



HAL
open science

Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées

Romain Remond

► **To cite this version:**

Romain Remond. Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées. Engineering Sciences [physics]. ENGREF (AgroParis-Tech), 2004. English. NNT : . pastel-00001132

HAL Id: pastel-00001132

<https://pastel.hal.science/pastel-00001132>

Submitted on 31 Mar 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École Nationale du Génie Rural
des Eaux et des Forêts



Unité mixte INRA - ENGREF - UHP Nancy 1
(UMR n° 1093)

Thèse

Présentée

Pour l'obtention du grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences forestières et du bois

Par

Romain RÉMOND

**APPROCHE DÉTERMINISTE DU SÉCHAGE DES AVIVÉS DE
RÉSINEUX DE FORTES ÉPAISSEURS POUR PROPOSER
DES CONDUITES INDUSTRIELLES ADAPTÉES**

Soutenue publiquement le 10 décembre 2004

à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy,

devant le jury composé par Messieurs :

Joseph GRIL
Julien ANDRIEU

Directeur de Recherche, CNRS, Montpellier
Professeur, UCB, Lyon

Rapporteur
Rapporteur

Éric MOUGEL
Gilles PEIX
Patrick PERRÉ

Maître de Conférence, UHP, Nancy
Maître de Conférence (HDR), INSA, Lyon
Professeur, ENGREF, Nancy

Codirecteur de thèse
Président
Directeur de thèse

Daniel ALÉON

Ingénieur, CTBA, Paris

Membre invité

À mes parents
À ma grand-mère
À Babeth

Je dédie ce travail

Avant-propos et remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au laboratoire d'étude et de recherche sur le matériau bois (LERMaB), sur deux sites géographiques : l'ENSTIB (Epinal) puis l'ENGREF (Nancy).

Je souhaite tout d'abord remercier le professeur Patrick PERRÉ pour avoir accepté de diriger cette thèse. Il m'a permis de travailler sur un sujet passionnant utilisant de beaux outils et de « la belle physique ». Patrick PERRÉ a toujours été à l'écoute des envies de son thésard, et il m'a fait partager sa passion pour la forêt, le matériau bois et pour la découverte des trésors de la nature. Ses grandes qualités scientifiques ainsi que la compétence de son encadrement ont pour moi valeur de modèle. J'ai pu, également, apprécier ses qualités humaines qui m'ont permis de réaliser cette thèse avec beaucoup de plaisir.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Éric MOUGEL et à Joëlle PASSARD pour la qualité de leur coencadrement. Leur aide m'a été précieuse ainsi que leurs conseils. Je les remercie également de m'avoir fait partager leur passion du métier d'enseignant chercheur, et de m'avoir préparé à l'après thèse.

Mes remerciements vont à M. Gilles PEIX président du jury de thèse, à mes rapporteurs de thèse, Joseph GRIL et Julien ANDRIEU, ainsi qu'à Daniel ALÉON pour avoir consacré du temps à l'examen de ce travail. Je suis sensible à l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à mon jury de thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude !

Dans l'atelier du LERMaB la matière est transformée pour réaliser tous les dispositifs originaux nécessaires à nos essais expérimentaux. J'ai passé de nombreuses heures à cet endroit, toujours avec un grand plaisir grâce aux personnes qui s'y trouvent. Un grand merci à Michel, François, Jean-claude, et Jean-Jacques (Enstib) pour leur sympathie et leur aide.

Je remercie également les autres permanents du laboratoire et mes amis thésards pour leur soutien moral et leur aide. Ainsi, un grand merci à Eric Badel, Anélie, Isabelle, Mme Hubert, Marie-laure, Riad, Claude, Poliana, Jérémie, Maya, Mickael, Cathy, Clément et Vincent. Une attention particulière à Ricardo, chilien, qui était mon « compagnon de jeu » avec les rayons X. Nous avons partagé des moments de doutes mais aussi des moments magiques et inoubliables.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu et aidé dans ce travail me permettant ainsi de garder un excellent souvenir de ces trois années.

Enfin, merci à mes proches, à Nadja, ma compagne. Par leur compréhension, leur aide et leur soutien permanent, j'ai pu, pendant ces trois années, m'investir totalement dans ce travail.

Sommaire

Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Approches empirique et scientifique du séchage des avivés de bois</u>	7
<u>Introduction</u>	9
1 <u>La difficulté du séchage du bois et son approche empirique</u>	10
1.1 L'eau dans le bois	10
1.2 La complexité du séchage	11
1.2.1 Les défauts apparaissant au cours du séchage	13
1.2.2 Influence de l'essence de bois	15
1.2.3 Les hétérogénéités dans la pile	16
1.2.4 L'épaisseur de la planche	17
1.3 Approche empirique du séchage	19
1.3.1 La conduite du séchage artificiel	19
1.3.2 Utilisation des nouvelles technologies	21
1.3.3 Le séchage d'avivés de fortes épaisseurs et ses alternatives	23
2 <u>Approches scientifiques du séchage des avivés</u>	24
2.1 Expérimentation et Instrumentation	24
2.1.1 Mesure du champ de teneur en eau dans une planche de bois	24
2.1.2 Évaluation des contraintes de séchage	31
2.2 Théorie du séchage du bois	34
2.2.1 Formulations physique et mécanique	34
2.2.1.a <i>Les transferts couplés de chaleur et de masse</i>	34

2.2.1.b	<i>Le comportement mécanique du bois</i>	35
2.2.2	Modélisation numérique du séchage	41
2.2.2.a	<i>Le principe du calcul numérique</i>	42
2.2.2.b	<i>Simulation des transferts couplés</i>	42
2.2.2.c	<i>Simulation des contraintes de séchage</i>	43
2.2.2.d	<i>De la planche à la pile de planches</i>	44
	<u>Conclusion</u>	46
	<u>Chapitre II : Développement d'outils expérimentaux</u>	49
	<u>Introduction</u>	51
1	<u>Mesure de profils d'humidité par atténuation de rayons X</u>	52
1.1	Le matériel expérimental	52
1.1.1	Le séchoir du site ENGREF	52
1.1.2	Le dispositif de rayonnement X	54
1.2	La mesure du profil d'humidité dans la planche	57
1.2.1	La méthodologie d'acquisition	57
1.2.2	Le choix de la dureté et de l'intensité du rayonnement X	60
1.2.3	Les perturbations de la mesure	61
1.3	Quelques résultats	64
1.3.1	Les conditions expérimentales et le matériel végétal des essais	64
1.3.2	Résultats et discussion	64
1.3.2.a	<i>Débit sur quartier</i>	64
1.3.2.b	<i>Débit sur dosse</i>	68
2	<u>Approche instrumentale de la qualité du séchage</u>	71
2.1	Le séchoir du site ENSTIB	71
2.2	Les mesures sur la planche	72
2.3	Quelques résultats	75

2.3.1	Les transferts dans la planche et le retrait	75
2.3.2	La qualité du séchage	76
	<u>Conclusion</u>	79
	ANNEXE II.1. Quelques photos du montage	81
	ANNEXE II.2 . Organigramme du programme de traitement des données	83
	ANNEXE II.3. Méthode du <i>Slicing test</i>	85
	<u>Chapitre III : L’outil numérique</u>	87
	<u>Introduction</u>	89
1	<u>Mise en équations des phénomènes mécaniques en séchage du bois</u>	90
1.1	Hypothèses physiques	90
1.1.1	Énumération des hypothèses physiques	90
1.1.2	Quelques remarques sur les hypothèses adoptées	93
1.2	Modèles de comportement du bois	96
1.3	Équilibre mécanique	99
2	<u>Résolution par méthode numérique</u>	101
2.1	Discrétisation et résolution des équations de la mécanique	101
2.1.1	Discrétisation spatiale	101
2.1.2	Discrétisation temporelle	103
2.1.3	Résolution du système linéaire :	109
2.2	Ajout du module mécanique au code <i>TransPore</i>	110
3	<u>Le code <i>TransPore</i>, outil d’aide à la compréhension</u>	113
3.1	Importance de l’effet différé du bois dans les contraintes de séchage	113
3.2	Thermohydroactivation du fluage viscoélastique	116
	<u>Conclusion</u>	119
	Nomenclature	120

ANNEXE III.1 : Formulation des transferts couplés	122
ANNEXE III.2 : Paramètres physiques entrés dans le code	128
<u>Chapitre IV : Du modèle de connaissance à l’outil opérationnel</u>	129
<u>Introduction</u>	131
<u>1 Évaluation de paramètres de transfert par comparaison des résultats théoriques et expérimentaux</u>	132
1.1 Confrontation de la version actuelle de <i>TransPore</i> avec les résultats expérimentaux	132
1.2 Évaluation d’une nouvelle expression de la perméabilité relative liquide	134
1.3 Validation de cette nouvelle expression	137
<u>2 Confrontation des résultats simulés et mesurés pour deux épaisseurs usuelles</u>	139
2.1 Le matériel végétal et les conditions de séchage	139
2.1.1 Le matériel végétal	139
2.1.2 La conduite du séchage	140
2.2 Confrontation des résultats expérimentaux et simulés	141
2.2.1 Valeurs des paramètres physiques entrés dans le code	141
2.2.2 Comportement du code <i>TransPore</i> vis-à-vis des transferts	143
2.2.3 Comportement du code vis à vis de la mécanique	148
<u>Conclusion</u>	154
ANNEXE IV.1 : La perméabilité relative	156
ANNEXE IV.2 : Débit des planches	157
<u>Chapitre V : Développement de tables de séchage adaptées aux fortes épaisseurs</u>	159
<u>Introduction</u>	161
<u>1 <i>TransPore</i> outil d’aide à la compréhension du séchage des avivés de fortes épaisseurs</u>	162
1.1 Du champ d’humidité aux contraintes internes pour 2 épaisseurs différentes	162

1.2	Conséquences de l'arrêt du séchage à une humidité moyenne encore élevée	167
2	<u>TransPore</u> outil de prédiction et d'aide à la décision	171
2.1	Choix d'une table de séchage	171
2.2	Développement de nouvelles conduites de séchage	178
2.2.1	Améliorations de conduites existantes	178
2.2.2	Séchage avec des conditions oscillantes	180
	<u>Conclusion</u>	184
	<u>Conclusion générale</u>	185
	<u>Références bibliographiques</u>	191

Introduction générale

Le bois était présent dès les premiers pas de l'humanité, et l'est encore pour nous accompagner dans notre évolution perpétuelle. Le contexte actuel en matière d'environnement stimule à nouveau son utilisation, après quelques décennies où l'homme des temps modernes a cherché à créer lui-même de nouveaux matériaux. Thibault et Chanson (1992) ont remarqué à ce sujet : « *on a vu apparaître les composites à fibres, privilégiant les propriétés dans certaines directions où les sollicitations sont plus fortes. En parallèle, des matériaux à structure en nid d'abeille sont utilisés pour créer une rigidité à faible densité tout en améliorant l'amortissement et l'isolation. Et si l'on combine ces deux approches pour optimiser encore mieux les pièces à double fonction on finit par recréer le bois !* ». Un des rôles de la recherche actuelle sur le bois est d'en faire un matériau d'avenir, par une meilleure connaissance des propriétés de ce biomatériau en science de l'ingénieur et par l'élaboration de nouveaux procédés qui facilitent sa mise en œuvre. C'est ainsi que l'on a vu se développer une série de travaux basés sur l'approche déterministe afin de modéliser le comportement de ce matériau soumis à diverses situations.

Cet objectif est rendu particulièrement difficile par la structure complexe du bois, sa variabilité très importante au sein d'un même arbre ou entre arbres, en raison des conditions très différentes auxquelles il peut être exposé (climat, situation dans le peuplement, station, agressions diverses, etc.), mais aussi du patrimoine génétique propre à chaque essence. Le bois est un ensemble de tissus végétaux à parois lignifiées, résultant du fonctionnement, vers l'intérieur, de l'assise génératrice libéroligneuse. C'est un matériau poreux, hygroscopique, anisotrope, avec trois directions matérielles : la direction longitudinale est parallèle à l'axe du tronc, dans le plan transverse on définit la direction radiale selon un rayon de la section et la direction tangentielle selon la tangente aux accroissements annuels (Fig.1). L'aubier de l'arbre sur pied a pour tâche de véhiculer, depuis le sol, d'importantes quantités d'eau et de sels minéraux (sève brute) transpirées par les feuilles ou les aiguilles et nécessaire à leur activité physiologique. Son humidité varie de 80 % à 200 %, pour un résineux, juste après l'abattage. Le duramen (appelé aussi bois parfait) quant-à lui joue le rôle de soutien mécanique et de réserve. Son humidité est en générale comprise entre 40 % et 80 % après abattage.

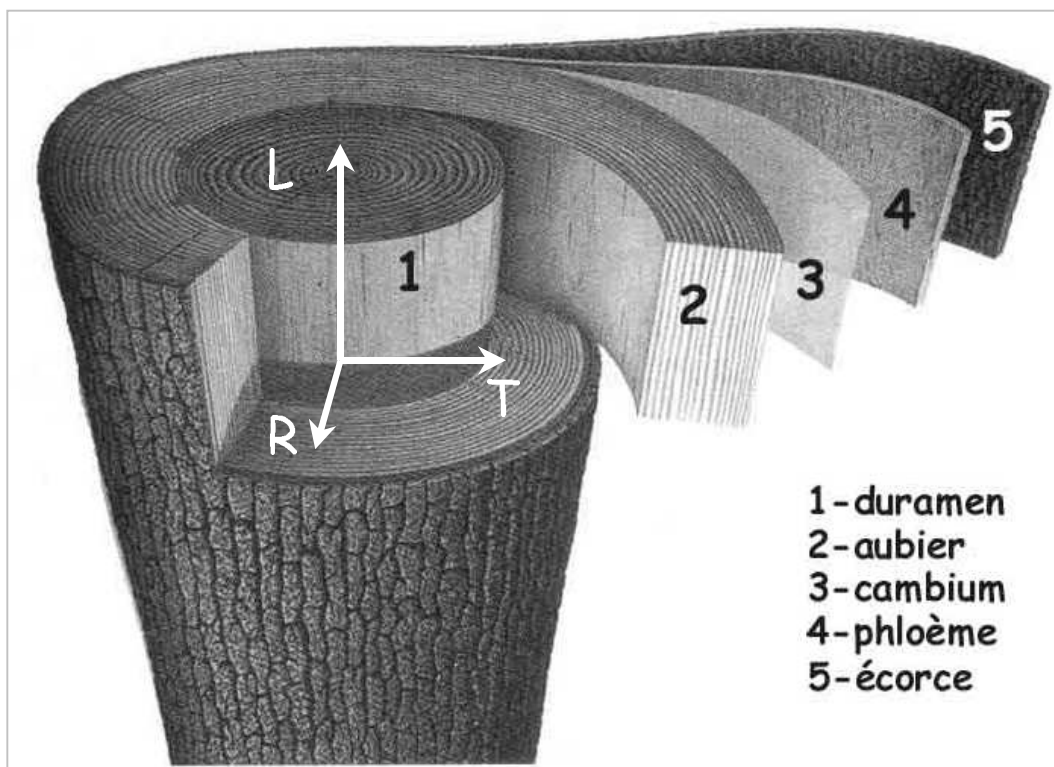


Figure 1. Structure générale du tronc (Extrait de « la Nature » cité par Bary-lenger (1993))

L'exploitation forestière alimente en bois d'œuvre les industries de première et seconde transformation, et en bois de trituration les industries papetières et du panneau. Une partie importante du bois de résineux français est utilisée dans la charpente traditionnelle dont la plus grande partie (80 % environ) est constituée d'avivés d'épaisseur supérieure à 80 mm. En France, ces avivés sont généralement commercialisés à une humidité proche de l'état vert, malgré l'exigence technique des *documents techniques unifiés* (DTU.31.1) qui préconise un bois de charpente à une humidité inférieure à 25 %. Notons que les scieries allemandes et autrichiennes sont capables de fournir des bois secs (20 % voir en dessous) ; mais ces entreprises sont de grandes tailles et possèdent un fond de roulement suffisant pour se permettre d'avoir un stock de bois sec. Ces avivés sont généralement séchés dans des séchoirs artificiels à air chaud climatisé. À l'inverse, les scieries françaises, majoritairement des PME, travaillent sur liste et leur production s'adapte à la demande du client. Par conséquent, le séchage des fortes épaisseurs représente un frein important et ne permet pas de répondre aux impératifs du marché.

