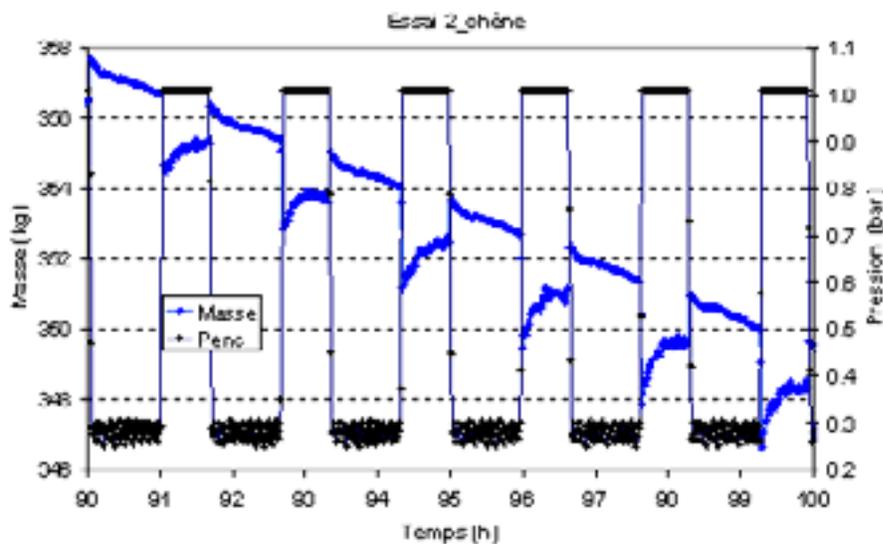


Figure IV. 10 : Variation de la masse pendant les phases de séchage.

Nous présentons aussi sur la figure (IV.11) un « zoom » de variation de la masse pendant une phase de vide (régime actif et régime passif). Pendant la phase de vide, on remarque globalement une forte diminution de la masse. Pendant le régime actif (fonctionnement de la pompe à vide), nous observons une forte diminution de la masse accompagnée d'une brutale chute de la température de l'enceinte (figure IV.13), cette chute correspond au refroidissement à cause de l'évaporation à la surface du bois.

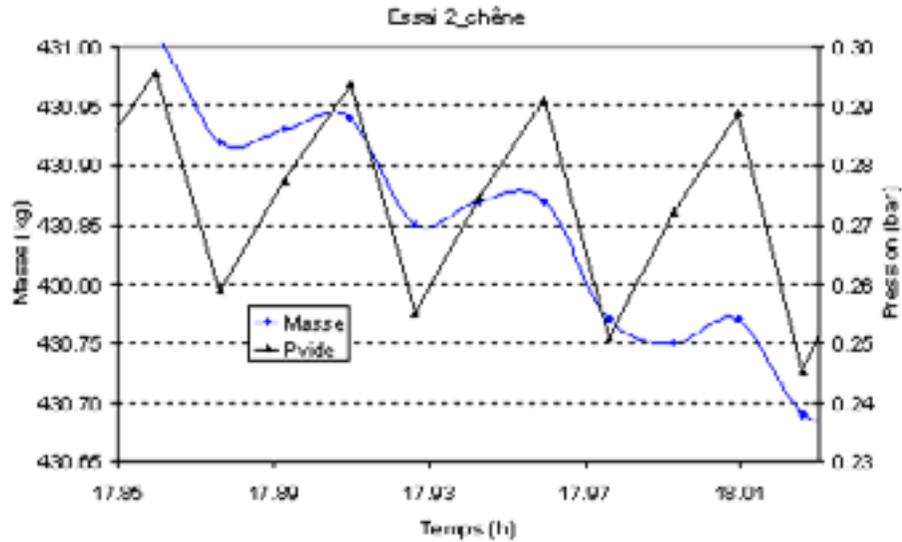


Figure IV. 11 : Variation de la masse du bois pendant une phase de vide.

### IV.3.2 Contraintes maximales

Nous présentons dans la figure (IV.12) les contraintes à la surface du bois des trois essais. Nous constatons que la contrainte maximale à la surface du bois pour l'essai 1 est plus importante aux autres essais, cette augmentation est due à sa forte température et à son faible taux de remplissage (tab. IV.9).

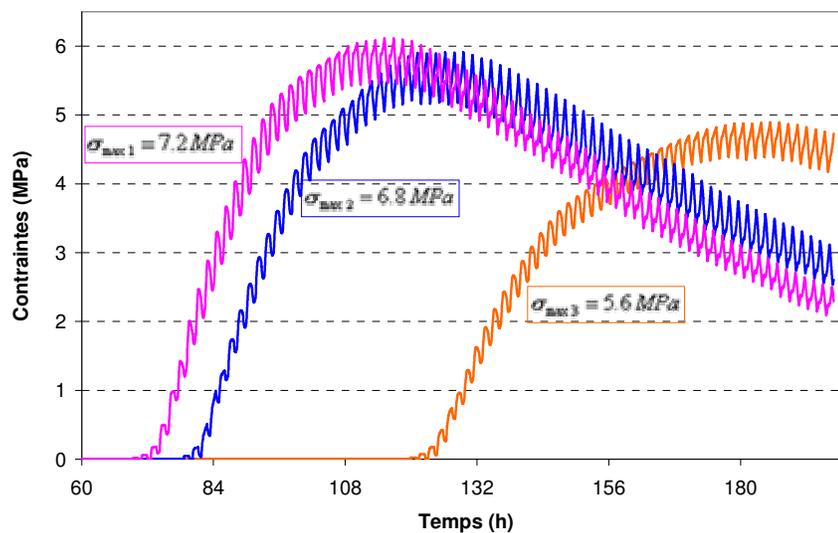


Figure IV. 12 : Contraintes maximales apparues au cours du séchage.

### IV.3.3 Comportement en température

La température joue un rôle très important dans la gestion du séchoir et sa prise en considération est indispensable à la compréhension l'évaporation pendant les phases du séchage. La figure (IV.13) présente le couplage entre la température de l'enceinte du séchoir et la température du bois. Cela signifie que la distribution de la température à l'intérieur du l'amas est homogène.

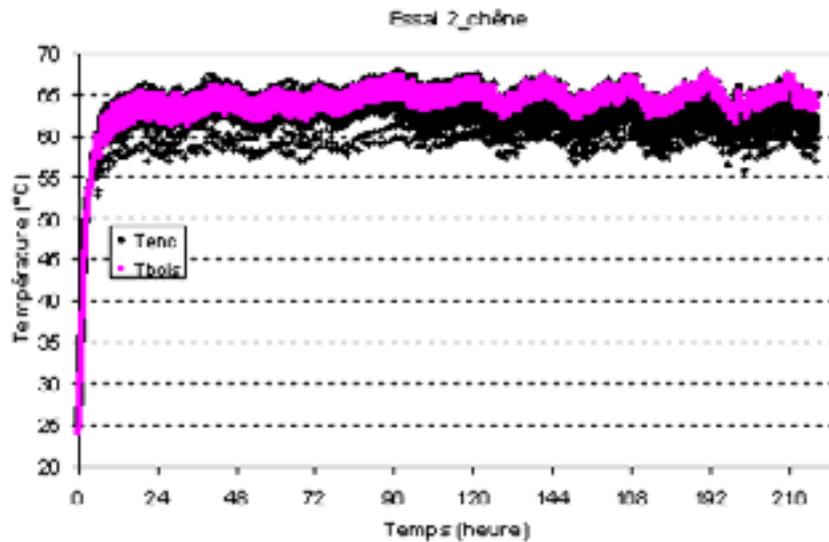


Figure IV. 13 : Couplage des températures de l'enceinte et du bois.

La figure (IV.14) montre les comportements des températures pendant les phases du séchage avec la pression de l'enceinte.