Voici une liste non exhaustive des nombreux problèmes que peut provoquer la pose de bois vert :

- ✓ des **fissures** pourront apparaître à la surface du bois lorsque la planche sèche et se rétracte sur le lieu de pose. Elles sont gênantes esthétiquement (Fig.2), nuisent à la solidité et à la rigidité de l'ouvrage ou encore représentent des foyers potentiels de pourriture pour des pièces exposées à des apports réguliers d'eau ;



Figure 2. Fentes de surface sur une poutre dans des combles aménagés.

- ✓ les pièces de bois vont se **déformer sur le lieu de pose** avec le retrait (vrillage, tuilage, gauchissement) (Fig.3). Les avivés assemblés vont glisser les uns par rapport aux autres en provoquant des grincements, la cassure des joints de colle, des problèmes d'étanchéité, etc ;

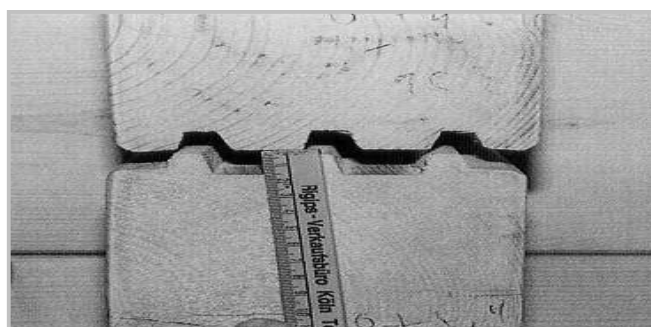


Figure 3. Déformation des pièces de bois empilées

- ✓ les avivés doivent être **surdimensionnés** d'après les normes de calculs en vigueur (CB71, Eurocode5), pour limiter la **déformation** excessive des pièces encore très humides et sous charge **avec le temps** (fluage viscoélastique et mécanosorptif) ;
- ✓ les **insectes xylophages** et les **champignons lignivores** vont pouvoir attaquer le bois, matière ligno-cellulosique, lorsque son humidité est supérieure à 12 % et 22 % respectivement. Ces attaques peuvent être limitées par l'utilisation de produits de préservation mais ceux-ci sont coûteux et généralement polluants.

Ces désagréments pèsent sur l'utilisation du bois dans la construction française et conduisent les maîtres d'œuvre à se tourner vers d'autres matériaux. Les entreprises de construction, quant à elles, sont amenées à commander des avivés secs aux scieries allemandes ou autrichiennes pour répondre aux réglementations nationales et européennes.

Dans un contexte de développement durable, ce matériau possède trois atouts majeurs. Produit de la forêt, le bois est un matériau renouvelable. Sa constitution biochimique met en évidence sa capacité à stocker le carbone, durant le développement de l'arbre sur pied et durant la vie du matériau de construction et, du point de vue énergétique, le bois permet de déstocker de l'énergie solaire en respectant au mieux le cycle du carbone. C'est pourquoi la relance de son utilisation est devenue un objectif majeur. Une collaboration a été mise en place entre un centre technique (CTBA^[1]), un industriel (Scierie Friederich S.A) et notre laboratoire de recherche (LERMaB UMR INRA/ENGREF/UHP 1093) dans le but d'améliorer les connaissances sur le séchage des bois épais, et tenter de fournir aux scieurs français la possibilité de sécher vite et bien ces avivés. Ce projet a reçu le soutien et le concours financier du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (Convention DERF N°61.45.39/01), de la Région lorraine et de l'ADEME ^[2].

C'est dans ce cadre que se situe notre étude qui a pour ambition d'améliorer les connaissances sur le séchage des fortes épaisseurs de résineux par une approche descriptive et déterministe. Ce travail doit permettre de comprendre l'effet de l'épaisseur des planches sur la qualité de leur séchage, de pouvoir choisir une conduite plutôt qu'une autre pour sécher plus rapidement ou avec une meilleure qualité des avivés de fortes épaisseurs. Le code *TransPore*, développé par Patrick Perré, de par sa capacité à simuler les transferts couplés de chaleur et de masse dans une planche de bois, est placé au cœur de notre approche.

Dans une première partie bibliographique, nous montrons que sécher vite et bien des avivés est un véritable challenge. Pour illustrer ce propos il est décrit comment cette difficulté est abordée par les industriels d'une part et les scientifiques d'autre part. Ensuite, notre démarche scientifique, qui s'articule en quatre parties schématisées sur la figure 4, est présentée :

- ✓ une approche descriptive du séchage et de l'influence de l'épaisseur des planches est effectuée aux moyens d'outils expérimentaux faisant appel à une métrologie sophistiquée (mesure en continu de l'épaisseur, de la température, suivi des fissures par imagerie et des profils d'humidité par atténuation des rayons-X) ;

- ✓ des modifications sont apportées à l'outil numérique *TransPore* en greffant une unité de calcul des contraintes de séchage. Celui-ci est capable d'estimer le comportement mécanique du bois en rapport avec l'évolution des champs d'humidité dans la planche, et ainsi de donner des informations sur la qualité du séchage de la planche ;
- ✓ les données collectées par l'outil expérimental sont confrontées avec les résultats simulés par *TransPore*, pour d'une part évaluer une expression de la perméabilité relative liquide, et d'autre part valider ses prédictions ;
- ✓ enfin, il est démontré que l'utilisation de l'outil numérique permet de répondre aux enjeux de ce travail.

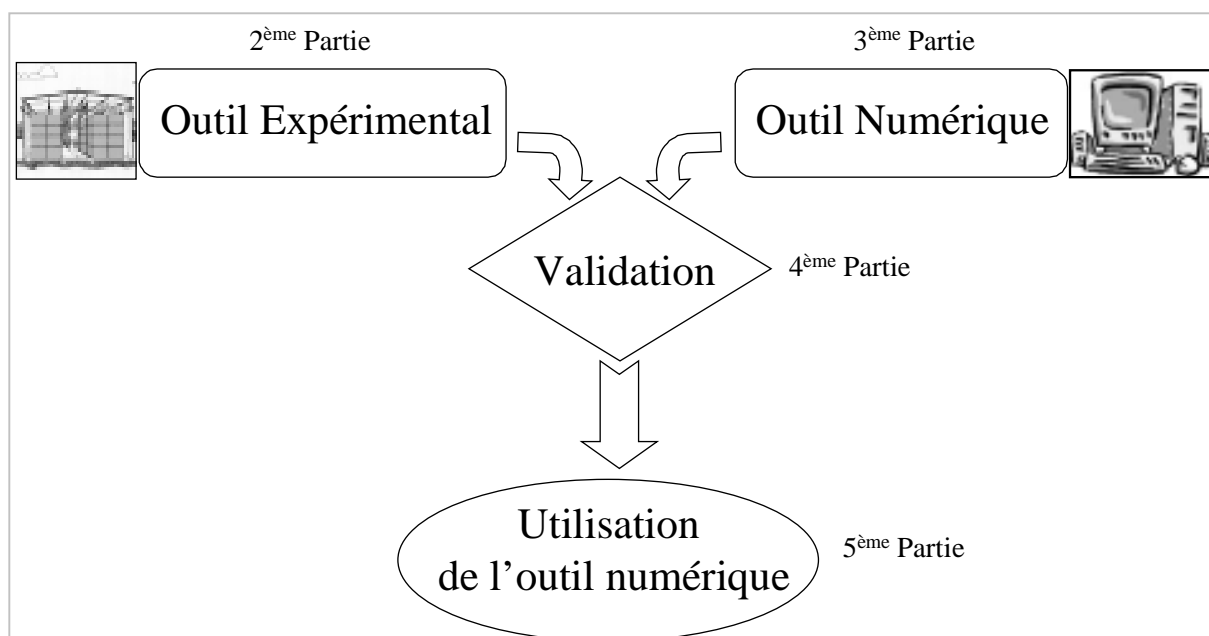


Figure 4. Schématisation du plan de la thèse

Normes : DTU 31.1 « Constructions en bois » -Charpentes et escaliers (cf.NF P21-203) ; **CB71** (juin 1984) « Charpentes en bois »-réalisations suivant les contraintes admissibles ; **Eurocode 5** (2005-2008) : réglementation européenne, « Bois structure » - règles aux états limites

^[1] Centre Technique du Bois et de l'Ameublement ; ^[2] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

I- Approches empirique et scientifique du séchage des avivés de bois

<u>Introduction</u>	9
1 <u>La difficulté du séchage du bois et son approche empirique</u>	10
1.1 L'eau dans le bois	10
1.2 La complexité du séchage	11
1.2.1 Les défauts apparaissant au cours du séchage	13
1.2.2 Influence de l'essence de bois	15
1.2.3 Les hétérogénéités dans la pile	16
1.2.4 L'épaisseur de la planche	17
1.3 Approche empirique du séchage	19
1.3.1 La conduite du séchage artificiel	19
1.3.2 Utilisation des nouvelles technologies	21
1.3.3 Le séchage d'avivés de fortes épaisseurs et ses alternatives	23
2 <u>Approches scientifiques du séchage des avivés</u>	24
2.1 Expérimentation et Instrumentation	24
2.1.1 Mesure du champ de teneur en eau dans une planche de bois	24
2.1.2 Évaluation des contraintes de séchage	31
2.2 Théorie du séchage du bois	34
2.2.1 Formulations physique et mécanique	34
2.2.1.a <i>Les transferts couplés de chaleur et de masse</i>	34
2.2.1.b <i>Le comportement mécanique du bois</i>	35
2.2.2 Modélisation numérique du séchage	41
2.2.2.a <i>Le principe du calcul numérique</i>	42
2.2.2.b <i>Simulation des transferts couplés</i>	42
2.2.2.c <i>Simulation des contraintes de séchage</i>	43
2.2.2.d <i>De la planche à la pile de planches</i>	44
<u>Conclusion</u>	46

Introduction

Les opérations effectuées pour passer de l'arbre sur pied à l'avivé brut de sciage apportent de la valeur ajoutée au bois. Par conséquent, le séchage doit être le plus court possible car ce dernier entraîne, entre autres inconvénients, une immobilisation du capital de l'entreprise. De plus, les défauts apportés par le séchage doivent être minimisés pour ne pas augmenter le coût du procédé. Les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel qui permet de maîtriser les conditions hygrothermiques de l'air séchant, la vitesse de l'air et/ou la pression gazeuse à imposer à une pile de bois. Malheureusement pour les conducteurs de séchoir, trouver les conditions permettant d'obtenir un séchage rapide et de qualité est une véritable gageure. Aussi, est-il apparu important de consacrer la première partie de ce chapitre à l'approche empirique du séchage artificiel et notamment à la technologie mise en œuvre pour sécher les avivés de fortes épaisseurs.

Toutefois, le séchage est un procédé industriel dont les mécanismes physiques mis en jeu sont extrêmement complexes. Seule une démarche scientifique et déterministe peut permettre d'appréhender cette complexité. En conséquence, dans une seconde partie, sont décrits les travaux permettant de mesurer la teneur en eau du bois et les contraintes internes. Ces grandeurs physiques fournissent des informations indispensables pour une meilleure compréhension du séchage en rapport avec la qualité du produit fini. À partir des résultats expérimentaux obtenus, de nombreux auteurs ont proposé des formulations pour modéliser les phénomènes physiques liés au séchage. Une revue bibliographique non exhaustive de ces travaux est par la suite présentée. Pour amener le bois vert à l'humidité finale compatible avec son utilisation, il existe une infinité de conduites de séchage possible, mais toutes ne garantissent pas la même qualité sur le produit fini. Optimiser les conduites de séchage ne pourra se faire sans l'aide de l'outil numérique. Nous terminerons donc ce chapitre en présentant des travaux qui utilisent les modèles précédents pour simuler numériquement le séchage d'une ou de plusieurs planches de bois dans l'ultime but d'optimiser les conduites de séchage.

1 La difficulté du séchage du bois et son approche empirique

1.1 L'eau dans le bois

L'eau se présente dans le bois sous deux formes : l'**eau libre** qui remplit les vides cellulaires et est retenue par les mécanismes de pression capillaire, l'**eau liée** qui est retenue au niveau des parois cellulaires grâce aux propriétés hydrophiles des macromolécules de cellulose, par ponts hydrogène ou par liaisons de type Van der Waals. Lorsque la quantité d'eau liée sature les parois cellulaires du bois, sans qu'il y ait de l'eau libre dans les lumens, le point de saturation des fibres (**PSF**) est atteint. Au-delà de cette limite, l'eau remplit les vides cellulaires et devient de l'eau libre.

La **teneur en eau** du bois est définie comme la masse d'eau présente dans le bois rapportée à sa masse anhydre. Le bois **anhydre** est, par convention, l'état qui est obtenu après un séjour dans une étuve à 103 °C jusqu'à stabilisation de la masse. Enfin, le bois étant un matériau **hygroscopique**, sa teneur en eau va s'équilibrer avec les conditions de l'air humide avec lequel il est en contact. On dira que le bois a atteint sa **teneur en eau d'équilibre**.

Les variations de teneur en eau, dans le domaine hygroscopique du bois (teneur en eau du bois comprise entre l'état anhydre et le PSF), entraînent des variations dimensionnelles. À l'échelle microscopique, les polymères amorphes constituant les parois cellulaires du bois (lignine, hemicellulose, une partie de la cellulose) perdent des molécules d'eau liées par des liaisons hydrogène à ces polymères. Ces enchevêtrements de polymères vont alors se rapprocher les uns des autres, c'est le **retrait**. Le processus inverse s'appelle le **gonflement**. Lorsque la teneur en eau est supérieur au PSF, les variations d'humidité n'entraînent pas de changement de volume.

Le séchage d'un échantillon de bois consiste à retirer une partie de l'eau qu'il contient pour l'amener à une teneur en eau finale compatible avec son utilisation. Ce processus, simple à concevoir, n'en demeure pas moins très complexe.

1.2 La complexité du séchage

Pour sécher un matériau, il est nécessaire d'apporter de l'énergie pour évaporer l'eau qu'il contient, et d'évacuer la vapeur qui en résulte. Traditionnellement, l'apport de chaleur se fait par convection forcée à l'aide d'un courant d'air dont le flux et la température sont contrôlés. La vapeur d'eau sortant du bois est évacuée par ce même courant d'air, dont le pouvoir évaporatoire est également contrôlé. Des **transferts de masse** prennent naissance du cœur vers la surface de la planche sous différentes formes : la migration capillaire de l'eau libre, la diffusion de la vapeur d'eau au niveau des vides cellulaires et la diffusion de l'eau adsorbée au niveau des parois, pour les parties de l'échantillon dans le domaine hygroscopique. La diffusion est un processus beaucoup plus lent que la migration capillaire. Parallèlement, dans les séchoirs à convection forcée, un transfert de chaleur s'effectue de la surface vers le cœur de la planche.

Dans un milieu poreux et hygroscopique, trois phases de séchage peuvent être distinguées : une première période à vitesse de séchage constante, tant que la surface est alimentée en eau par les forces capillaires (Fig.I.1), une deuxième période à vitesse décroissante lorsque la surface entre dans le domaine hygroscopique (Fig.I.2) et une dernière période caractérisée par une chute plus marquée de la vitesse lorsque toute l'eau libre a disparu.

Au cours de ce processus le matériau est susceptible de subir de nombreuses altérations, préjudiciables à la qualité du produit fini.

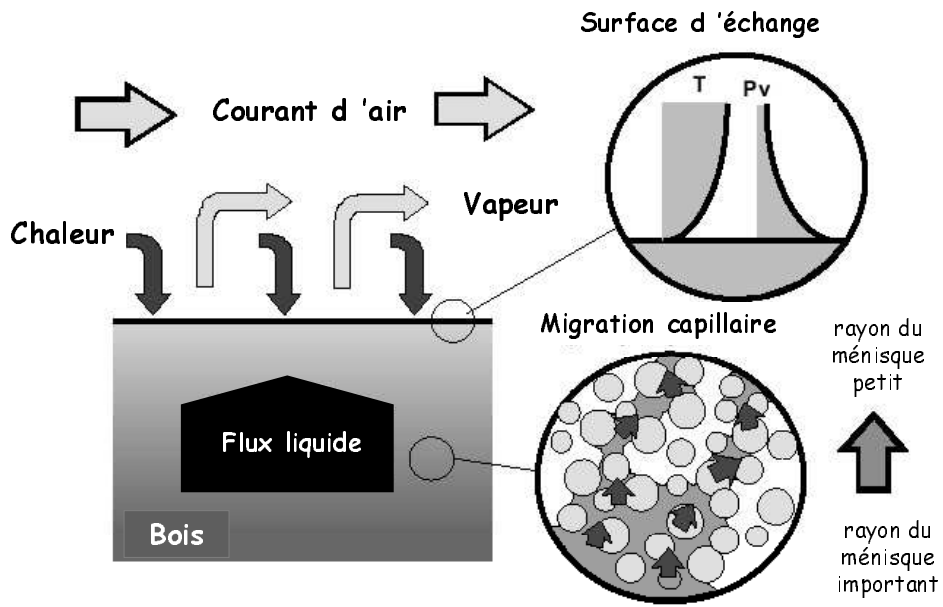


Figure I.1. Première phase de séchage. Migration capillaire de l'eau libre. [Perré (1999)]

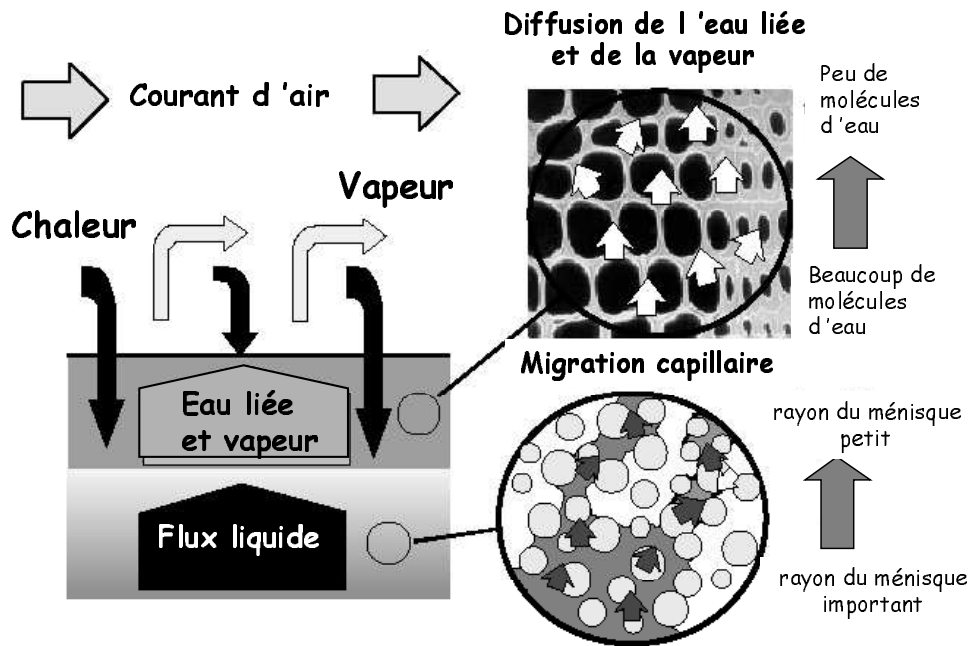


Figure I.2. Seconde phase de séchage : une couche sèche se développe à la périphérie du matériau. [Perré(1999)]

1.2.1 Les défauts apparaissant au cours du séchage

- Les contraintes et les fentes de séchage

Le bois étant un matériau hygroscopique, la variation d'humidité en dessous du point de saturation des fibres (domaine de l'eau liée) génère des variations dimensionnelles dans le matériau. Durant le séchage, un profil d'humidité parabolique se forme dans l'épaisseur, la périphérie séchant plus rapidement va se rétracter avant la partie centrale de la planche ; à cela s'ajoutent les variations de retrait entre le bois d'été et le bois de printemps ou entre le bois de réaction et le bois normal. Ces retraits localisés vont provoquer un champ de déformation dans le matériau qui n'est généralement pas cinématiquement admissible. Pour maintenir la forme propre de la section, des contraintes vont alors apparaître dans la planche, et évoluer au cours du séchage avec le champ de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. L'apparition de ces contraintes s'accompagne de déformations complémentaires pour établir un champ de déformation total cinématiquement admissible.

Au début du séchage, la surface est sous traction et le cœur de la planche sous compression. À la fin du séchage, la mécanique différée du bois est responsable de l'inversion des contraintes internes. Le cœur va être sous traction et la surface sous compression (Fig.I.3). Lorsque les contraintes de séchage dépassent la limite que peut supporter le bois, les tissus vont se rompre au niveau des points de fragilité offerts par la structure anatomique (rayons ligneux, limites de cernes, etc.). Des fentes en surface apparaîtront, et/ou des fentes à cœur après l'inversion des contraintes, lorsque l'air est trop sec au début du séchage. D'autres en bout de planche se forment lorsque les extrémités sèchent avant la partie centrale. Enfin, lorsque la moelle est contenue dans la planche, l'anisotropie du retrait peut conduire également à la formation de fentes sur de grandes longueurs.

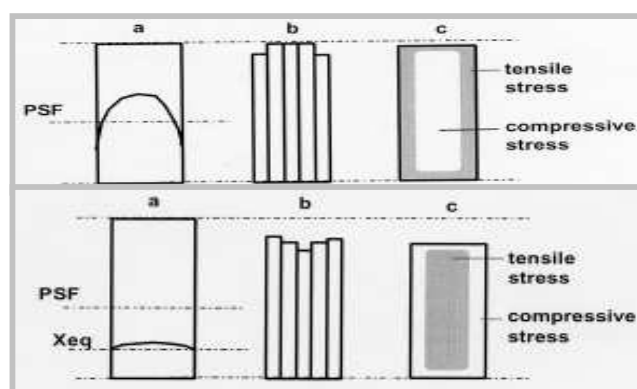


Figure I.3. Découpe d'une section de bois par la pensée (b) pour voir l'effet de la déformation sur l'état des contraintes (c). -Schéma supérieur : apparition des contraintes (c) suite aux retraits localisés (a, b). -Schéma inférieur : inversion des contraintes (c) dues à l'effet différé du bois. [Perré (1999)]

- Les déformations au niveau de la planche

Le retrait étant une propriété fortement anisotrope, la position de la planche dans la grume et l'orientation du fil du bois peuvent contraindre la planche à se déformer au cours du séchage (Fig.I.4). Nous remarquerons que la sévérité du séchage n'est pas responsable de ces déformations. Au contraire une conduite de séchage utilisant de manière adéquate l'activation thermique et hydrique du fluage viscoélastique [Perré (2001)] ou la mécanosorption [Salin (2003), Riehl and Welling (2003)] peut relaxer les contraintes et diminuer ces déformations.

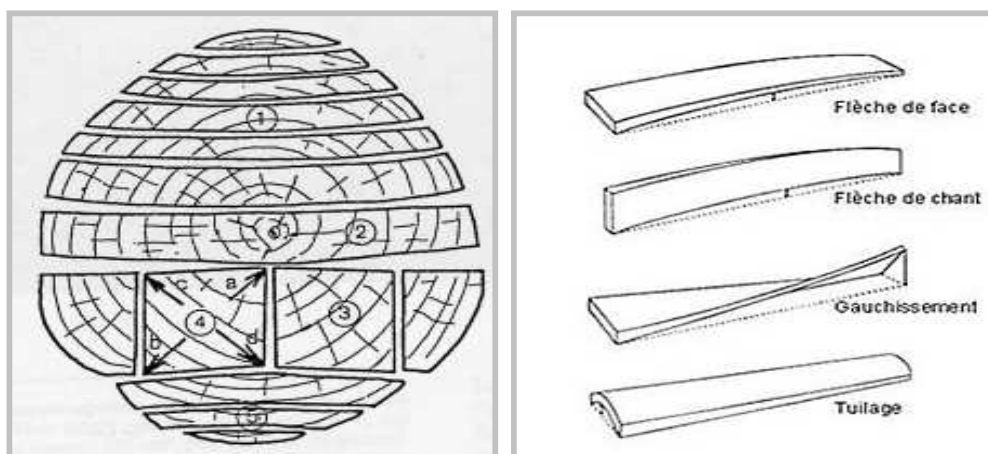


Figure I.4. Déformations dues au retrait du bois au cours du séchage selon la place de la planche dans la grume.[Joly et More-Chevalier (1980)] et selon la direction du fil du bois [Aléon et al. (1990)]

- Les autres défauts plus spécifiques

Des problèmes plus spécifiques à certaines essences peuvent apparaître tels que :

- ✓ le **collapse**. Il est caractérisé par des effondrements cellulaires localisés dus à des pressions capillaires trop grandes s'exerçant sur les parois. Ce problème intervient lorsque la température est trop élevée et le bois encore vert ; [Demagnet et Morlier (2000)]
- ✓ la **cémentation**. Elle est expliquée par un dépôt de composés solubles à la surface du bois avec l'évaporation de l'eau [Rémond (2001), Perré (2003)] qui diminuerait très fortement la perméabilité du bois. Le champ d'humidité de la planche reste alors figé à un même état, tout le long du processus ;
- ✓ Des **colorations superficielles**. Elles apparaissent en présence d'oxygène dans l'atmosphère, avec une température faible et une humidité élevée (bleuissements des résineux, colorations du chêne par les tanins) [Ananias et al. (2001)].

1.2.2 Influence de l'essence de bois

Le patrimoine génétique de l'arbre lié au type d'essence permet la formation d'un système vasculaire spécifique pour véhiculer la sève brute des racines vers la cime de l'arbre et la sève élaborée dans le sens opposé. Certaines essences de résineux présentent un épaississement de la paroi primaire qui forme un torus à l'aplomb du canal de la perforation des punctuations (Fig.I.5).

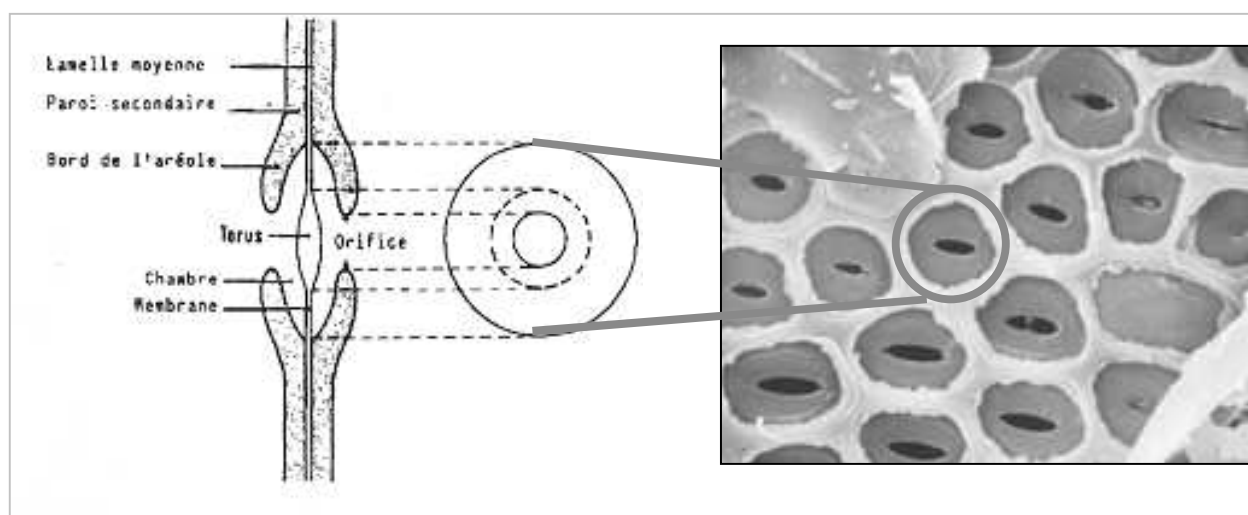


Figure I.5. Ponctuation aréolée intervasculaire (face radiale) (gauche [Keller (1994)]).

Lorsque l'une des trachéides est envahie par du gaz, une interface gaz-liquide se forme autour du torus et les forces capillaires vont le plaquer contre la face opposée de la ponctuation. Cette propriété de l'arbre est utilisée pour isoler les trachéides contenant du gaz afin de protéger sa colonne d'eau ascendante et d'éviter les problèmes d'embolie. Le même phénomène apparaît au cours du séchage lorsque l'eau libre est retirée des planches aubieuses de ces essences, ce qui diminue leur perméabilité transversale et donc augmente la durée du séchage [Siau (1984), Perré (2003)].

Pour les feuillus, des thylles (Fig.I.6), de la gomme, des extractibles peuvent apparaître au moment de la duraminisation, pour rendre le bois plus résistant face aux attaques fongiques et aux insectes. Leurs présences diminuent fortement la perméabilité liquide et gazeuse du bois et ralentissent ainsi le séchage des planches de duramen. Par exemple, pour amener de 50 % à 12 % des sciages de 27 mm d'épaisseur dans un séchoir à air chaud climatisé classique, il faut environ 20 jours pour du chêne (essence avec des extractibles et des thylles) et seulement 3 jours pour du sapin.

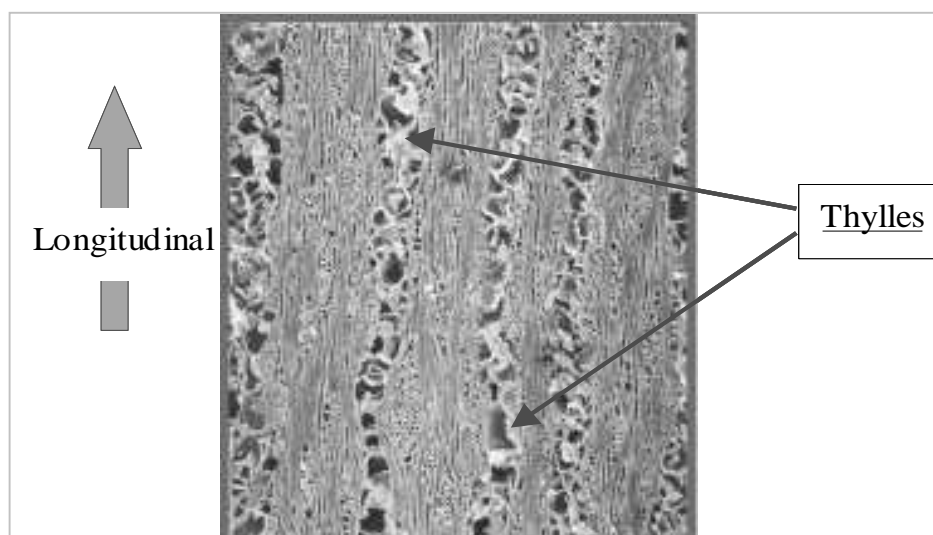


Figure I.6. Envahissement des vaisseaux du bois d'Arofy par des thylles, émis au travers des punctuations des parois cellulaire. [Rémond (2001)].

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, celles-ci sont variables d'une essence à l'autre selon les caractéristiques physiques et anatomiques de l'essence. Par exemple, des coefficients de retrait transverses importants engendreront un niveau de contrainte mécanique élevé ; des rayons ligneux larges (chêne, hêtre) offrent des points de fragilité pour initier le départ de fentes (Tableau.I.1).

Tableau I-1. Quelques grandeurs caractéristiques pour différentes essences [Nepveu (1994)]

	Concentration en fibres	Concentrations en rayons ligneux	Masse volumique (Kg/m ³)	Retrait volumique	Taux d'extrait à l'eau chaude
Sapin	90 %	10 %	460	12.6 %	1.3 %
Epicéa	95 %	5 %	450	12.4 %	1.6 %
Chêne	49 %	23 %	685	16.3 %	12 %
Hêtre	37 %	27 %	720	20 %	1.9 %

1.2.3 Les hétérogénéités dans la pile

Dans une pile, les planches sont de densité, de débit, d'humidité initiale très variables et par conséquent leur séchage sera différent tant au niveau des transferts qu'au niveau de leur comportement mécanique [Salin (2001a), Pang (2002)]. Par exemple, une planche débitée sur dosse séchera plus rapidement qu'une planche sur quartier grâce aux rayons ligneux qui offrent une voie de passage privilégiée à l'eau du centre vers la surface, en diminuant l'épaisseur totale de parois à traverser. En revanche, pour un même champ d'humidité dans l'épaisseur de la planche, les contraintes seront plus élevées dans une planche débitée sur dosse que dans une sur quartier, car le

retrait suivant la largeur de cette dernière s'effectue dans la direction radiale (inférieur au retrait tangentiel).

De plus, les planches subissent des conditions externes très différentes selon leur position dans la pile car l'air se charge progressivement en humidité et se refroidit au cours de son passage au travers de la pile [Hukka (1996), Pang (2002)].