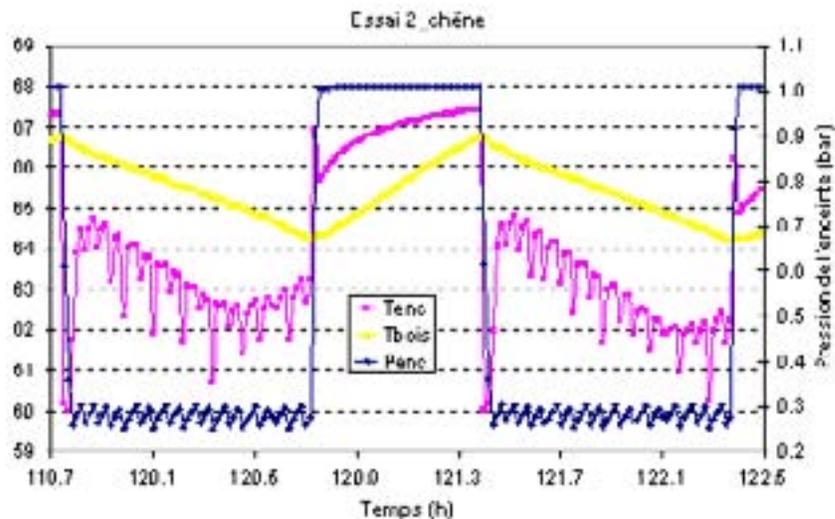


Figure IV. 14 : Comportement des températures pendant les phases du séchage avec la pression de l'enceinte.

Pendant les phases de chauffe, il est évident que la température de l'enceinte (la source de chaleur vient des parois du séchoir) soit supérieure à celle du bois. Pendant les phases de vide, la forte évaporation en surface du bois consomme une part importante de la température du bois mais grâce à la dépression la température de l'enceinte reste inférieure de la température du bois. En effet, la variation de la température du bois est reliée au fonctionnement de la pompe à vide : une chute de température pendant le régime actif et une relaxation pendant le régime passif.

### **IV.3.4 Homogénéité**

#### **IV.3.4.1 À l'échelle de la planche**

Nous avons déjà déterminé la teneur en eau moyenne par une méthode de pesée, cette méthode consiste à découper un échantillon d'un endroit quelconque de la planche puis à déterminer sa teneur en eau. Ensuite, nous considérons que la teneur de l'échantillon correspond à celle de la planche. Cette technique a un inconvénient, elle suppose l'homogénéité de la teneur en eau finale sur la longueur de la planche. Pour vérifier l'homogénéité à la fin du séchage, une expérience supplémentaire a été faite. Cette expérience se base sur le même principe, mais cette fois nous avons choisi 6 planches de chaque essai dont 2 planches de chaque direction (2T, 2R et 2TR). Une planche traitée est composée de 18 échantillons environ de 4 cm de largeur (*figure IV.15*).

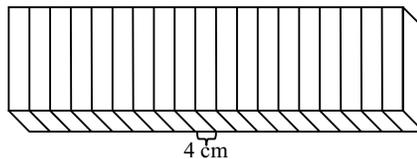


Figure IV. 15 : Découpage de l'échantillon pour accéder au profile d'humidité.

La figure (*IV.16*) représente un profil d'humidité final pour une planche débitée sur dosse.

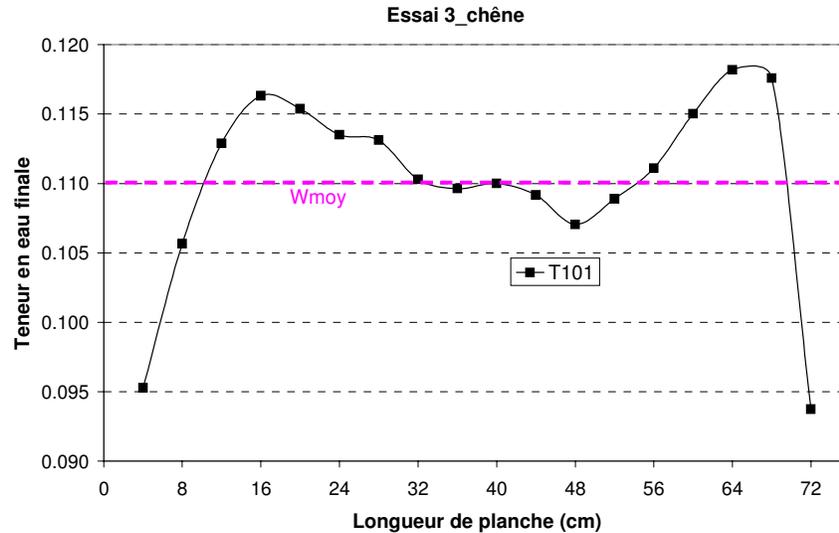


Figure IV. 16 : profil d'humidité d'une planche sciée sur dosse avec la teneur en eau moyenne.

Sur cette figure, nous remarquons l'effet de bout où les extrémités de la planche sont plus sèches que les autres parties de la planche et que la distribution de la teneur en eau n'est pas uniforme, mais les différences entre les points mesurés et la teneur en eau moyenne ne sont très grandes. Afin que la méthode par pesée puisse être représentative, nous suggérons que la mesure soit effectuée sur 2 à 3 morceaux de bois prélevés à partir du milieu de la planche.

La figure (IV.17) montre l'ensemble des profils d'humidité à la fin du séchage pour l'essai 3.

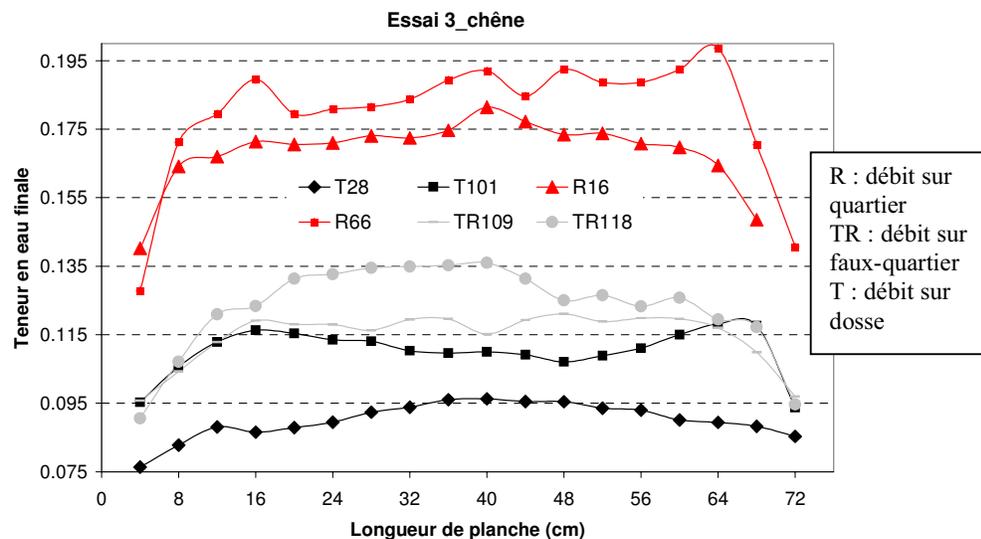


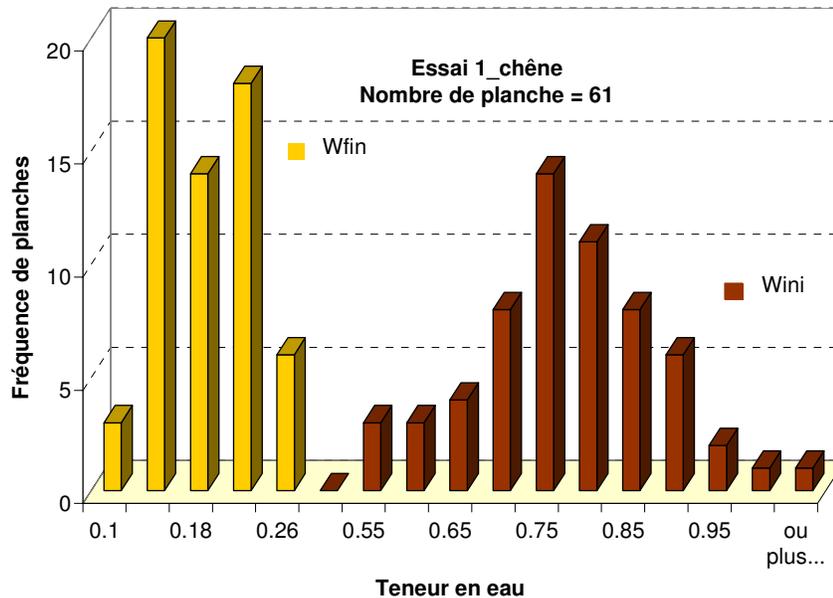
Figure IV. 17 : Evolution des profils d'humidité selon les directions pour l'essai 3.