Ces hétérogénéités entre les planches et cette variation climatique au sein de la pile rendent la tâche du conducteur de séchoir artificiel extrêmement difficile pour obtenir un séchage alliant rapidité et bonne qualité pour l'ensemble des planches.

1.2.4 L'épaisseur de la planche

L'épaisseur est le paramètre géométrique de l'avivé qui a le plus d'influence sur le séchage. En effet, en général, pour optimiser le ratio volume de bois / volume de la cellule de séchage, les avivés sont placés bord à bord sur un même lit horizontal de la pile. Les surfaces de l'avivé exposées au courant d'air sont celles pour lesquelles, l'eau contenue dans le bois suivra le chemin le plus court possible. Par conséquent, les planches sont placées de telle sorte que la migration d'eau se fasse suivant l'épaisseur de la planche.

L'augmentation de l'épaisseur des avivés accroît la durée du séchage dans une proportion quantifiable par un simple bilan d'énergie [Joly et More-Chevalier (1980)]. Les auteurs montrent que le temps de séchage est proportionnel à l'épaisseur durant la phase de séchage à vitesse constante, puis au carré de l'épaisseur lorsque la vitesse de séchage est décroissante. Ainsi, sécher des avivés d'épaisseurs plus importantes augmente le temps d'immobilisation du séchoir, et d'une partie du capital de l'entreprise. Les mêmes auteurs signalent également, à partir de considérations empiriques, que le gradient d'humidité apparaissant au cours du séchage est plus important lorsque l'épaisseur de la planche augmente. Par exemple, « *dans une feuille de placage de 6/10 de millimètre, l'eau s'en va immédiatement alors qu'elle mettra beaucoup de temps à parvenir du cœur à la surface de la planche de 100 millimètres d'épaisseur* ».

Sécher sans dommage des fortes épaisseurs reste, selon les conducteurs de séchoir, très difficile. Chanrion (1995) qualifie notamment le séchage de planches de fortes épaisseurs en chêne de « *parcours du combattant* ». Cette difficulté a été citée par de nombreux auteurs, sans explications. Nous remarquerons que le concept d'avivé de forte épaisseur est subjectif : un avivé est en général

qualifié de *forte épaisseur* ou *forte section*, par les producteurs et les consommateurs, lorsque son épaisseur dépasse 54 mm pour un feuillus, et 80 mm pour un résineux [Chanrion (1995)].

Il faut aussi remarquer que les poutres de sections très importantes, prélevées dans une grume de diamètre donnée, contiendront généralement la moelle de celle-ci. Aussi, des fissures importantes apparaîtront-elles en raison de l'anisotropie du retrait autour de la moelle. Un calcul rapide, pour mettre en évidence ce phénomène, est de considérer la réduction du périmètre d'un accroissement annuel contenu dans l'avivé (Fig.I.7). Les calculs séparés de la réduction de ce périmètre en considérant seulement le retrait radial, puis le retrait tangentiel, révèlent des résultats incompatibles. Ainsi, le retrait seul va générer des contraintes internes, qui vont conduire les accroissements annuels à se rompre. Une fissure, pouvant être très profonde, apparaît sur toute la longueur de l'avivé, pour libérer les contraintes internes.

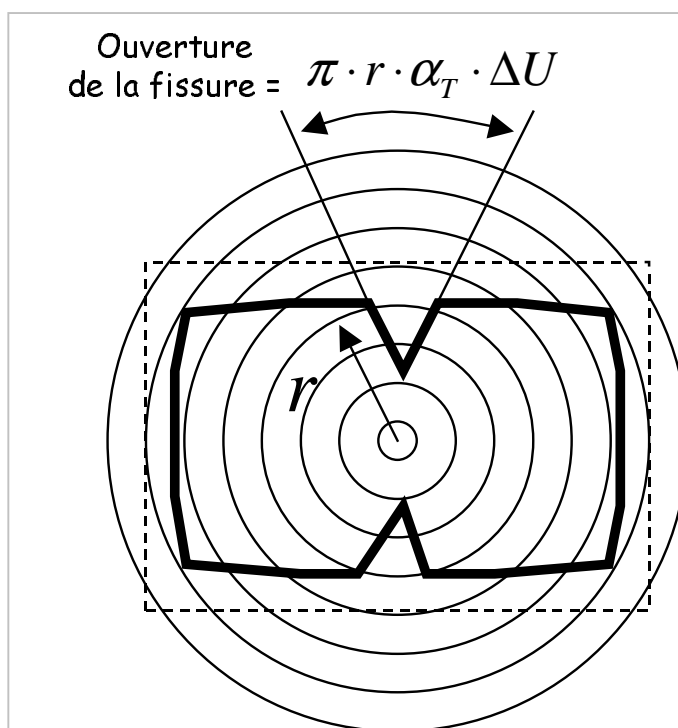


Figure I.7. Déformation et fissuration d'une planche renfermant la moelle de l'arbre. ΔU : variation d'humidité, α_T : coefficient de retrait tangentiel, r : rayon.

1.3 Approche empirique du séchage

1.3.1 La conduite du séchage artificiel

Avant de décrire la conduite du séchage artificiel, nous avons jugé bon de rappeler, de façon très succincte, quelques définitions sur les grandeurs qui caractérisent l'air humide, et qui sont utilisées dans les tables de séchage.

La **température sèche** de l'air, ou température du bulbe sec, correspond à la température de l'air relevée avec un thermomètre classique. L'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si la pression de vapeur (P_v) est inférieure à la pression de vapeur saturante (P_{vs}) qui ne dépend que de la

température. On définit alors l'**humidité relative**, $HR = \frac{P_v}{P_{vs}(T)}$. ($0 \leq HR \leq 100\%$)

Si l'on refroidit l'air à pression constante, son humidité relative va augmenter jusqu'à atteindre la valeur 100%. Il se produit un équilibre vapeur-liquide et les premières gouttes d'eau liquéfiée vont apparaître, la température à cet instant est appelé la **température de rosée** (T_r) de l'air.

La **température humide** de l'air ou du bulbe humide, est la température d'équilibre d'une petite masse d'eau s'évaporant dans l'air, la chaleur nécessaire à l'évaporation n'étant prélevée que sur l'air. À titre d'exemple, l'eau d'une jarre en terre cuite, placée à l'ombre dans une zone de type désertique, s'équilibrera à la température du bulbe humide. Si la température de l'air est de 40 °C, l'humidité relative de 30%, l'eau pourra être appréciée par les autochtones à la température de 25 °C. Le coût pour obtenir cette eau « fraîche » est l'évaporation d'une partie de l'eau à travers les parois poreuses de la jarre.

L'écart entre la température sèche et la température humide de l'air est appelé **écart psychrométrique**.

La connaissance de deux grandeurs, parmi celles qui ont été décrites, est suffisante pour caractériser l'air humide. Les autres grandeurs peuvent être obtenues à partir du diagramme enthalpique de l'air humide.

De manière générale, la conduite du séchage se décompose en 4 grandes étapes :

- *le préchauffage*, au cours duquel sont réalisés la montée en température de la cellule vers la première valeur souhaitée pour la phase de séchage, et le réchauffage du bois. La montée en température est faite de façon progressive pour que l'humidificateur puisse atteindre l'humidité relative de consigne. Cette dernière grandeur doit être élevée pour éviter le séchage prématuré des avivés. Le réchauffage de l'avivé permet de diminuer le gradient de température dans le matériau, et limite ainsi la migration d'eau des zones chaudes vers les zones froides. En règle générale, il est conseillé de compter une heure de préchauffage par centimètre d'épaisseur pour les résineux, et deux heures pour les feuillus lorsque les avivés sont très humides. Ces valeurs sont multipliées par deux pour des bois ressuyés (conductivité thermique plus faible) ;

- *le séchage*, amène l'humidité de l'avivé jusqu'à la valeur finale souhaitée. Au cours de cette étape on fixe à l'avivé l'humidité finale à atteindre. Cependant, « il a toujours tendance à y aller très vite au risque de se détériorer. Pour l'éviter, on lui fixe un but intermédiaire plus proche, dès qu'il est près d'être atteint, on le recule un peu plus loin et ainsi de suite jusqu'au but final. » [Joly et More-Chevalier (1980)]. Cette liste d'humidités « intermédiaires » est donnée par la table de séchage qui planifie l'évolution des conditions hygrothermiques de l'air. À l'heure actuelle, la plupart de ces listes sont issues de la synthèse des connaissances empiriques des conducteurs de séchoirs. De manière générale, les conditions sont douces (HR élevée) au début du séchage et la température est faible pour les essences pouvant collapser. Puis, les conditions se durcissent (HR diminue) au fur et à mesure que le bois sèche pour accélérer les transferts de masse. Parallèlement, la température augmente afin d'accélérer les transferts internes et relaxer les contraintes mécaniques ;

- *l'équilibrage*, dont le but est d'homogénéiser l'humidité dans la section des planches et de diminuer les contraintes mécaniques résiduelles. Cette phase consiste à maintenir constante la température à la fin de la période de séchage et à augmenter l'humidité relative de l'air pour faire tendre la teneur en eau à la surface de la planche vers une valeur légèrement supérieure. En règle générale une durée double de celle de la phase de préchauffage est appliquée ;

- *le refroidissement*, dernière phase précédant la sortie des avivés du séchoir, consiste à abaisser progressivement la température de la cellule et maintenir un écart psychrométrique identique à celui de la phase d'équilibrage. Son objectif est d'éviter que l'air extérieur, alors plus froid et contenant peu de molécules d'eau, soit subitement réchauffé au contact du bois, encore chaud,

et impose à la périphérie de celui-ci des conditions hygrothermiques très dures. Dans ce dernier cas, la périphérie du matériau se rétracterait brutalement et entrerait à nouveau en traction. Des fentes pourraient alors apparaître à la surface de l'avivé.

Afin de prendre en compte le comportement propre à chaque essence, les tables de séchage sont développées pour chacune d'elles. Ainsi, le séchage des essences susceptibles de collapser démarre à des températures relativement faibles. Les résineux sont en général séchés avec des tables plus dures que les feuillus et les essences sujettes au problème de cémentation sont séchées avec une humidité relative en début de séchage très élevée.

Au regard de l'épaisseur des avivés, Joly et More-Chevalier (1980), Sidney Boone *et al.* (1988), Simpson (1991) préconisent des tables de séchage classées par intervalles d'épaisseurs croissantes pour lesquels les conditions de séchage respectives s'adoucissent. En revanche, d'autres auteurs, Aléon *et al* (1990) ont établi des tables valables pour toutes les épaisseurs d'une essence donnée. En fait, l'épaisseur de la planche est tout de même prise en compte car le déroulement de la table se fait selon l'humidité moyenne de la pile de planches dont l'évolution dans le temps dépend fortement de l'épaisseur.

Enfin, le triage des planches par densité, débit, humidité initiale afin de limiter l'hétérogénéité dans la pile n'est pas effectué au niveau industriel. Les professionnels pilotent le séchage sur l'humidité moyenne des planches les plus humides ou des planches dont le séchage est plus délicat. Ils privilégient ainsi la qualité plutôt que la rapidité, mais les planches « facile à sécher » immobilisent le séchoir plus longtemps que si elles avaient été séchées séparément.

1.3.2 Utilisation des nouvelles technologies

Les progrès technologiques permettent d'améliorer la régulation en continu, l'automatisation du processus, l'aéraulique des séchoirs. Aussi, permettent-ils de réduire l'écart entre les valeurs de consignes et la valeur réelle en diminuant l'hétérogénéité des conditions dans la cellule. Enfin, l'évolution technologique permet de mettre en place de « nouveaux procédés » cherchant à accélérer les transferts internes et à réduire les transferts externes afin d'accroître la vitesse de séchage sans dégradation supplémentaire. Nous citerons comme exemple, le séchage haute température, ou sous vide qui génèrent au sein du matériau une surpression par vaporisation de l'eau et qui accélèrent ainsi les transferts de masse. Ils peuvent être associés à un apport volumique

d'énergie par haute fréquence ou par micro-ondes pour accélérer les transferts de chaleur à cœur du bois.

Le bois de forte épaisseur a été utilisé dans de nombreux travaux pour illustrer la rapidité du séchage de ces nouveaux procédés (Tableau.I.2).

Tableau.I-2. Comparaison de la durée de séchage d'épicéa de 160 mm d'épaisseur selon différents procédés. (HT: haute température; HF: chauffage haute fréquence, X : teneur en eau)

Type de Séchoir	Durée (Jours)	X initiale (%)	X finale (%)	Température (°C)	Auteurs
Classique	21.2 à 29.8	38.6	13.5	60 -80	Mauritz 1990
HT	6.6 à 10.6	35.2	13.5-16.3	100 -115	Mauritz 1990
Sous-Vide	9.9	35.5	12.7	(-)	Mauritz 1990
Sous-Vide + HF	4.6	40.0	11	45	Resch (2000)

1.3.3 Le séchage d'avivés de fortes épaisseurs et ses alternatives

Confronté à la difficulté du séchage des avivés de fortes épaisseurs, certaines alternatives ont été suggérées. Nous exposons ci-après quelques-unes d'entre elles.

L'utilisation des nouveaux procédés de séchage semble appropriée pour sécher rapidement du bois de forte épaisseur (Tableau.I.2). Néanmoins, ces procédés restent gourmands en énergie électrique et leur utilisation pour des résineux de fortes sections destinés à la construction, reste financièrement discutable, contrairement aux bois de feuillus de fortes épaisseurs utilisés dans la fabrication de produit à plus forte valeur ajoutée.

Pour améliorer la rapidité du séchage des fortes épaisseurs en séchoir convectif classique, des travaux ont porté sur la disposition des avivés dans la pile. Min.Li *et al.* (1997) suggèrent d'écarter horizontalement de 2 à 3 cm les avivés entre eux afin de permettre l'introduction d'un flux d'air vertical. La surface d'échange plus importante offre la possibilité d'accélérer le séchage, sans affecter la qualité des planches, en augmentant la vitesse de l'air.

Une alternative originale est d'effectuer un perçage sur toute la longueur de l'avivé brut de sciage avant de le sécher (Principe *sous licence d'exploitation* par la scierie Ducret (Jura)). Ce perçage permet d'augmenter les surfaces d'échanges externes, de diminuer l'épaisseur traversée par l'eau contenue dans le bois et donc d'accélérer le séchage. Par ailleurs, les contraintes internes atteintes dans le *bois percé* au cours du séchage seront moins élevées que celles d'un avivé de même épaisseur non percé. Le perçage permet par la suite de dissimuler câbles, tuyaux, tirant intérieur pour une poutre précontrainte, etc.

Nous citerons enfin le bois contre-collé (*Duo/Trio*) comme une alternative industrielle de plus en plus fréquente pour obtenir du bois de forte section, sec à l'air et sans déformation. Le principe est de sécher des épaisseurs de bois plus faibles jusqu'à l'humidité souhaitée, de les raboter sur les 4 faces et de les coller face contre face de manière à obtenir une épaisseur plus importante. Cette méthode présente néanmoins le désavantage de multiplier le nombre de manutentions et d'usinages pour une même épaisseur finale et donc d'augmenter le coût de production.

2 Approches scientifiques du séchage des avivés

2.1 Expérimentation et Instrumentation

La prise de mesure de grandeurs physiques au cours du procédé de séchage est souvent une opération complexe. En effet, la mesure doit être effectuée sans perturbation des conditions hygrothermiques dans l'enceinte du séchoir.

D'une part, la mesure doit être effectuée en laissant l'échantillon étudié dans les mêmes conditions hygrothermiques pour ne pas perturber son séchage. Ainsi, lorsque l'appareillage de mesure est placé dans la cellule du séchoir, il doit pouvoir résister à des conditions drastiques telles qu'une température élevée, une pression de gaz très faible, une humidité de l'air pouvant atteindre la saturation, etc. Enfin, notons que certaines essences de bois, au cours de leur séchage, libèrent des extraits volatils dans l'air humide qui rendent le milieu extrêmement corrosif.

D'autre part, pour ne pas perturber les mécanismes de transferts de chaleur et de masse au niveau de la planche, les méthodes de mesure employées devront être de préférence sans contact, et garder l'échantillon dans son intégralité (méthode de mesure non destructive).

Aussi, les moyens techniques mis en œuvre pour mesurer le champ de teneur en eau du bois et les contraintes de séchage sont-ils réalisés avec une métrologie sans cesse plus sophistiquée.