Nous observons que les planches débitées sur quartier contiennent plus d'humidité que les planches débitées sur faux quartier, ces dernières sont plus humides que celles débitées sur dosse. Ceci est lié à l'anisotropie des propriétés du bois en particulier entre la direction radiale et la direction tangentielle.

À un point donné  $X = 40$  cm par exemple, la planche débitée sur quartier possède plus de 80 % d'humidité que celle débitée sur dosse. Cette remarque nous conduit peut être à ajouter une règle sur les expériences du séchage : « à l'échelle des planches, pour assurer l'homogénéisation de la teneur en eau finale à la fin de séchage, il faut que le lot du bois soit constitué des planches possédant un seul mode de débit ».

#### IV.3.4.2 À l'échelle du l'amas

À l'échelle du l'amas, les figures (IV.18) illustrent la bonne homogénéité après le séchage. On remarque que la teneur en eau initiale des planches est dispersée allant de 0.55 jusqu'à plus de 1. Grâce à l'homogénéité du séchage plus de 95 % des planches ont une humidité finale entre 0.12 et 0.2.



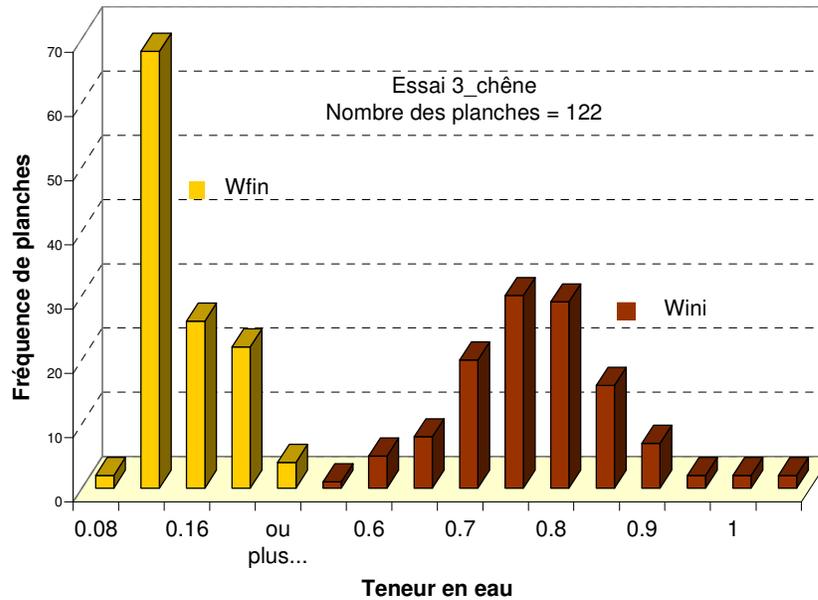
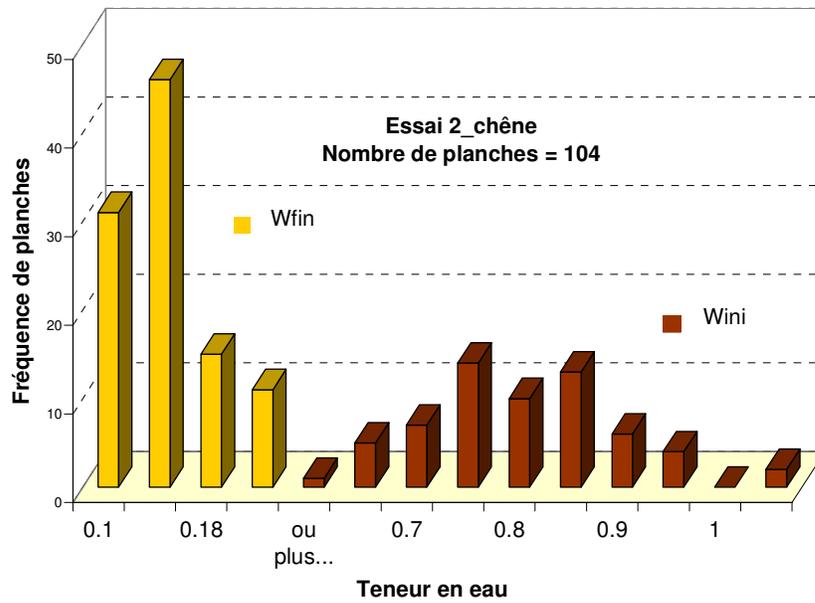


Figure IV. 18 : Humidité moyenne initiale et finale des planches du l'amas.

Pour obtenir une répartition finale de l'humidité uniforme au travers des planches, une phase d'équilibrage est nécessaire.

### IV.3.5 Défauts observés

Parmi les déformations et les types de fissurations citées dans le chapitre (III), nous avons constaté après le séchage pour les trois essais que la qualité du bois est satisfaisante tant au niveau des déformations qu'au niveau des fissurations.

Très peu de collapse généralisé sans fente a été observé sur un ou deux coté latéraux. En effet, cette remarque conduit à déduire que le bois pendant la première phase de séchage était très humide puisque le collapse ne se crée qu'avec ces conditions quand la tension capillaire de l'eau dans les cellules dépasse la résistance mécanique des parois cellulaires.

La couleur du bois est uniforme, aucune planche séchée ne présente des discolorations ni des taches ni de brunissement en surface.

#### IV.3.5.1 Déformation

En ce qui concerne les déformations, nous avons deux observations : premièrement, la plupart des planches débitées sur dosse possèdent un tuilage considérable même si les conditions de séchage est très douces (*figure IV.19*). Deuxièmement, 37 % de planches présentent un gauchissement (*figure IV.20*) plus ou moins important selon la structure de planche et les conditions de l'essai.

La flèche de face est présente uniquement dans 7 % des planches séchées.



Figure IV. 19 : Tuilage sur une planche fissurée sur dosse.



Figure IV. 20 : Tuilage et gauchissement remarqués sur quelques planches séchées.

Les tableaux (*IV.10*) présentent les défauts remarqués sur les trois essais, ils sont regroupés selon le mode de débit des planches.

<b>Planches débitées sur quartier (Direction Radiale)</b>					
Essai	Nombre de Planches	Au moins 1 défaut	Tuilage	gauchissement	Flèche de face
1	10	5	1	4	0
2	44	17	0	21	3
3	29	3	0	3	1
$\Sigma$	83	25	1	28	4
<b>Planches débitées sur dosse (Direction Tangentielle)</b>					
Essai	Nombre de Planches	Au moins 1 défaut	Tuilage	gauchissement	Flèche de face
1	34	23	15	14	2
2	38	22	9	21	2
3	39	16	6	14	0
$\Sigma$	111	61	30	49	4
<b>Planches débitées sur faux quartier (Direction Radiale - Tangentielle)</b>					
Essai	Nombre de Planches	Au moins 1 défaut	Tuilage	gauchissement	Flèche de face
1	17	13	5	11	4
2	22	6	0	7	6
3	54	18	4	16	2
$\Sigma$	93	37	9	34	12

Tableaux IV. 10 : les défauts observés dans les trois essais selon le découpage.

La première colonne dans un essai représente le nombre total des planches qui possèdent le type de débit. La deuxième colonne exprime le nombre total des planches contenant au moins un défaut. Avec la possibilité de trouver plusieurs types de défauts dans la même planche.

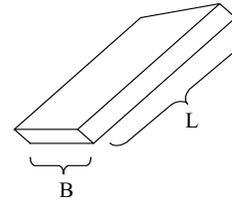
Nous pouvons retirer de ces tableaux que le défaut gauchissement est le défaut prédominant dans toutes les modes de débit pour l'ensemble des conditions explorées. Il est associé avec le tuilage dans le cas de coupe sur dosse. En revanche, le tuilage abonde dans les planches débitées sur dosse. La flèche est abondante dans le mode de débit faux quartier.

On conclut que les pourcentages des déformations sont de l'ordre 67 % pour l'essai 1, 43 % pour l'essai 2 et 30 % pour l'essai 3. Lors des dépouillements nous constatons que la plupart de ces planches déformées sont positionnées dans les rangées supérieures de l'empilement dans le séchoir cela est peut être du :

- absence de l'homogénéisation de flux de l'air qui provient d'un ventilateur grand et puissant,
- ou éventuellement des conditions aux limites différentes : les rangées inférieures supportent l'action de poids des rangées supérieures. Il convient ultérieurement de maintenir l'ensemble de l'empilement sous chargement (plaque métallique par exemple).

Dans le cas où nous écartons les trois premières rangées, ces pourcentages deviennent : 47 %, 30 % et 22 % pour les essais 1, 2 et 3 respectivement.

Dans le but d'évaluer les défauts de tuilage et de gauchissement, en prenant en compte la notation de la figure ci-contre, nous pouvons définir leurs coefficients qui expriment la flèche par rapport à la largeur et à la longueur de la planche par les relations suivantes :



$$Coeff_{Tui} = \frac{f}{B} * 100 \tag{éq IV 3}$$

$$Coeff_{Gau} = \frac{f'}{L} * 100 \tag{éq IV 4}$$

avec,

f : la flèche considérée par rapport à la largeur de la planche B

f' : la flèche considérée par rapport à la longueur de la planche L

Le tableau (IV.11) résume les résultats.

Direction		Radiale R	Tangentielle T	Radiale – Tangentielle R-T
Coefficient de Tuilage	Moyenne%	-----	2.18	3.01
	Ecart type%	-----	0.77	1.56
	Nb de planches déformées	1	30	9

Direction		Radiale	Tangentielle	Radiale – Tangentielle
		R	T	R-T
Coefficient de Gauchissement	Moyenne %	0.59	0.69	0.74
	Ecart type %	0.27	0.32	0.41
	Nb de planches déformées	28	49	34

Tableaux IV. 11 : coefficients de tuilage et gauchissement pour tous les essais selon le mode de découpage

De l'observation des résultats des tableaux (IV.11), nous pouvons signaler que, pour l'ensemble des planches considérées, les défauts de tuilage et de gauchissement sont peu importants par rapport à la ligne moyenne concernée. Généralement la dispersion est légèrement plus importante dans le cas R-T.

Bien que les coefficients soient en général plus importants pour les planches R-T en comparaison avec ceux des planches T, mais il faut noter que le nombre des planches déformées est plus important quand celles-ci sont débitées sur dosse.

Les coefficients associés aux coupes radiales sont les plus faibles. En même temps c'est dans ce mode de débit que nous avons le moins de planches .

Nous n'avons pas calculé le coefficient de flèche de face parce que ce défaut est très peu présent dans l'ensemble des essais.

#### IV.3.5.2 Fentes superficielles et de bout

Pour les trois essais, il n'y a pas des fissures remarquables excepte quelques planches (figures IV.21).





Figures IV. 21 : Fentes superficielles et internes près de bout fissuré gravement.

Des tableaux (IV.12), qui présentent une quantification des fissures superficielles et de bout dans tous les essais considérés, on observe que le pourcentage des planches fissurées ainsi que le nombre des fissures dans les planches est très important dans les essais 1 par rapport à l'essai 3 qui présente que des vingtaines des fissures dans tout le lot séché. La particularité dans cet essai est que la température est élevée (66 °C) avec un faible taux de remplissage (0.14).

Essai	Fentes superficielles							
	Nb planches fissurées	% des planches fissures	Nb total de fissures	Longueurs des fissures mm				
				5 à 10	10 à 20	20 à 50	50 à 100	100 à 200
1	8/61	13 %	74	-----	60	3	4	7
2	8/104	7.7 %	97	39	18	40	-----	-----
3	4/122	6.3 %	23	22	-----	1	-----	-----

Essai	Fentes de bout							
	Nb planches fissurées	% des planches fissures	Nb total de fissures	Longueurs des fissures mm				
				5 à 20	10 à 30	30 à 50	50 à 100	120 à 260
1	8/61	13 %	12	6	----	-----	-----	6*
2	10/104	9.6 %	55	47	-----	-----	8	-----
3	8/122	6.5 %	24	17	4	2	1	-----

Tableaux IV. 12 : Fentes superficielles et de bout observées sur toutes les planches séchées.

Sur l'ensemble des planches observées, dans l'essai 1, un nombre limité (4) de planches présentaient 6 fissures d'une taille très importante  $> 12$  cm (*figure IV.22*). Ces fissures sont localisées dans le *bois juvénile* (partie centrale du tronc de 5 à 20 cernes) qui possède une densité plus faible que le *bois adulte*.



Figure IV. 22 : Fentes de bout dans le bois juvénile.

En conclusion, nous pouvons dire que les fissures observées sont très limitées en nombre et en taille. Nous précisons que pour l'essai 1 une seule planche possède 44 fissures tandis que pour l'essai 2, deux planches contiennent 70 fissures et pour l'essai 3 nous trouvons 15 fissures superficielles dans une seule planche !

#### IV.3.5.3 Fentes internes

Six planches de chaque essai (2 sur dosse, 2 sur quartier et 2 sur faux quartier) ont été découpées afin d'accéder aux fentes internes. Certaines de ces planches étaient déformées, d'autres étaient de bonne qualité visuelle. La distance entre deux découpes est de 40 mm. Les lignes de découpe sur une planche sont repérées par les abscisses de  $X_1$  à  $X_n$  (longueur de la planche 80 cm). On appelle l'interface entre deux morceaux la surface d'observation (*figure IV.23*).

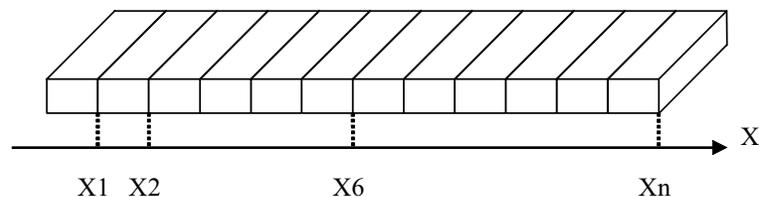


Figure IV. 23 : Mode de débit pour accéder aux fentes internes.

La figure (IV.24) présente un morceau de bois contenant des fissures internes. Ces fentes sont principalement localisées au niveau des rayons ligneux dans la direction radiale.



Figure IV. 24 : Surface d'observation d'un morceau de bois contient des fissures internes

Nous avons trouvé globalement que les fentes internes sont aussi très limitées en nombre et en taille et que ces fentes se trouvent dans les extrémités des planches.

Les surfaces d'observations fissurées dans l'essai 1 présentent 13.9 % de toutes les surfaces observées qui s'élèvent à 108 sections, ce pourcentage diminue à 6.5 % dans l'essai 2 et à 1.8 % dans l'essai 3. On confirme qu'il y a très peu des fissures observées dans les dix huit planches découpées qui présentent 324 surfaces d'observation.

Les résultats pour les trois essais confirment que les niveaux des contraintes maximales trouvés évoluent dans le même sens de l'évolution de pourcentages des fentes (superficielles, de bout et internes).

Les résultats statistiques liés aux fentes internes sont présentés dans le tableau (IV.13).