2.1.1 Mesure du champ de teneur en eau dans une planche de bois

La méthode classique, mais également la plus fastidieuse pour suivre les transferts d'humidité dans l'épaisseur d'une planche de bois témoin, consiste à découper la section en lamelles puis à effectuer une double pesée (état humide, état anhydre) de chacune d'elles pour obtenir leur humidité. Cette opération est répétée plusieurs fois à différents instants du séchage. Cette méthode est progressivement abandonnée au profit de méthodes non destructives que l'on peut regrouper selon le principe de la mesure : (a) mesure électrique [Kouchadé (2004)], (b) mesure par résonance magnétique nucléaire (RMN) [Rosenkilde *et al.* (2002)], (c) mesures par atténuation d'un rayonnement ionisant tel que les rayons X, les rayons γ , les neutrons [Lehmann *et al.*(2000), Rosenberg *et al.*(2001)].

La méthode électrique (a) consiste à mesurer la résistance électrique du bois, dont le logarithme varie linéairement avec le logarithme de la teneur en eau dans le domaine hygroscopique. Toutefois, dans le domaine de l'eau libre les résultats donnés par cette méthode sont moins probants. De plus, elle est intrusive car elle nécessite l'insertion d'un couple d'électrodes dans le bois. Enfin, notons que la mesure de la résistance électrique n'est pas locale, mais correspond à une réponse globale de l'échantillon, intégrée sur le profil de teneur en eau le long des électrodes.

Les deux autres familles de méthodes (b et c) permettent de suivre localement la teneur en eau du bois, y compris dans le domaine de l'eau libre. La différence entre ces deux dernières familles découle du principe physique de la mesure. Concernant la méthode par atténuation d'un rayonnement ionisant, la mesure dépend à la fois de la teneur en eau et de la densité locale du matériau. Pour la méthode par RMN, les molécules d'eau sont bien différenciées des autres éléments constitutifs de la masse sèche, de plus l'eau liée peut être différenciée de l'eau libre. Néanmoins, selon les applications, ces caractéristiques se transforment soit en avantage, soit en inconvénient. Par exemple, lorsque la densité du bois intervient dans l'atténuation du rayonnement, le retrait vient perturber la mesure. En revanche, une méthode qui permet de s'affranchir de la densité ne permet pas de repérer les différents tissus du bois (bois initial et bois final par exemple).

Dans la suite, la mesure de la teneur en eau par atténuation des rayons X est plus largement décrite après un bref rappel sur la nature du rayonnement X.

-Le Rayonnement X

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de même nature que la lumière (rayonnement visible) avec une longueur d'onde beaucoup plus petite, de l'ordre de l'angström (10^{-10} m) (Fig.I.8).

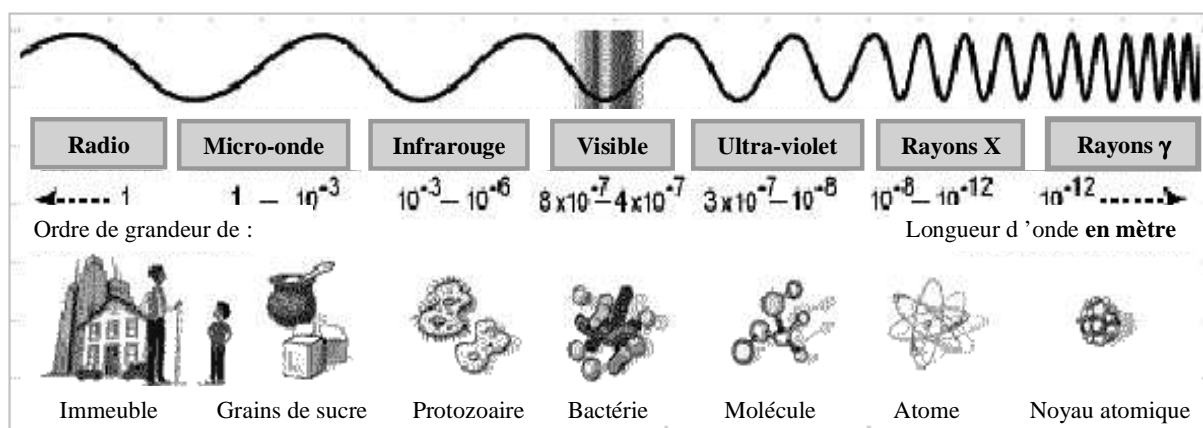


Figure I.8. Différentes longueurs d'onde des ondes électromagnétiques.

Les rayons X se différencient des autres rayonnements par leur mode de production. En effet, ils sont produits en bombardant une cible (anode) par un faisceau d'électrons émis par un filament et accélérés par une différence de potentiel (Fig.I.9-(a)). L'essentiel de l'énergie cinétique des électrons bombardant l'anticathode se convertit en chaleur, moins de 1 % seulement est transformé en rayons X. Le rayonnement X est polychromatique et il est caractérisé par un spectre continu et un spectre de raies (Fig.I.9-(b)) : le spectre continu est provoqué par la décélération des électrons au voisinage des noyaux atomiques de la cible (le terme consacré est le *rayonnement de freinage*), le spectre de raies est lié à des changements de niveau d'énergie d'électrons internes appartenant aux atomes de la cible et ne dépend donc que de la nature de l'anode.

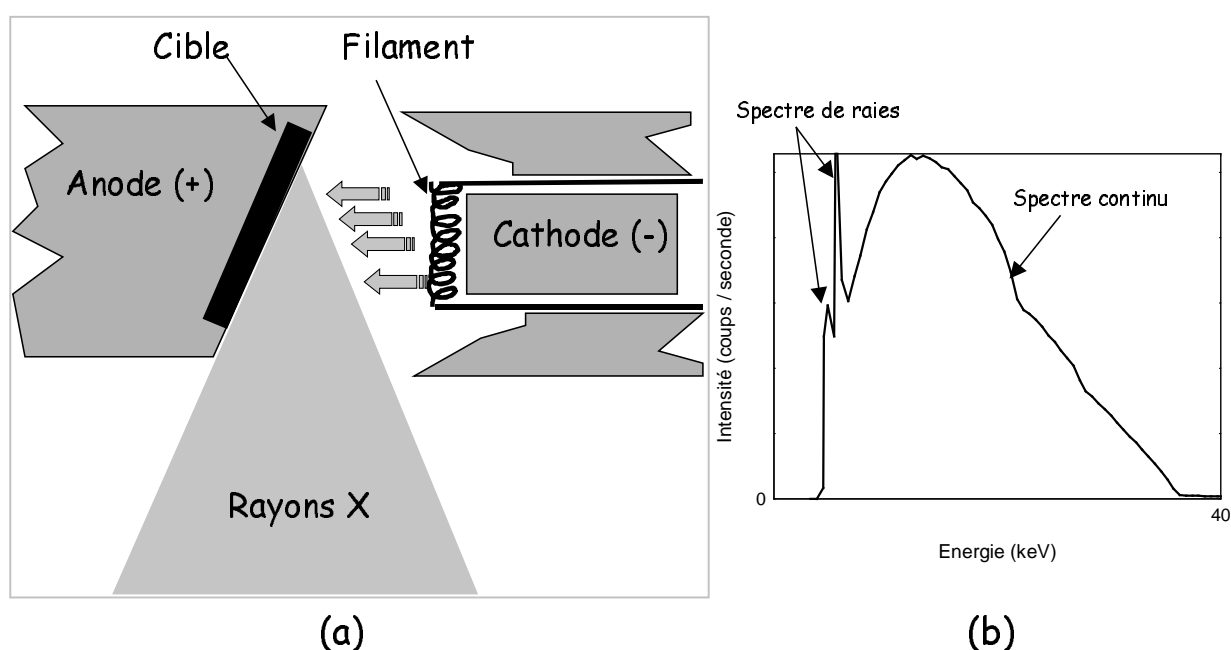


Figure I.9. Schéma du principe d'émission d'un tube de rayonnement (a) et du spectre émis (b).

Le rayonnement X est formé d'un ensemble de photons, porteur d'un quantum d'énergie lié à leur fréquence selon la relation $E = h \nu$ (h : constante de Planck (J.s), ν : fréquence du rayonnement (s^{-1})). Rappelons que la relation entre la fréquence et la longueur d'onde d'une onde électromagnétique est : $\nu = C / \lambda$, avec C la célérité de la lumière ($\sim 3 \times 10^8$ m/s), λ la longueur d'onde (\AA). L'énergie maximale d'un photon X ne peut pas être supérieure à celle de l'électron avant son freinage sur l'anticathode $E_{\max} = eV$ (e : charge élémentaire d'un électron, V : tension accélératrice (V)).

Le rayonnement incident interagit avec la matière de l'échantillon testé et génère des phénomènes physiques tels que la fluorescence (effet photo-électrique), et la diffusion (effet Compton, effet Thomson) (Fig.I.10). Par conséquent, seule une partie du rayonnement incident traverse

l'échantillon. L'atténuation dépend de la composition atomique de l'objet d'étude et de la longueur d'onde du rayonnement.

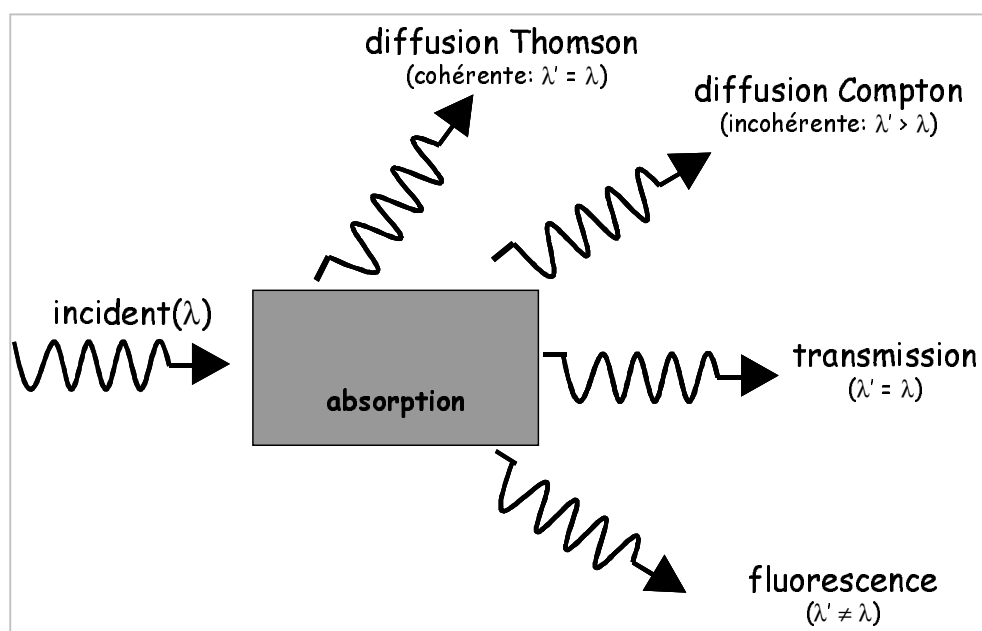


Figure I.10. Principaux processus d'interaction entre les photons X et la matière [Badel (1999)].

Le caractère ionisant des rayonnements X, des rayons γ , et des neutrons fait qu'ils sont dangereux pour l'homme et nécessitent une protection adéquate. Toutefois, contrairement aux sources radioactives (émission de rayons γ , de neutrons), les sources de rayons X présentent le grand avantage de pouvoir arrêter à tout moment leur émission, avec l'annulation de la différence de potentiel entre les deux électrodes. Par ailleurs, il est possible de choisir indépendamment la dureté des rayons (en fonction de la masse à traverser) et l'intensité émise (taux de comptage) afin de concilier précision et rapidité des mesures. La dureté est réglée à partir de la tension appliquée, et l'intensité du rayonnement à partir du courant circulant dans le filament émetteur du faisceau d'électrons. En contrepartie, le caractère polychromatique, particularité de la mesure par rayon X comparée aux méthodes utilisant une source radioactive (gammamétrie), rend plus difficile l'exploitation des résultats.

-L'atténuation d'un rayonnement poly-chromatique

Seule une partie I du rayonnement incident I_0 traverse l'échantillon. Pour un faisceau poly-chromatique, cette fraction suit une loi d'atténuation exponentielle :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^{\infty} N_o(\lambda) \cdot \exp(-\rho \cdot \mu_p \cdot L) d\lambda}{\int_0^{\infty} N_o(\lambda) d\lambda} \quad (I.1)$$

N_o est la fonction qui définit le spectre incident, $N_o(\lambda)$ étant le nombre de photons de longueur d'onde λ reçus au niveau du récepteur durant une seconde, L est la largeur de l'échantillon traversé (cm), μ_p est le coefficient d'atténuation massique (cm^2/g) de l'objet traversé, et ρ sa masse volumique (g/cm^3). En l'occurrence pour le bois nous avons :

$$\rho \cdot \mu_p = \rho_o \cdot \mu_p^{bois\ sec} + \rho_o \cdot X \cdot \mu_p^{eau} \quad (I.2)$$

avec X la teneur en eau du bois ($X = m_{eau}/m_o$), ρ_o la masse volumique anhydre du bois (g/cm^3), $\mu_p^{bois\ sec}$ et μ_p^{eau} , respectivement les coefficients d'atténuation massique du bois à l'état anhydre et de l'eau pure (cm^2/g) (Fig.I.11).

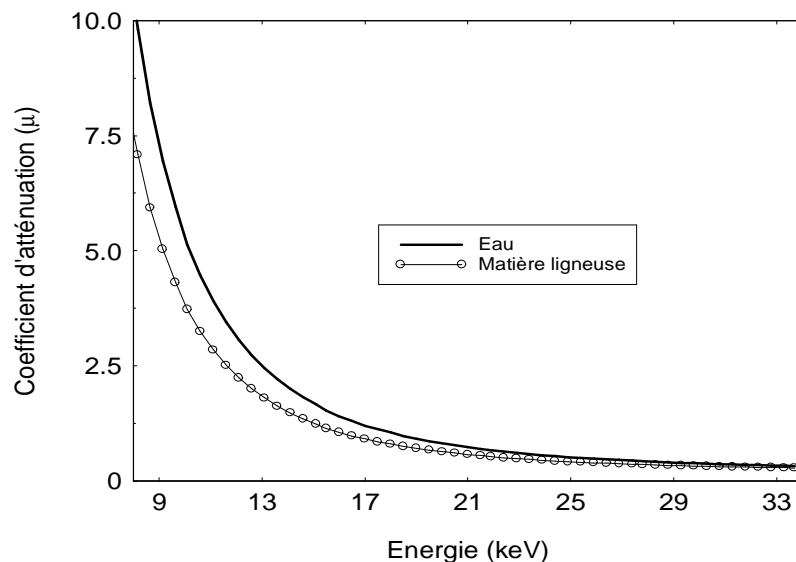


Figure I.11. Évolution du coefficient d'atténuation massique (cm^2/g) du bois sec et de l'eau pure en fonction de l'énergie [données du NIST (National Institute of Standards and Technology)].

-Détermination de la teneur en eau du bois selon l'atténuation du matériau

Des auteurs signalent que la précision actuelle de la chaîne de mesure ne permet pas d'utiliser la faible variation du coefficient d'atténuation de l'eau et du bois en fonction de l'énergie (Fig.I.11), pour mesurer directement la teneur en eau du bois [Jensen *et al.* (2001), Perré et Thiercelin (1997)]. Ainsi, la mesure locale est réalisée en deux étapes :

- ✓ enregistrement du rayonnement transmis et incident à différents instants du séchage ;
- ✓ après l'essai, l'échantillon est amené à l'état anhydre afin de déterminer l'atténuation de la matière ligneuse. La connaissance de l'épaisseur traversée par le rayonnement et la densité de matière ligneuse, permet de calculer par *méthode inverse*, la teneur en eau locale pour chacun des enregistrements précédents.