Bien que cette méthode ne soit pas précise et ne soit pas suffisante pour évaluer les fissures internes dans le bois, elle permet de donner une idée sur ce type des défauts

Essai	Direction / Planche	Fentes internes							
		Face où se trouve la fissure	Nb total des fissures	Surface d'observa tion  $cm^2$	Longueurs des fissures mm				
					3 à 5	5 à 10	10 à 15	15 à 20	>20
1	R_9	X18	4	27.3	-----	-----	2	2	----
	R_47	X18	8	33.6	-----	-----	4	4	----
	T_7	X1, X12, X13, X14, X15, X16, X17	7	38.1	4	1	2	-----	----
	T_14	X1, X18	2	33.6	-----	2	-----	-----	----
	RT_10	X15	1	50.5	-----	-----	-----	-----	1
	RT_53	X1	6	34.7	-----	-----	6	-----	----
2	R_32	X1	4	29.7	-----	4	-----	-----	----
	R_85	X18	1	35	-----	-----	-----	-----	1
	T_81	Aucune fissure							
	T_95	X4, X8, X9, X10, X16	10	33.9	6	2	2	-----	----
	RT_77	Aucune fissure							
	RT_84	Aucune fissure							
3	R_16	Aucune fissure							
	R_66	Aucune fissure							
	T_28	Aucune fissure							
	T_101	X18	3	43.5	-----	-----	1	2	----
	RT_109	Aucune fissure							
	RT_118	X1	1	30.5	-----	-----	1	-----	----

Tableau IV. 13 : Fentes internes relevées des sections coupées.

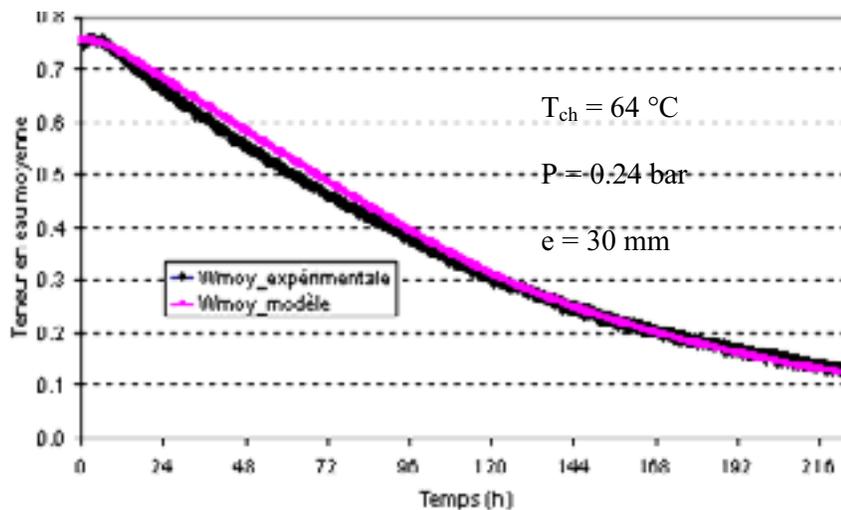
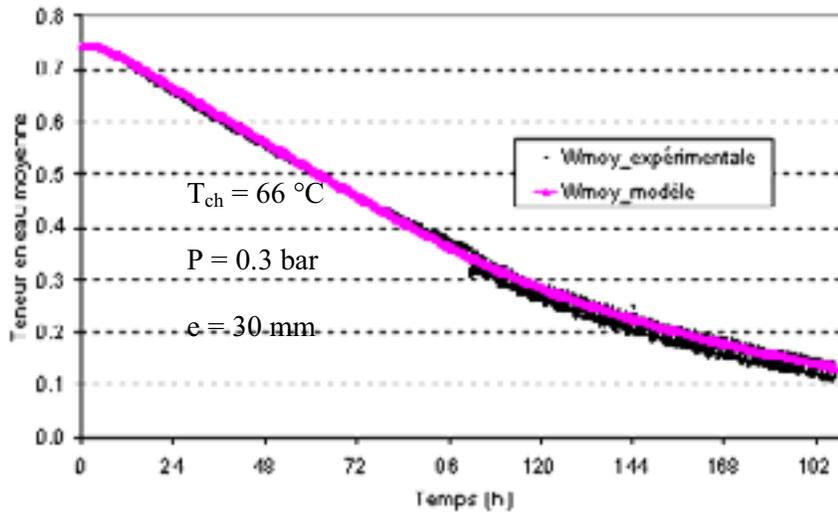
## IV.4 Validation de la modélisation

### IV.4.1 Comparaison modèle / expérience

Nous avons réalisé quelques comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques afin de valider la modélisation proposée et de confirmer que l'outil numérique répond aux conditions de séchage choisies.

### IV.4.1.1 Cinétiques de séchage

Les figures (IV.25) montrent des comparaisons entre les cinétiques de séchage de trois essais représentés par l'évolution des teneurs en eau moyenne (base sèche). Nous pouvons constater qu'à l'échelle cinétique le modèle de séchage répond correctement aux conditions des expériences.



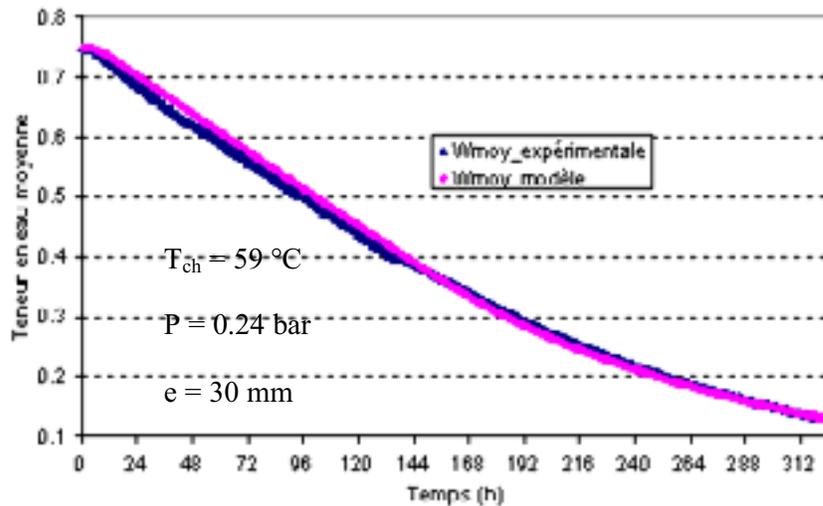


Figure IV. 25 : Comparaison des cinétiques de séchage expérimentales et numériques.

#### IV.4.1.2 Température

Les températures de l'enceinte sont représentées dans la figure (IV.26), les résultats numériques sont aussi en bon accord avec l'expérience.

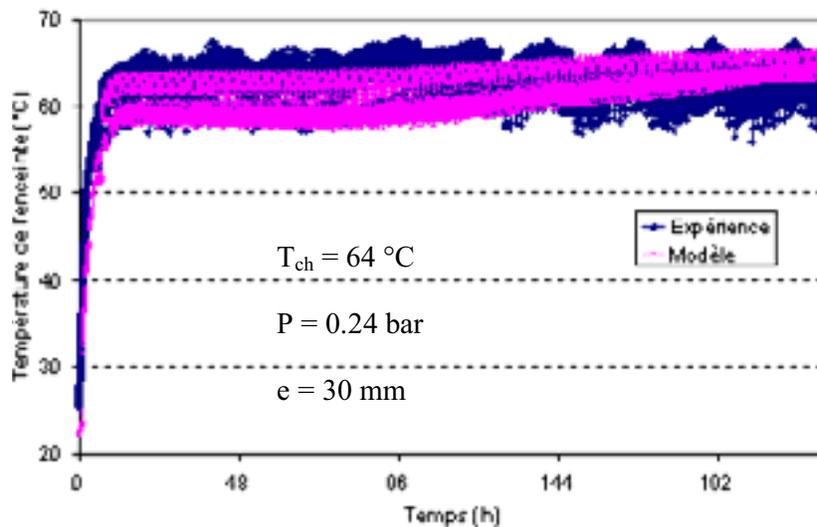


Figure IV. 26 : Comparaison des températures de l'enceinte expérimentales et numériques.

Par ailleurs, il est important de noter que ces 3 essais se sont effectués à deux taux de remplissage différents. Afin de cerner uniquement les effets des conditions de séchage, des simulations pour les mêmes conditions avec un taux de remplissage fixé à 0.2 ont été effectuées. Les résultats sont présentés dans paragraphe suivant.

## IV.4.2 Conditions numériques

### IV.4.2.1 Cinétiques de séchage

Sur la figure (IV.27), nous remarquons que les différences entre les durées totales du séchage pour les conditions 1 et 2 ne sont pas significatives. Alors que la durée de la condition 3 est bien supérieure aux autres conditions. La particularité remarquée dans la condition 3 est la température de chauffe qui est de 59 °C.

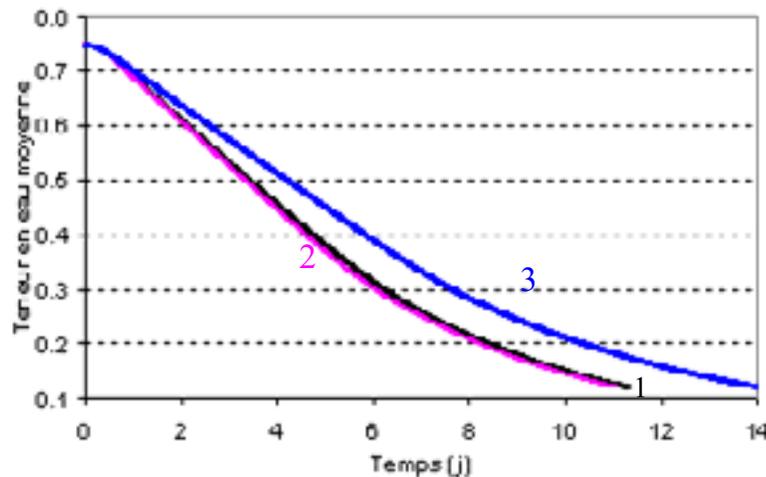


Figure IV. 27 : Cinétiques de séchage calculées numériquement avec des conditions similaires.

### IV.4.2.2 Contraintes maximales

Le tableau (IV.14) ainsi que la figure (IV.28), montrent les contraintes maximales à la surface du bois résultantes des simulations appliquées. Sur l'ensemble des contraintes maximales représentées, nous pouvons déduire que leurs valeurs sont à l'entour de 6 MPa : cette contrainte est acceptable parce qu'elle est très proche de la contraintes admissible du chêne qui est entre 4 et 5 MPa avec un coefficient de sécurité est de 5.

$\tau = 0.2$ , $W_{ini} = 0.748$ et $W_{fin} = 0.12$		
Condition	Temps (j)	$\sigma_{max}$ (MPa)
1	11.3	5.6
2	11	6.2
3	14	5.6

Tableau IV. 14 : Conditions et résultats des simulations.

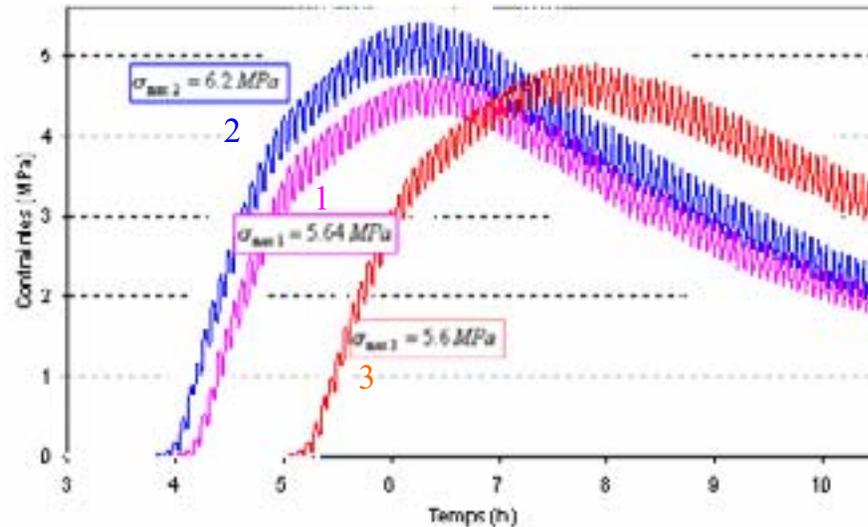


Figure IV. 28 : Contraintes maximales apparues lors d'introduire mêmes taux de remplissage.

## IV.5 Conclusion

Au travers de ce chapitre, nous avons proposé des conditions de séchage qui semblent optimales tant en terme de durée qu'en terme de risques de fissuration.

L'étude expérimentale a révélé un certain nombre de points résumés ci-après :

- Sur l'ensemble de nos essais, une bonne qualité mécanique a été remarquée sur le bois, peu de déformation et très peu de fentes. Il faut rappeler que les conditions testées sont issues des simulations proposées qui permettent de prédire la durée du séchage ainsi que le niveau de contraintes au sein du matériau.
- Dans tous les essais, nous avons trouvé une différence significative de la teneur en eau finale liée au mode de débit. Il est préférable de respecter la nature de débit pendant l'empilement du bois. Par ailleurs, à l'échelle de l'amas, on observe une bonne homogénéité de la teneur en eau finale dans les planches après le séchage.
- À l'échelle de la planche, le profil d'humidité final n'est pas uniforme sur toute la longueur de la planche. On voit ici les effets d'anisotropie du bois (perméabilité longitudinale très grande par rapport aux autres directions).

En ce qui concerne la modélisation, nous avons mis en évidence l'impact des conditions de séchage sur le niveau de contraintes atteint au sein du bois. L'étude de sensibilité a permis de proposer des conditions permettant de diminuer le niveau de contraintes par rapport à la condition de référence préconisée par le constructeur du séchoir avec en contre partie une augmentation de la durée du séchage qui reste néanmoins tout à fait acceptable (13 jours pour atteindre une teneur en eau de 0.12).

Cette étude de sensibilité a par ailleurs permis de hiérarchiser les effets des différents paramètres du procédé sur la durée de l'opération ainsi que le niveau de contraintes. Il en ressort que les paramètres prédominants sont la température de l'enceinte et sa pression. Notons que la température a un effet plus important que la pression sur l'évolution des contraintes mécaniques et qu'elle a un effet encore plus important sur la durée du séchage.

Il est à noter par ailleurs que les résultats des simulations sont en parfait accord avec les résultats expérimentaux (en ce qui concerne la cinétique de séchage).

**CONCLUSION  
GENERALE**



## Conclusion Générale

Nous avons dans ce mémoire abordé le séchage sous vide discontinu du bois de chêne. Notre objectif étant d'optimiser le temps de séchage tout en évitant l'apparition des fissures et en préservant les qualités mécaniques initiales du bois.

Au travers d'un bref aperçu d'études bibliographiques nous avons retenu que le séchage du bois est influencé par l'architecture des cellules, il subit ainsi toute la variabilité du matériau selon l'essence, la provenance, la partie de l'arbre (cœur, aubier, bois de réaction, nœuds...) et le mode de débit du tronc. Le travail effectué s'intéresse à la modélisation du comportement d'un matériau sans défauts au cours du séchage. Cette modélisation permet de comparer différents scénarios de conduite du séchoir en terme de temps de séchage et de contrainte maximale au sein du bois.

Le modèle mis en place est basé sur une description des transferts de chaleur et de masse au sein du bois et à l'intérieur d'un séchoir sous vide discontinu ainsi que sur un comportement élastique du bois. Le choix d'un comportement élastique est évidemment non réaliste pour décrire le comportement mécanique du bois mais permet de comparer les niveaux de contraintes pour différentes conditions de séchage.

La modélisation des transferts de masse et de chaleur à l'interface entre le matériau et le séchoir se base sur une modélisation établie précédemment (JOMAA et BAIXERAS, 1997). Dans cette description le flux de masse (pendant la phase de vide) est obtenu au travers d'une hypothèse d'équilibre au niveau de la pression de la phase vapeur c'est-à-dire qu'à tout instant la pression de vapeur à la surface du bois est supposée égale à la pression de vapeur au niveau du séchoir. Cette description est pertinente pendant le régime actif où la pompe extrait tout excédant de vapeur. Au cours de ce travail nous nous sommes intéressés au régime passif (pompe à l'arrêt) où nous proposons la description du transfert de vapeur au travers de la diffusion de cette dernière depuis la surface du bois vers le

volume de l'enceinte. Cette description permet de proposer une formulation très simple du flux masse pendant ce régime passif. Les résultats ont permis de confirmer par ailleurs que l'hypothèse d'équilibre peut être adoptée pour le régime passif. En effet les différences des résultats entre le modèle précédent et celui présenté dans ce travail sont très faibles et ne portent pas à conséquence dans la description du comportement du matériau au cours du séchage.