À ce jour, peu de laboratoires disposent d'un séchoir équipé d'un dispositif de rayons X afin de suivre l'évolution des profils de teneur en eau de la planche au cours du séchage. L'université de technologie de Lulea (Suède) a mis en place une enceinte climatisée dans un scanner médical (Fig.I.12) (Tomographie). L'émission (source classique de rayons X) et la détection (caméra CCD, non spectrométrique) tournent autour de l'enceinte de séchage, fabriquée dans un matériau polymère atténuant peu le rayonnement. L'acquisition des données permet de reconstruire l'image d'une coupe transversale de la planche de bois, à différents instants du séchage. Ces images ont un contraste nuancé selon la densité locale du matériau humide. Par la méthode indirecte, décrite précédemment, il est possible de cartographier la teneur en eau dans la section de la planche. Face à la richesse des informations que peut apporter ce dispositif (cartographie tridimensionnelle de la teneur en eau dans la planche), nous pouvons regretter la faible quantité d'expériences réalisées et communiquées à ce jour [Pang et Wiberg (1998), Wiberg et Moren (1999)]. Notons également que ce procédé présente plusieurs désavantages. D'une part, le rayonnement parvenant au détecteur (caméra CCD) doit traverser un scintillateur, qui convertit le rayonnement X, après atténuation par l'échantillon, en rayonnement lumineux visible. L'utilisation d'un scintillateur diminue l'intensité du rayonnement. Aussi, est-il nécessaire d'augmenter le temps d'acquisition à chacune des positions du balayage pour avoir suffisamment de sensibilité. Le temps total du balayage en est donc affecté. D'autre part, le détecteur utilisé n'est pas une diode spectrométrique, sensible à l'énergie photonique. Par conséquent, l'information recueillie est plus pauvre et diminue la précision de la mesure de la teneur en eau dans la planche. Enfin, le prix d'un tel équipement est très élevé.

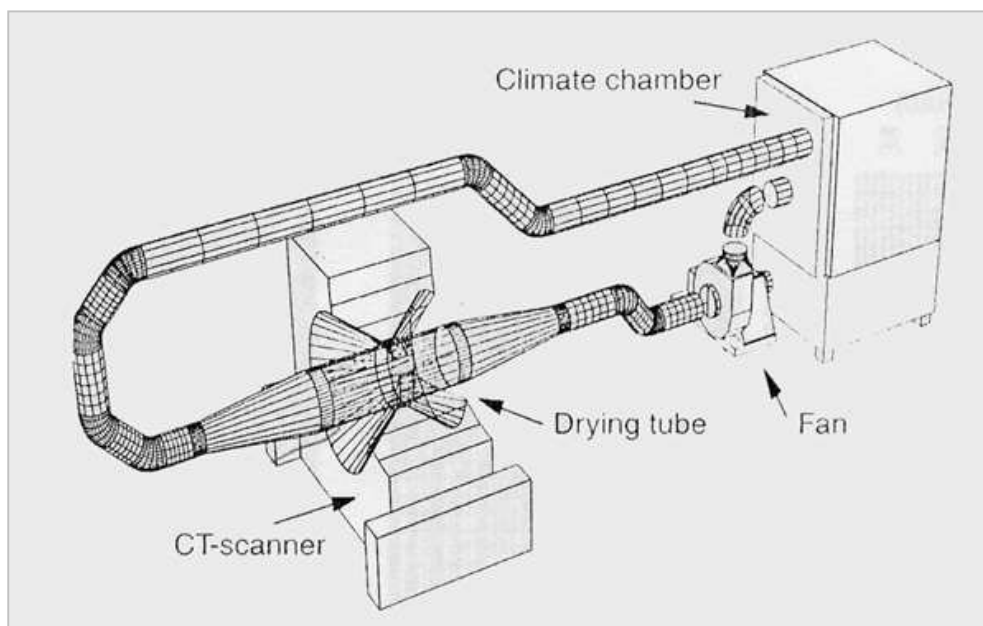


Figure I.12. Scanner médical dans lequel a été placée une chambre régulée en température et en humidité(Lulea University of Technologie, Suède) [Pang et Wiberg (1998)].

L'université de technologie du Danemark (Lyngby) a mis en place un dispositif expérimental, dans lequel une source et un récepteur à diode spectrale sont en vis à vis et se déplacent suivant une seule direction, de part et d'autre d'une enceinte à ambiance contrôlée. Jensen *et al.* (2001) ont utilisé ce dispositif sur une planche de bois et obtiennent un profil d'humidité, moyennée sur la largeur, dans l'épaisseur. Ce procédé est plus accessible financièrement, plus simple et précis, mais la cartographie de la teneur en eau dans la planche ne peut être réalisée que suivant une dimension d'espace et le balayage est lent. D'autre part, au regard des différents travaux effectués sur ce dispositif [Bentz et Hansen (2000), Hu et Stroeven (2003)], leur séchoir semble être limité à des conditions opératoires restreintes.

2.1.2 Evaluation des contraintes de séchage

Les contraintes internes ne se voient pas et ne peuvent pas être mesurées directement. Seules la déformation ou les conséquences qu'elles engendrent peuvent permettre de les estimer. Il existe deux approches possibles :

- ✓ libérer les contraintes de séchage à partir de la destruction d'une partie ou de l'échantillon lui-même (méthodes destructives) ;
- ✓ observer une manifestation externe de l'état des contraintes régnant dans le matériau, tout en le conservant dans son intégralité (méthodes non-destructives).

Parmi les méthodes destructives, nous pouvons citer les travaux de Sales (1984) dont le montage expérimental permet de quantifier avec beaucoup de rigueur le relâchement des contraintes de séchage d'une éprouvette « en fourche ». Le dispositif de Svensson et Toratti (2002) repose sur le même principe avec la découpe en lamelles d'une section de planche et la mesure de leur relaxation (Fig.I.13).

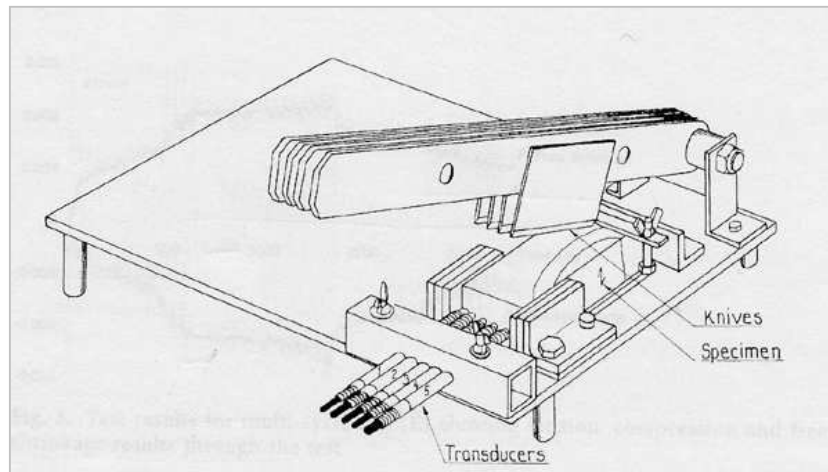


Figure I.13. Méthode destructive d'estimation des contraintes internes [Svensson et Toratti (2002)]

Concernant les méthodes non destructives, nous citerons l'expérience du "Flying Wood" [Brandao et Perré (1996)] qui consiste en un séchage non symétrique d'un petit échantillon de bois grâce à l'imperméabilisation de cinq de ses faces. Cette astuce permet l'expression des contraintes de séchage au travers de la déformation globale de l'échantillon (Fig.I.14). Cette dernière est mesurée par une méthode non destructive (système optique ou capteur avec contact).

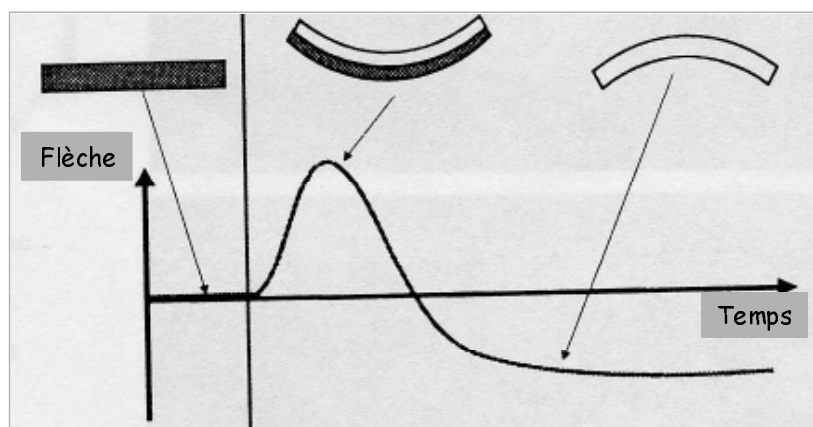


Figure I.14. Évolution de la flèche d'un échantillon de bois lors d'un séchage dissymétrique. Visualisation de l'inversion des contraintes. Partie humide (zone grisée) ; partie sèche (zone claire).

Le concept de ce travail a été repris et complété par Allegreti (2003). Son dispositif mesure la force nécessaire pour empêcher la déformation d'un échantillon subissant un séchage dissymétrique. En parallèle, l'auteur effectue le test *Flying Wood* sur un échantillon présentant les mêmes caractéristiques et avec les mêmes conditions de séchage. Il obtient ainsi une double information sur le comportement mécanique du bois au cours du séchage, permettant par exemple d'identifier les paramètres phénoménologiques d'un modèle mécanique ou de valider un code numérique.

D'autres auteurs [Booker (1994); Beall (2002), Beall *et al.* (2003)] enregistrent les émissions acoustiques d'une pile de planches au cours du séchage. L'intensité sonore mesurée renferme un bruit de fond (frottement des planches placées bord à bord, variations du flux d'air à travers la pile de planche, etc.) mais aussi les craquements engendrés par la libération des contraintes de séchage lorsque les fentes se forment. En filtrant le bruit de fond, il est possible d'isoler l'émission de ces derniers.

Hyoung-Woo *et al.* (2001) ont suivi les fentes superficielles de petits morceaux de bois séchés à l'aide d'un séchoir convectif où malheureusement l'humidité relative de l'air n'est pas contrôlée. Ils ont utilisé une caméra CCD placée à l'extérieur du séchoir pour acquérir des images de la surface de la planche. Cette technique permet de visualiser l'état des contraintes en surface selon la largeur de la fente. Les conditions appliquées, extrêmement dures, leur ont permis d'obtenir des fentes suffisamment larges pour être observées sur des images de faibles résolutions (0.42 x 0.42 mm² /pixels).

De la même façon, Hanhijärvi *et al.* (2003) mesurent la largeur des microfentes apparaissant au cours du séchage à la surface de la planche. Ils balayent transversalement la surface de la planche

avec un laser (focalisé en un point sur la surface). La mesure de l'intensité du faisceau réfléchi au cours de ce balayage, permet de détecter des fentes d'une largeur supérieure à 0.02 mm. Cependant, les auteurs ne précisent pas l'existence d'un sas entre le séchoir et la chambre où les mesures sont effectuées. Sans ce sas, l'air ambiant va se réchauffer au contact de la planche chaude sortant du séchoir et créer ainsi un climat local extrêmement sévère qui conduit la planche à fissurer en surface. Les mesures des microfentes effectuées dans cette étude ne seraient alors pas représentatives des conditions de séchage.

Une approche originale a été réalisée par Canteri (1996) pour suivre les déformations en surface au cours du séchage, et notamment l'évolution des fentes de surface. Le montage est composé d'aiguilles piquées dans le bois et d'un micromètre laser pour mesurer la distance entre deux aiguilles consécutives (Fig.I.15). En absence de fissuration, le milieu reste continu et la mesure de la distance entre aiguilles donne une information globale sur le retrait, car elle intègre ce qui se passe sur toute l'épaisseur de la section. Lorsqu'une fente de surface apparaît entre deux aiguilles successives, la mesure du retrait devient localisée, et la libération des contraintes avec la fente conduit le retrait moyen à tendre vers le retrait libre.

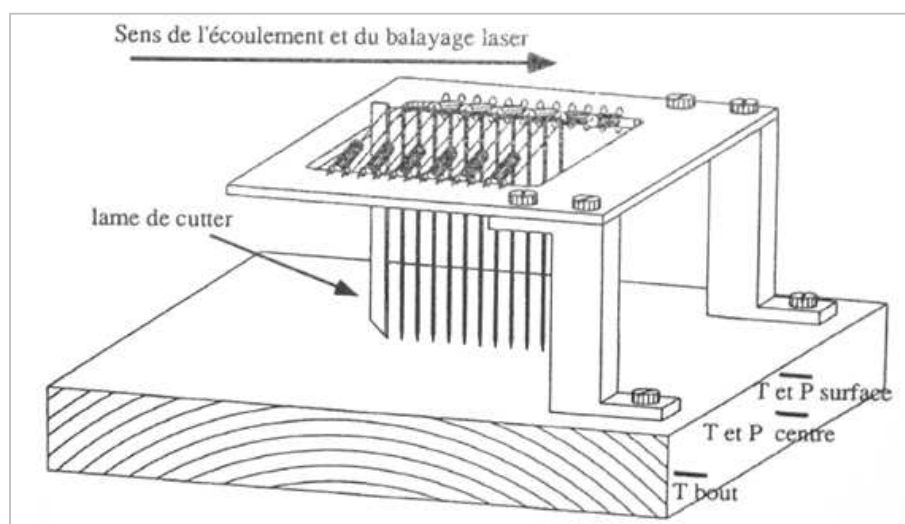


Figure I.15. Dispositif à douze aiguilles pour suivre la fissuration de surface à l'aide d'un micromètre laser [Canteri (1996)].

2.2 Théorie du séchage du bois

L'approche déterministe du séchage décrite dans cette partie se situe à l'échelle mésoscopique (échelle de la planche). La modélisation du séchage d'une pile de planches constitue un changement d'échelle qui est encore très peu abordé dans la littérature. Toutefois, quelques travaux se rapportant à ce sujet sont cités à la fin de cette partie. La théorie du séchage repose sur la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse au sein d'un milieu poreux. Cependant, pour être capable de déterminer la qualité du produit séché, il est nécessaire de modéliser les contraintes internes et les déformations en rapport avec le champ évolutif d'humidité dans la planche. Mais, le contrôle qualité du produit séché ne peut être effectué que si l'on connaît les contraintes internes auxquelles il sera soumis durant le procédé. Pour le matériau bois, cela nécessite une connaissance de sa rhéologie en rapport avec l'évolution des champs de température et d'humidité dans la planche. Nous verrons dans la suite de ce paragraphe, comment ces modèles de comportement du matériau bois sont intégrés à la formulation des transferts couplés de chaleur et de masse et apportent une contribution significative pour une meilleure simulation et donc un meilleur suivi du séchage du bois.

2.2.1 Formulations physique et mécanique

2.2.1.a *Les transferts couplés de chaleur et de masse*

Plusieurs jeux d'équations macroscopiques sont proposés dans la littérature. Ils peuvent être différencier notamment par le nombre de variables indépendantes utilisées pour décrire le séchage :

- ✓ la teneur en eau est proposé comme seule variable. Cette formulation physique est pauvre [Perré, (1999)]. Salin (2001b) justifie son utilisation en constatant que les changements de température intervenant dans une conduite de séchage à basse température ont, en règle générale, une amplitude assez faible. Aussi, le gradient de température, généré dans le matériau, ne devrait-il pas influencer trop fortement les transferts de masse ;
- ✓ deux variables indépendantes, la teneur en eau et la température sont sélectionnées. Le jeu d'équations correspondant permet de modéliser convenablement le séchage convectif basse température ($\leq 80^{\circ}\text{C}$) avec le couplage entre les transferts de chaleur et de masse ;

- ✓ les modèles les plus complets font intervenir trois variables indépendantes, la teneur en eau, la température et la pression interne de gaz. La description physique obtenue est cohérente et permet de modéliser le séchage avec des transferts intenses obtenus par exemple dans le séchage haute température ou sous vide. Le jeu d'équations des transferts couplés de chaleur et de masse avec trois variables indépendantes a été décrit par Perré et Degiovanni (1990), Turner et Perré (1996), ou encore Nijdam *et al.* (2000). Les lois de conservations (masse et énergie) sont appliquées à chacune des trois phases au niveau microscopique et sont ensuite moyennées sur un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau poreux afin d'obtenir des équations macroscopiques locales au sens des milieux continus. Cette prise de moyenne revient à considérer le milieu poreux comme un milieu continu fictif.

Ces formulations s'appliquent convenablement au cas des résineux, car leurs structures anatomiques simples, composées environ de 90 % de trachéides, permettent de justifier le passage du volume élémentaire représentatif (VER) à une échelle supérieure macroscopique. Le concept de VER chez les feuillus, est en revanche plus difficile à concevoir car le réseau de vaisseaux (lié à la conduction dans l'arbre) offre un chemin facile à la migration de l'eau dans le bois, contrairement aux fibres (soutien mécanique de l'arbre) qui sont difficiles à traverser. De plus, des mécanismes complexes de *double porosité* interviennent pour certains feuillus [Perré (2003)].