L'étude de sensibilité du modèle mis en place aux paramètres de contrôle du séchoir permet de dégager des conditions pertinentes et qui conditionnent en grande partie la qualité du produit et la rapidité du procédé. De cette étude de sensibilité nous pouvons retenir que les paramètres prépondérants sont la température de séchage, la pression dans l'enceinte et le niveau de remplissage du séchoir.

Pour ces paramètres, nous retiendrons principalement que :

- L'effet de l'augmentation de la température sur les contraintes maximales est plus important que l'effet de la diminution de pression.
- L'effet de la température sur la durée totale du séchage est beaucoup plus important que l'effet de la pression.
- La grande quantité du bois introduite dans le séchoir est un facteur de diminution des contraintes au sein du matériau grâce à l'ambiance humide produite par la vapeur d'eau évacuée du bois.

Cette étude a permis de proposer des conditions permettant de diminuer le niveau de contraintes par rapport à la condition de référence préconisée par le constructeur du séchoir avec en contre partie une augmentation de la durée du séchage qui reste néanmoins tout à fait acceptable (13 jours pour atteindre une teneur en eau de 0.12).

L'étude expérimentale du séchage sous vide discontinu du chêne nous a permis de valider la modélisation mise en place ainsi que les conditions optimales tant en terme de durée qu'en terme de risques de fissurations. Cette étude expérimentale a révélé un certain nombre de points résumés ci après :

- Sur l'ensemble de nos essais, une bonne qualité mécanique a été remarquée sur le bois, peu de déformation et très peu de fentes. Il faut rappeler que les

conditions testées sont issues des simulations proposées qui permettent de prédire la durée du séchage ainsi que le niveau de contraintes au sein du matériau.

- Dans tous les essais, nous avons trouvé une différence significative de la teneur en eau finale liée au mode de débit. Il est préférable de respecter la nature de débit pendant l'empilement du bois. Par ailleurs, à l'échelle de l'amas, nous avons observé une bonne homogénéité de la teneur en eau finale dans les planches après le séchage.

La poursuite de ce travail réside dans la mise en place d'un modèle mécanique prenant en compte la complexité des phénomènes en intégrant le comportement différé du bois ce qui permettra de prédire plus précisément l'évolution des contraintes dans la bois au cours du séchage.

D'un point de vue expérimental, il serait intéressant de mettre en place un dispositif de détection d'apparition de fissures au cours du séchage. Un dispositif d'émission acoustique pourrait être envisagé.

Par ailleurs, il serait intéressant de valider la modélisation à une autre échelle au travers d'expériences conduites sur un séchoir sous vide discontinu industriel.

**Références  
bibliographiques**



## Références bibliographiques

- ALEON D., CHANRION P., NEGRIE G., PEREZ J., SNIEG O.,** 1990, Séchage du bois ; guide pratique, Ed. CTBA.
- ALEON D., NEGRIE G., PEREZ J., SNIEG O.,** 1991, Le séchage sous vide continu à plaques, Ed. CTBA.
- APEP.,** 1985, Guide pratique d'emploi des pins français, Ed. MURAY-PRINT, Asnières.
- ASSOUAD A.,** 2000, Séchage sous-vide discontinu de bois du chêne, Mémoire de stage de DEA Sciences du Bois, Université Bordeaux 1.
- BAIXERAS O.,** 1995, Modélisation et mise en œuvre expérimentale du séchage sous vide discontinu du chêne, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux.
- CANTERI L.,** 1996, Transferts et déformations en surface au cours du séchage – estimation de la qualité du matériau bois, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- CHARRIER B., HALUK J P., JANIN G.,** 1992, Prevention of brown discoloration in European oakwood occurring during kiln drying by a vacuum process, Holz als Roh- und Werkstoff, vol.50, n° 11, pp 433.
- DEMANET A.,** 1998, Interaction mécanique eau/bois et application à l'étude du collapse du chêne, Thèse de l'Université Bordeaux 1.
- FELIX,** 1990, Modélisation des déformations et contraintes dans une pièce de bois en cours de séchage, Thèse de l'Université Bordeaux 1.
- GOBBE C., GOUNOT J., BAZIN M.,** 1989, Mise en oeuvre de la méthode flash pour la mesure de diffusivité thermique sur des matériaux liquides ou fondus en fonction de la température : Application aux polymères. Revue Phys. Appl., vol 24, pp 1119-1128.
- GOYENCHE M.,** 2001, Etude du transport d'humidité par écoulement de film lors du séchage d'un milieu capillaro-poreux, Thèse de l'Université Bordeaux 1.
- GUILMAIN C.,** 1997, Analyse et modélisation du séchage sous vide avec vapeur d'eau surchauffé : Application au bois de chêne, Thèse de l'Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux.
- GUITARD D.,** 1987, mécanique du matériau bois et composites, Ed. CEPADUES EDITIONS- Toulouse.
- GUITARD D.,** 1994, Comportement mécanique du bois, Le bois matériau de l'ingénieur, Ed. ARBOLOR- Nancy.

- HERNANDEZ J M.**, 1991, Séchage du chêne, caractérisation, procédés convectif et sous vide, Thèse de l'Université Bordeaux 1.
- JANNOT Y.**, 2003, Isothermes de sorption : modèles et détermination, Cours DESS milieux poreux, Université Bordeaux 1.
- JOLY P., MORE-CHEVALIER.**, 1980, Théorie, pratique et économie du séchage des bois, Ed. H. VIAL- Dourdan.
- JOMAA W., BAIXERAS O.**, 1997, Discontinuous vacuum drying of oak wood: modelling and experimental investigations, *Drying Technology*, vol. 15 n° 9 - pp. 2129-2144.
- JOMAA W., BRUNEAU D.**, 1997, Cours de D.E.A Sciences du bois, Université Bordeaux 1.
- KAUMAN., W G.**, 1983, Thermodynamique de l'eau dans le bois, *Le matériau bois : propriétés, technologie, mis en œuvre*, Ed. A.R.BO.LOR.
- KELLER R.**, 1994, Comportement mécanique du bois, *Le bois matériau d'ingénierie*, Editeur ARBOLOR- Nancy.
- KELLER R.**, 1983, Anatomie, *Le matériau bois : propriétés, technologie, mis en œuvre*, Ed. A.R.BO.LOR.
- KOLLMANN., CÔTÉ.**, 1984, The structure of wood and the wood cell wall, *Principal of wood science and technology*, vol.1: solid wood, Ed. SPRINGER VERLAG.
- LARTIGUE C.**, 1987, Mécanismes élémentaires mis en jeu lors du séchage du pin maritime, Thèse de l'Université Bordeaux 1.
- LARTIGUE C., PUIGGALI J.R.**, 1987, Caractéristiques du pin des landes nécessaires à la compréhension des phénomènes de séchage, *Actes du second Coll. Sciences et Industrie du bois*, ARBOLOR Ed., vol. 2, pp 57-64.
- MARTENSSON A., SVENSSON S.**, 1997, Stress-strain relationship of drying wood, *Holzforschung*, vol 51, pp. 472-478.
- MARTIN M., MOYNE C.**, 1982, Etude expérimentale du transfert simultané de chaleur et de masse au cours du séchage sous vide par contact d'un bois de résineux, *Int. J. Heat Mass Transfert*, vol. 25, pp, 1839-1848.
- MARTIN P.**, 1983, Propriétés technologiques, *Le matériau bois : propriétés, technologie, mise en œuvre*, Ed. A.R.BO.LOR.
- MERIGOUX.**, 1978, Transmission de la chaleur à l'évaporation, *Initiation aux transferts thermiques*, Ed. PARIS, pp. 351-366.

- MOYNE C.**, 1982, Contribution à l'étude du transfert simultané de chaleur et de masse au cours du séchage sous vide d'un bois résineux. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- MOYNE C.**, 1987, Transferts couplés chaleur-masse lors du séchage : prise en compte du mouvement de la phase gazeuse, Thèse d'Etat de Nancy.
- NADEAU J.P ., PUIGGALI J.R.**, 1995, Séchage ; des processus physiques aux procédés industriels, Ed. Lavoisier, Tech. Et Doc., Paris.
- NEPVEU G.**, 1990, Les facteurs influençant la qualité du bois de chêne (chêne Rouvre et chêne Pédonculé), Revue forestière française, pp. 128-133, Ed. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- OUJJEHANE A.**, 1992, Contribution théoriques et expérimentales à l'étude du comportement de milieux poreux anisotropes : le bois, Thèse de l'Université Blaise Pascal.
- PANG S.**, 2000, Modelling of stress development during drying and relief during steaming in pinus radiata lumber, Drying technologie, vol. 18 (8), pp. 1677-1696.
- PARMENTIER J.L.**, 1977, Le Grand Livre International du Bois, Ed. MITMCHELL BEAZLEY LIMITED , 1976 à Londres, Adaptation Française, NATHAN, 1977.
- PERRE P.**, 1994, Le séchage du bois, Le bois matériau d'ingénierie, Editeur ARBOLOR-Nancy.
- PERRE P.**, 1998, Le séchage, passage obligatoire entre l'arbre et le matériau : Art ou science, premier colloque des centre régionaux d'enseignement spécialisé en agriculture, Cameroun.
- PITTET V.**, 1995, Effet mécanosportif observé sur le bois de faible épaisseur, GFR 30ème colloque annuel du groupe français de rhéologie, XIV1, pp. 325.
- RANTA-MAUNUS.**, 1990, Impact of mechano-sorptive creep to the long-term strength of timber, Holz als Roh-und Werkstoff, vol. 48, pp. 67-71.
- RANTA-MAUNUS.**, 1993, Rheological behaviour of wood in directions perpendicular to the grain, Materials and Structures, vol. 26, pp. 362-369.
- RICOLLEAU C.**, 1987, Bilan aéraulique dans un séchoir à bois ; conséquence sur les transferts, Thèse de l'Université de Poitiers.
- SHERWOOD T K.**, 1929, The drying of solids, Industrial and Engineering Chemistry, vol. 21 (1), pp. 12-16.
- SIAU J.F.**, 1984, Transport processes in wood, Springer series in wood science, Ed. SPRINGER VERLAG - Berlin.

**SVENSSON S., MARTENSSON A.**, 1999, Simulation of drying stress in wood ; Part 1 : comparaison between one-two-dimensional models, Holz als Roh-und Werkstoff, vol. 57, pp.129-136.

**TOEI R.**, 1985, Giants of Drying, Drying Technology, vol. 3 (1), pp. 1-14.

## **Nomenclature**



## Nomenclature des principaux symboles

$a$	Diffusivité thermique [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$A$	Surface totale d'échange [ $m^2$ ]
$B$	Largeur de planche [ $m$ ]
$C$	Concentration de la vapeur d'eau ou fraction massique [ $g \cdot g^{-1}$ ]
<i>Coeff</i>	Coefficient.
$C_p, C_v$	Chaleurs massiques à pression et à volume constant [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$C_v$	Concentration de la vapeur d'eau à la surface du bois [ $g \cdot g^{-1}$ ]
$C_\infty$	Concentration de la vapeur d'eau à la paroi du séchoir [ $g \cdot g^{-1}$ ]
$d_{moy}$	Distance moyenne entre le l'amas de bois et la paroi [ $m$ ]
$D$	Coefficient de diffusion [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$D_0$	Dimension de l'échantillon du bois à l'état anhydre [ $m$ ]
$D_s$	Dimension de l'échantillon du bois à l'état saturé [ $m$ ]
$e$	Épaisseur du bois [ $m$ ]
$E$	Module d'Young [ $N / mm^2$ ]
$F_m$	Flux masse de la vapeur d'eau [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]
$F_{mc}$	Flux masse de condensation [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]
$h_m$	Coefficient d'échange massique [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$h_T$	Coefficient de transport thermique [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$h_v$	Chaleur latente d'évaporation [ $J \cdot kg^{-1}$ ]
$h_{mc}$	Coefficient d'échange massique de condensation [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$H$	Taux d'humidité en base humide.
$HR$	Humidité relative %
$\vec{J}$	Flux-masse surfacique [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]
$J$	Complaisance du fluage
$k$	Perméabilité intrinsèque [ $m^2$ ]
$L$	Longueur de planche [ $m$ ]
$m$	Complaisance du fluage mécanosorptif
$M$	Masse $kg$

$M$	Masse molaire [ $kg \cdot mol^{-1}$ ]
$P$	Pression [bar]
$q$	Débit volumique [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]
$Q$	Flux de chaleur échangé à la surface du bois [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$R$	Constante des gaz parfaits [ $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ]
$R_b$	Rayon du lot de bois [ $m$ ]
$R_f$	Rayon du séchoir [ $m$ ]
$R_v$	Retrait volumique %
$R_D$	Retrait selon la direction du bois %
$S$	Surface [ $m^2$ ]
$T$	Température [°C ou K°]
$T_{ch}$	Température de chauffe [°C]
$T_{inf}$	Température ambiante [°C]
$t_{ch}$	Durée de la phase de chauffe [min]
$t_{préch}$	Durée de la phase préchauffage [ $h$ ]
$V$	Volume [ $m^3$ ]
$t_{vide}$	Durée de la phase de vide [min]
$t$	Temps [ $h$ ]
$W$	Teneur en eau base sèche [ $kg \cdot kg^{-1}$ ]

### **Lettres grecques**

$\alpha$	Coefficient du retrait %
$\beta$	Critère de qualité mécanique
$\mathfrak{S}_m$	Débit massique [ $kg \cdot s^{-1}$ ]
$\varepsilon$	Porosité volumique ou déformation
$\lambda$	Conductivité thermique [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\mu$	Viscosité dynamique [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]
$\rho$	Masse volumique [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$\sigma_{xx}$	Contrainte transverse [MPa]
$\tau$	Incrément du temps
$\tau$	Taux de remplissage du séchoir
$\phi$	Flux thermique surfacique $W \cdot m^{-2}$
$\Delta P_{reg}$	Régulation of vacuum [Pa]

### **Indice inférieurs**

atm	Atmosphérique
a	Air sec
cond	condensation
enc	Enceinte
éq	Equilibre
ext	Extérieur
fin	Final
f, f'	Flèche par rapport à la largeur et à la longueur de planche
fuite	Fuite de l'air du séchoir
g	Phase gazeuse
Gau	Gauchissement
ini	Initial
max	Maximal
o	Anhydre
P ou paroi	Paroi du séchoir
pompe	Pompe à vide
psf	Point de saturation de fibre
S	Saturé
sat	Saturation
surf	Surface
Tui	Tuilage
v	Vapeur
vide	Phase de vide
$\alpha$	Air humid (mélange d'air sec et de vapeur)

**Indice supérieurs**

el	Elastique
f	Fluage
ms	Mécanosorptif
r	Retrait
t	Température

**Opérateurs mathématiques**

-	Moyenne
$\nabla$	Gradient
$\nabla \cdot$	Divergence

## **Résumé**

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité du bois de chêne à la sortie du séchoir au travers de la définition des conditions de séchage optimales tant du point de vue mécanique que du point de vue durée totale du séchage.

Le travail est basé sur la mise en place d'un modèle décrivant les transferts de chaleur et de masse au cours du séchage sous vide discontinu auquel est couplé un modèle d'estimation du champ de contraintes.

Une étude de sensibilité sur le modèle mis en place permet de dégager des paramètres optimaux pour le contrôle du procédé. Les conditions ainsi proposées sont validées à l'aide d'expériences de séchage.

### **Mots clés**

Séchage sous vide discontinu, bois de chêne, Qualité du bois.

## **Abstract**

The aim of this work is the improvement of the dried oak wood quality through the definition of the optimal conditions for drying as well from the mechanical point of view as from the point of view of drying duration.

The work is based on the development of a model describing heat and mass transfer during the discontinuous vacuum drying coupled with a model describing the stress field.

A sensitivity study makes possible to define the optimal parameters for the process control. The optimal conditions obtained are validated through the drying experiments.

### **Key Words**

Discontinuous vacuum drying, Oak wood, Wood quality.