2.2.1.b *Le comportement mécanique du bois*

Les propriétés mécaniques du bois dépendent de la direction selon laquelle on les observe (matériau anisotrope), de sa teneur en eau (hygroactivation), de sa température (thermoactivation), du temps (matériau viscoélastique), du niveau de contrainte (domaine plastique). La rhéologie du bois met en évidence le comportement complexe de ce matériau qui combine différentes propriétés comme l'élasticité, la plasticité, la viscoélasticité et la mécanosorption. Dans ce travail, la plasticité du bois ne sera pas traitée. De nombreux travaux expérimentaux ont été effectués en isolant chacun des comportements afin de trouver un modèle phénoménologique, de type « boîte noire », reconstituant les observations à l'échelle macroscopique. Beaucoup se restreignent, pour faciliter l'identification des paramètres intervenant dans ces modèles, au domaine linéaire des différents comportements selon le principe de superposition de Boltzmann : la réponse à une somme de sollicitations est égale à la somme des réponses que l'on aurait pour chaque sollicitation prise individuellement.

Nous allons nous intéresser à certaines propriétés physiques du bois et quelques modèles empiriques s'y rapportant afin de mieux appréhender le comportement mécanique complexe de ce matériau.

- Le retrait du bois

Cette propriété dépend fortement des directions matérielles du bois. Elle est définie suivant les directions principales du matériau : radiale, tangentielle et longitudinale. Les expériences montrent que le retrait varie à peu près linéairement en fonction de la teneur en eau entre le point de saturation des fibres et l'état anhydre [Kollman (1968), Guitard (1987)].

- Le comportement élastique d'un matériau orthotrope

Dès qu'une contrainte est appliquée à une pièce de bois, instantanément une déformation prend naissance. Inversement, si la contrainte est ramenée à zéro, la déformation s'annule immédiatement. La déformation élastique est dite instantanée et récupérable. La loi de Hooke est une relation linéaire $(\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{S}} \cdot \underline{\underline{\sigma}})$ modélisant le comportement d'un solide élastique parfait. Le tenseur de complaisance $(\underline{\underline{S}})$ a été exprimé selon les directions matérielles du bois par Kollmann (1968) et Guitard (1987).

Guitard (1987) a exprimé les modules de Young, grandeurs intervenant dans les composantes du tenseur de souplesse, en fonction de la teneur en eau du bois dans une plage de 6 % à 20 % selon une relation linéaire.

- Modélisation du fluage viscoélastique

De nombreux travaux ont été effectués pour caractériser les propriétés viscoélastiques du bois selon deux types d'essais :

- ✓ essais sous chargement quasi statique (fluage, relaxation) : une pièce de bois soumise à une charge, va présenter une déformation élastique instantanée puis sa déformation va augmenter avec le temps ; la pièce flue. Si la charge est retirée, sa déflexion va diminuer au cours du temps, on parle de zone de recouvrance ;
- ✓ essais sous sollicitations sinusoïdales : lorsqu'une contrainte ou déformation est appliquée à l'échantillon et varie sinusoïdalement au cours du temps, la déformation ou la contrainte

résultante est également une fonction sinusoïdale du temps de même fréquence, avec un déphasage δ dont la tangente renseigne sur les propriétés d'amortissement du matériau.

Les modélisations obtenues à l'aide d'essais quasi statiques permettent d'exprimer le comportement du bois sur des temps longs, proches de ceux engagés dans le séchage du bois, contrairement aux essais dynamiques dont la fréquence la plus basse est de 10^{-2} Hz.

Le modèle de base utilisé comprend un ressort, de module élastique E , associé à un amortisseur, de viscosité η . L'association en parallèle de ces deux éléments donne un *élément de Kelvin* caractérisé par sa complaisance $J = \frac{1}{E}$ et sa constante de temps $\tau = \frac{\eta}{E}$.

L'association en série de n éléments de Kelvin, (J_i, τ_i) avec i variant de 1 à n , va permettre de reconstituer le comportement viscoélastique du matériau bois au cours d'un essai de fluage (Fig.I.16) [Martensson (1992), Perré et Aguiar (1999), Hanhijärvi (1999)].

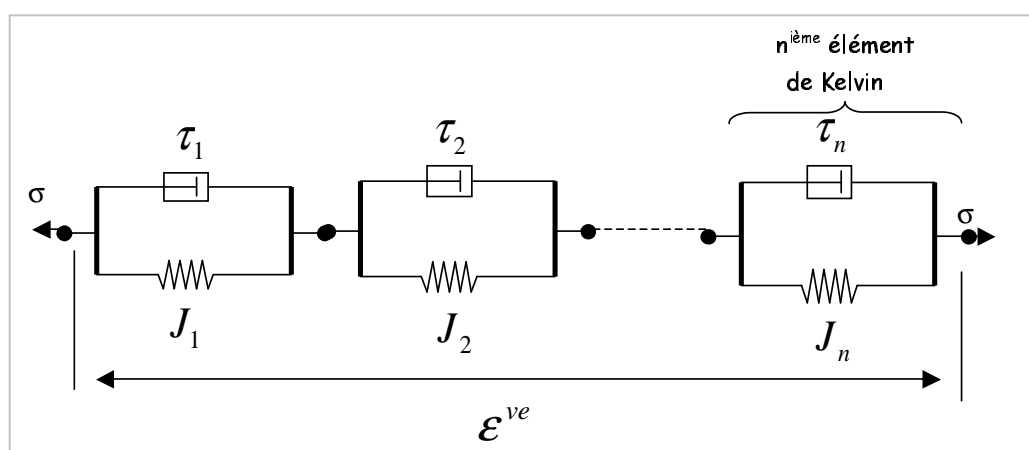


Figure I.16. Représentation rhéologique du fluage viscoélastique par n éléments de Kelvin associés en série

D'autres modèles de type Maxwell ou Burgers ont été utilisés dans la littérature [Bardet (2001)], mais une étude de Haque *et al.* (2000) comparant la précision de différents modèles (Maxwell, Kelvin, Burgers, équations de Bailer-Norton) pour exprimer le comportement viscoélastique du bois, conclut que le modèle de Kelvin semble le mieux adapté pour interpoler les courbes expérimentales.

Jusqu'ici les paramètres température et teneur en eau du bois n'ont pas été pris en compte. Or, si l'on veut comprendre les contraintes de séchage, ces deux paramètres sont incontournables. Voyons d'abord l'effet de la température.

Le bois est un matériau composite constitué de trois types de polymères : cellulose, hémicellulose, et lignine, ainsi que d'une faible quantité d'extractibles et de composés minéraux. Or, chaque chaîne polymérique présente une température à partir de laquelle elle passe d'un état vitreux à un état caoutchoutique car les liaisons faibles, intra et intermolécules, stabilisatrices de la chaîne se réarrangent, ou se dégradent [Irvine (1984), Olsson et Salmén (1997)]. Pour tenir compte, au niveau macroscopique, de l'effet de la température sur les temps caractéristiques (**activation thermique du fluage viscoélastique**), une loi de type William-Landel-Ferry ou Arrhénius est utilisée. De nombreux auteurs ont choisi cette dernière loi [Mauget (1996), Perré et Aguiar (1999), Bardet (2001), Perré et Passard (2004)]. Son écriture est la suivante :

$$\tau_n = \tau_n^{Tref} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W_n}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{Tref}\right)\right)$$

R désigne la constante des gaz parfait, ΔW_n l'énergie d'activation apparente (J/mol), $Tref$ une température de référence en Kelvin (typiquement, 293 K), τ_n^{Tref} le temps caractéristique à $Tref$, et T la température.

Cette loi véhicule le concept d'équivalence temps-température, selon lequel une augmentation de la température accélère les mécanismes viscoélastiques dans une mesure quantifiée par une énergie d'activation. Elle consiste à translater, sur l'échelle du logarithme des temps, la réponse connue du matériau à une température de référence vers la réponse qu'il aura à la nouvelle température, pour la même sollicitation. Hanhijärvi (1999) applique la même thermoactivation pour l'ensemble des éléments. Au contraire, Perré et Aguiar (1999), Perré et Passard (2004) identifient une énergie d'activation propre à chaque élément de Kelvin, et obtiennent une excellente interpolation des courbes expérimentales.

En ce qui concerne **l'activation hydrique du fluage viscoélastique**, il est connu que l'augmentation du taux d'humidité diminue la température de transition vitreuse des différents polymères hydrophiles constitutifs du bois [Irvine (1984), Olsson et Salmén (1997)]. La prise en compte de cette caractéristique dans un modèle macroscopique est rendue difficile par le manque de

données expérimentales disponibles dans la littérature. Il est en effet difficile de maintenir expérimentalement un échantillon de bois à une humidité inférieure au point de saturation des fibres, à différents niveaux de température et sans être perturbé par le fluage mécanosorptif. Quelques auteurs prennent en compte une hydroactivation identique pour tous les éléments de Kelvin dans leur modèle :

- ✓ Hanijärvi (1999,2000b) définit une expression de glissement thermohydrigue sur la complaisance viscoélastique à partir des résultats expérimentaux de différents auteurs d'une part dans la plage de température [30 °C-80 °C] et de ses propres résultats d'autre part dans l'intervalle [95 °C-125 °C] ;
- ✓ Perré et Passard (2004) utilisent les courbes d'Irvine (1984) sur l'évolution de la température de transition vitreuse de la lignine en fonction de l'humidité du bois pour définir une température apparente, utilisée dans la loi d'Arrhénius. Ils définissent une humidité critique de 18 % à partir de laquelle la température apparente devient inférieure à la température réelle.

-Modélisation du fluage mécanosorptif

Depuis les années 50, de nombreux travaux ont été réalisés pour comprendre le mécanisme et l'origine du couplage existant entre les contraintes mécaniques et le processus de sorption dans le bois. Ce couplage, appelé phénomène mécanosorptif, participe à augmenter le fluage lorsque le matériau est sous contrainte et est soumis dans le même temps à une variation d'humidité (Fig.I.17). Les observations macroscopiques de la mécanosorption du bois ont été abondamment décrites dans la littérature [Ranta-Maunus (1975), Grossman (1976), Gril (1988), Martensson (1992), Svensson (1996), Hunt (1997, 1998), Bengtsson (1997), Toratti et Svensson (2000)]. Néanmoins, l'explication de ce phénomène au niveau microscopique et sa modélisation reste un problème d'actualité au niveau de la communauté scientifique.

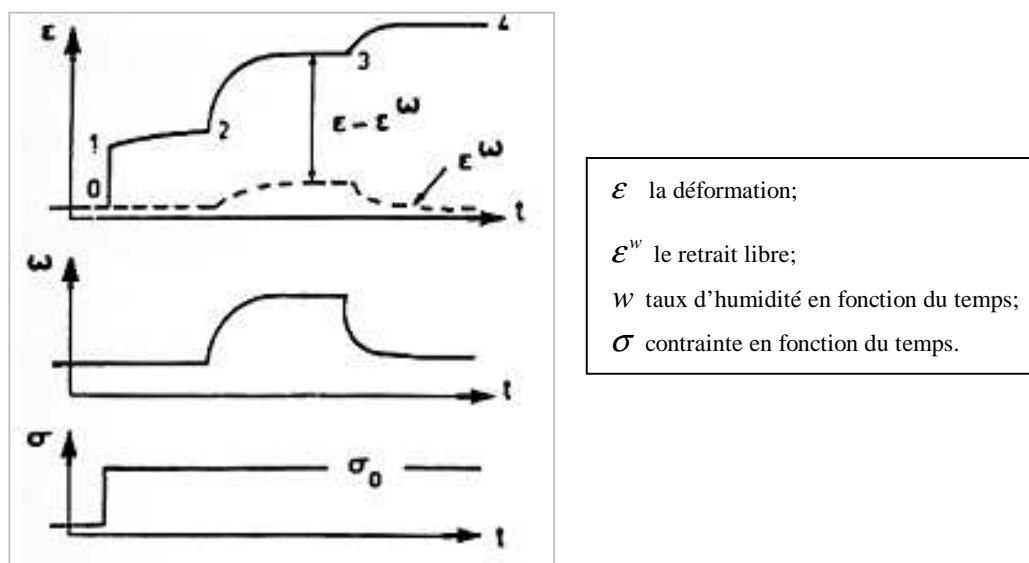


Figure I.17. Schématisation de la déformation d'un échantillon de bois chargé, soumis à un cycle d'humidité [Gril (1988)].

Différents modèles phénoménologiques ont été suggérés dans la littérature (Fig.I.18) [Ranta Maunus (1975), Salin (1992), Martensson (1992), Martensson et Svensson. (1997a, 1997b), Svensson et Toratti (2002), Hanhijärvi (2000), Hanhijärvi *et al.* (2001)]. Toutefois, le nombre croissant de paramètres alimentant ces expressions et la complexité à les déterminer expérimentalement sont des facteurs limitants à leur utilisation.

Plusieurs auteurs soulignent l'importance de **l'effet de la température** sur le comportement mécanosorptif du bois [Ranta-Maunus (1975), Gril (1988), Martensson et Svensson (1997a,b), Hanhijärvi (2000)]. Cependant, peu de modèles ont été suggérés sur ces activations thermiques ce qui devrait être une des priorités selon J.G.Salin (1999) avant de chercher de nouvelles formulations.

Des travaux récents d'Hanhijärvi et Hunt (1998) et Navi et al.(2002) montreraient l'existence d'une interaction entre le fluage viscoélastique et le fluage mécanosorptif. L'expression d'un des types de fluage diminuerait par la suite l'amplitude de l'autre. Ces résultats viennent confirmer la suspicion de J.Grill (1988) concernant l'existence d'un couplage entre les deux types de fluage, et remettent en cause la plupart des modèles, qui jusqu'alors supposaient l'indépendance de ces deux comportements.

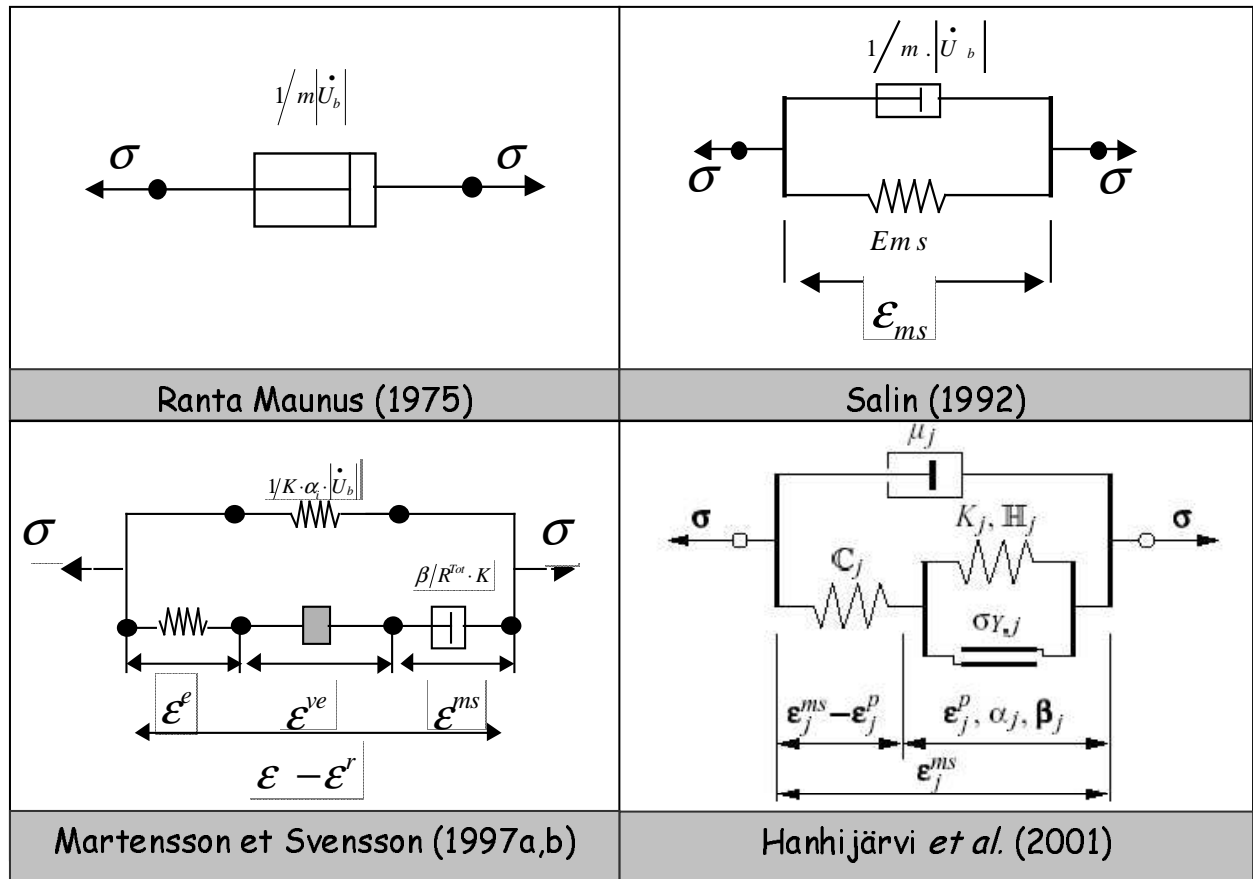


Figure I.18. Représentations rhéologiques de quelques modèles mécanosorptifs

2.2.2 Modélisation numérique du séchage

Les modèles phénoménologiques, décrits dans la partie précédente, sont utilisés dans les équations de conservation. Le jeu d'équations obtenu est, par la suite, résolu à l'aide de méthodes numériques afin de proposer une évolution temporelle possible de grandeurs tels que la température, la pression, l'humidité ou encore les contraintes mécaniques dans la planche. Il y a encore quelques années, les simulations tentaient de reproduire des observations expérimentales simples. Une transition vers des simulations prédictives est actuellement observée dans la littérature [Salin (1999), Perré (2002), Perré et Passard (2004)]. Certains programmes sont d'ores et déjà utilisés par des industriels en Finlande [Hukka (1996)] et en Suède [Salin (2001c)].

2.2.2.a *Le principe du calcul numérique*

La solution numérique d'une équation différentielle est une distribution discrète de valeurs à partir desquelles la solution de l'équation différentielle (Φ) peut être construite. Patankar (1980) compare les méthodes numériques à l'expérience de laboratoire pour laquelle une grandeur est mesurée et enregistrée de manière discrète. Le numéricien et l'expérimentateur, se contentent tous deux d'un nombre fini de valeurs numériques, en sortie de leur système respectif, pour représenter la grandeur inconnue ou mesurée.

Il faut tout d'abord discrétiser le domaine de calcul (domaine de la variable indépendante), c'est à dire le partitionner en un nombre fini de sous-domaines définis par des nœuds. La fonction inconnue Φ sera recherchée en ces nœuds. Puis, il sera nécessaire d'adopter une variation spatiale simplifiée de la fonction approchée Φ^* de Φ entre deux points voisins du sous-domaine. La discrétisation du domaine de définition et le profil simplifié de Φ , adopté entre deux nœuds voisins, permettent de remplacer les équations différentielles par un système algébrique, constituée des équations discrétisées. Celui-ci peut être résolu à l'aide d'algorithmes classiques de l'algèbre linéaire. La solution approchée demeurera une bonne interprétation physique de la réalité avec une certaine approximation par rapport à la solution exacte. Pour discrétiser les équations différentielles il existe de nombreuses méthodes, les trois plus importantes sont appelées respectivement : méthodes des Éléments finis, des Volumes finis et des Différences finies.

Plus le nombre de nœuds est important, plus la solution de l'équation discrétisée tend vers la solution exacte de l'équation différentielle. Le choix du profil de variation entre deux nœuds voisins est alors moins important car les variations de Φ autour de chacun des nœuds devient faible.

2.2.2.b *Simulation des transferts couplés*

Les développeurs modélisent les transferts couplés de chaleur et de masse suivant une, deux, ou trois dimensions spatiales, selon le temps de calcul souhaité (Tableau I.3) et les conditions de séchage utilisées. La simulation des transferts monodimensionnels (1-D) [Nijdam *et al.* (2000)] suivant l'épaisseur de la planche ou bidimensionnel (2-D) en ajoutant la largeur de la planche [Plumb (1997)] permet de modéliser convenablement le séchage basse température. Lorsque l'effet de la pression interne devient important sur les transferts (séchage haute température ou sous vide),

il est nécessaire de considérer des transferts bi-dimensionnels (2-D) suivant l'épaisseur et la longueur de la planche [Turner (1996)] ou tri-dimensionnelle (3-D) [Perré et Turner (1999)].

Tableau I-3. Ordre de grandeur du temps de calcul pour simuler complètement le séchage d'une planche avec un Pentium II, en fonction du nombre de variables indépendantes et de la dimension spatiale [Perré 1999]]. X désigne la teneur en eau du bois, T la température et P_g la pression de gaz.

	1 Variable (X)	2 Variables (X + T)	3 Variables (X + T + P_g)
1-D	Moins d'une seconde	Environ 1 seconde	Quelques secondes
2-D	Moins de 30 secondes	Environ 1 minute	Quelques minutes
3-D	Moins de 30 minutes	Environ 1 heure	Quelques heures

2.2.2.c Simulation des contraintes de séchage

La modélisation des transferts de masse et de chaleur constitue la base de la simulation sur laquelle un module de mécanique peut être ajouté afin d'estimer l'évolution des contraintes dans la planche à partir des champs d'humidité et de température simulés. Peu d'auteurs prennent en compte l'influence de la mécanique sur le séchage comme par exemple l'influence de la déformation de la planche (tuilage, vrillage, etc.) sur les transferts externes, ou l'influence des fentes de séchage sur les transferts internes.

Les modèles de comportement décrits précédemment sont utilisés pour établir l'équilibre mécanique à chaque instant. Un jeu d'équations tridimensionnelles est très coûteux en temps de calcul, en place mémoire et en paramètres pour l'alimenter. Ainsi, la mécanique du séchage est généralement abordée suivant une ou deux dimensions d'espace. En pratique le passage d'une formulation 3-D à une formulation 2-D ou 1-D n'est pas évidente. Certains auteurs [Martensson (1992), Brooke et Langrish (1997), Martensson et Svensson (1997a,b), Salin (1999), Pang (2000)] retiennent des configurations bidimensionnelles dans lesquelles l'axe longitudinal, n'a pas d'effet ni sur les contraintes ni sur la déformation qui apparaissent dans la section de la planche. La même approche peut être réalisée pour une version monodimensionnelle en négligeant l'effet des axes orthogonaux sur la direction considérée. En 2-D, ces configurations sont appelées contrainte plane et déformation plane, mais aucune n'est vraiment réaliste dans le cas du séchage [Perré et

Passard (1995)]. Ainsi en 2-D, d'autres auteurs ont supposé que la section de la planche reste un plan suffisamment loin des extrémités, et que le déplacement suivant l'axe longitudinal est linéaire [Perré et Passard (1995), Mauget et Perré (1999)]. En 1-D une approche similaire a été effectuée par Canteri (1996) qui a considéré le déplacement linéaire dans le sens de la largeur et dans le sens de la longueur de la planche.

L'hypothèse des petits déplacements et petites déformations est couramment utilisée, mais quelques modèles ont été développés en grands déplacements et petites déformations [Mauget (1996)] dans le but de pouvoir simuler des configurations expérimentales spécifiques telles que le séchage dissymétrique ou le séchage sous charge.

Martensson et Svensson (1997b), Brooke et Langrish (1997) ont comparé la contrainte maximale donnée par leur modèle 1D avec celle donnée par le 2D. Il s'est avéré que la contrainte maximale estimée par le 1D sur un axe de symétrie de la pièce est très proche de celle du modèle 2D et permet ainsi de comparer la dureté des tables de séchage. La modélisation bidimensionnelle permet en revanche d'affiner l'évaluation des contraintes et des déformations aux voisinages des bords de la planches.

2.2.2.d De la planche à la pile de planches

Les travaux modélisant le séchage de plusieurs planches sont encore rares. Pourtant, ils constituent une étape obligatoire à atteindre avant d'envisager d'optimiser les tables de séchage à l'aide de l'outil numérique. Nous citerons :

- ✓ Carlsson et Tinnsten (2002) simulent et optimisent le séchage de deux planches avec un code 2-D en transfert et en mécanique en plaçant des ordinateurs en réseau pour diminuer le temps de calcul ;
- ✓ Salin (2001a) a modifié son code *TORKSIM* pour simuler le séchage de plusieurs planches placées sur un même lit horizontal en tenant compte des variations locales des caractéristiques de l'air. Toutefois, notons que le code *TORKSIM* ne prend en compte qu'une seule variable : la teneur en eau ;
- ✓ Awadalla *et al.* (2004) modélisent les transferts couplés en 1-D pour chacune des planches de la pile, avec une formulation à deux variables indépendantes (teneur en eau, température). Ils

prennent en compte les variations locales des caractéristiques de l'air passant entre les planches. Toutefois, celles-ci sont supposées avoir des propriétés identiques (coefficient de diffusion, humidité initiale, etc.) ;

- ✓ Enfin, nous citerons Elustondo *et al.* (2002) qui ont simulé le séchage d'une pile de planches par une approche stochastique (étude statistique). Le principe consiste à entrer dans le code une fonction de distribution attribuant à chaque grandeur physique, telle que la teneur en eau initiale, la masse volumique, l'épaisseur, le débit de la planche, etc., une répartition des fréquences sur les valeurs mesurées dans la pile de planches. Ils obtiennent de manière itérative la répartition probable qu'atteindra chacune de ces grandeurs physiques dans la population de planches séchées.

Conclusion

Dans ce chapitre, le séchage a été exposé comme étant un processus complexe, où la rapidité du séchage et la qualité du produit fini sont très difficiles à obtenir. Les connaissances empiriques, synthétisées dans les tables de séchage, permettent d'obtenir des conduites satisfaisantes en terme de qualité et de durée nécessaire pour des épaisseurs et essences usuelles. Cependant, lorsque l'épaisseur et/ou l'essence sortent de l'ordinaire, les connaissances empiriques apparaissent insuffisantes. Quelques alternatives ont été présentées, notamment l'utilisation des nouveaux procédés pour sécher les fortes épaisseurs, mais ceux-ci restent coûteux pour les avivés dont l'utilisation n'engendre pas une valeur ajoutée importante.

Cette complexité est appréhendée par l'approche descriptive et déterministe du séchage et de la qualité du produit séché. Différents moyens techniques ont été mis en œuvre pour mesurer le champ de teneur en eau dans la planche. En particulier, la mesure de la transmission des rayons X à travers un échantillon de bois, se révèle être une méthode non destructive, sans contact et sûre (arrêt possible de l'émission), pour mesurer localement la teneur en eau sur toute sa gamme d'humidité. De plus, le suivi de la qualité du produit séché en réponse aux conditions externes imposées, a nécessité l'élaboration de dispositifs expérimentaux astucieux permettant d'évaluer les contraintes de séchage.

Une revue bibliographique des travaux théoriques modélisant les transferts de chaleur et de masse dans la planche, ainsi que les contraintes mécaniques, a également été présentée. La modélisation du fluage mécanosorptif, son interaction avec le fluage viscoélastique ou encore la thermohydroactivation du fluage, restent des problèmes d'actualité pour la communauté scientifique. Notons que la recherche de modèles englobant une grande partie des effets observés, conduit les auteurs à identifier de plus en plus de paramètres expérimentaux pour leurs formulations. Nous devons garder à l'esprit que ces modèles regroupent dans un même formalisme des comportements dont les origines moléculaires sont très diverses et ne peuvent s'insérer que dans une approche macroscopique du comportement. Ces formulations sont utilisées dans des équations de conservation ou pour établir l'équilibre mécanique de la planche. Le système d'équations obtenu est résolu par des méthodes numériques. Il est alors possible de simuler numériquement le champ de température, d'humidité ou encore de pression de gaz dans la planche de bois au cours du séchage. Ces données peuvent être, ensuite, utilisées par un module mécanique ajouté au code de simulation

des transferts couplés de chaleur et de masse, pour simuler l'état des contraintes internes, la déformation de la planche, etc.

Les codes de simulation commencent à être prédictifs, et quelques auteurs abordent désormais la simulation du séchage d'une pile de planches. Cette démarche représente une voie prometteuse pour optimiser les conduites de séchage.

Le chapitre suivant présente le développement d'outils expérimentaux permettant d'acquérir des données sur les transferts de masse dans la planche et sur la qualité du séchage.

II Développement d'outils expérimentaux

<u>Introduction</u>	51
<u>1 Mesure de profils d'humidité par atténuation de rayons X</u>	52
1.1 Le matériel expérimental	52
1.1.1 Le séchoir du site ENGREF	52
1.1.2 Le dispositif de rayonnement X	54
1.2 La mesure du profil d'humidité dans la planche	57
1.2.1 La méthodologie d'acquisition	57
1.2.2 Le choix de la dureté et de l'intensité du rayonnement X	60
1.2.3 Les perturbations de la mesure	61
1.3 Quelques résultats	64
1.3.1 Les conditions expérimentales et le matériel végétal des essais	64
1.3.2 Résultats et discussion	64
1.3.2.a <i>Débit sur quartier</i>	64
1.3.2.b <i>Débit sur dosse</i>	68
<u>2 Approche instrumentale de la qualité du séchage</u>	71
2.1 Le séchoir du site ENSTIB	71
2.2 Les mesures sur la planche	72
2.3 Quelques résultats	75
2.3.1 Les transferts dans la planche et le retrait	75
2.3.2 La qualité du séchage	76
<u>Conclusion</u>	79
ANNEXE II.1. Quelques photos du montage	81
ANNEXE II.2 . Organigramme du programme de traitement des données	83
ANNEXE II.3. Méthode du <i>Slicing test</i>	85

Introduction

Pour comprendre le séchage d'une planche de bois, il faut avant tout, comprendre les transferts de masse qui s'effectuent dans l'avivé. Cette compréhension des phénomènes peut être abordée en suivant le champ de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. Aussi, pour appréhender correctement l'évolution temporelle de la teneur en eau, une méthode de mesure non destructive et sans contact semble la plus appropriée. Ainsi, un dispositif mesurant le profil d'humidité dans l'épaisseur d'une planche de bois, par atténuation des rayons X, a été mis en place au niveau du séchoir du LERMaB, site ENGREF, capable d'imposer une large gamme de conditions de séchage. Dans la première partie de ce chapitre, le dispositif expérimental a été décrit, ainsi que la méthode de mesure du champ de teneur en eau et sa précision. Quelques résultats pour illustrer les informations obtenues par ce nouveau dispositif sont présentés.

D'autre part, si sécher un avivé rapidement est aisé, le sécher vite et bien est fort complexe. La variation de teneur en eau en dessous du point de saturation des fibres génère des variations dimensionnelles localisées dans le matériau, non cinématiquement admissibles. Des contraintes mécaniques apparaissent dans l'avivé qui peuvent nuire à la qualité du produit fini. Pour améliorer les conduites de séchage, il semble indispensable de comprendre comment évoluent les contraintes internes, et la qualité de la planche. Un dispositif d'observation des fentes de surface, apparaissant durant la seconde phase de séchage et révélant l'état des contraintes à la surface de la planche, a donc été mis en place. A celui-ci s'ajoutent les mesures de l'épaisseur, de la température et de l'humidité moyenne de la planche. Cette dernière approche a été réalisée sur le séchoir convectif du LERMaB site ENSTIB. Ce dispositif est décrit dans la seconde partie de ce chapitre, et quelques-uns des résultats ont été présentés.

1 Mesure de profils d'humidité par atténuation de rayons X

Cette expérience a été réalisée en collaboration avec Ricardo Baettig, doctorant au LERMaB, et travaillant sur la mesure directe de la teneur en eau du bois à l'aide des rayons X. Des résultats complémentaires seront présentés dans sa thèse (ENGREF, Juillet 2005).

1.1 Le matériel expérimental

1.1.1 Le séchoir du site ENGREF

Le séchoir utilisé a été conçu et développé dans notre laboratoire par P.Perré et F.Thiercelin pour pouvoir soumettre une planche à une très large gamme de conditions. Ainsi, la température sèche peut varier de 30 °C à 150 °C et le point de rosée peut être ajusté entre 20 °C et 130 °C. Bien sûr, avec un tel niveau de température de rosée, la cellule de séchage est conçue pour supporter jusqu'à 3 bar de pression. Ce séchoir est également capable de réaliser un vide partiel dans son enceinte jusqu'à 100-150 mbar. Nous allons décrire dans ce paragraphe le principe de fonctionnement du séchoir dans son « mode » convectif classique, une description plus détaillée sur sa polyvalence a été réalisée dans Perré *et al.*(2000), Bucki *et al.*(2001).

L'enceinte du séchoir est cylindrique, mesure 2 m de long et 90 cm de diamètre (Fig.II.1). Au contact de la planche, l'air se charge en humidité et se refroidit. Il passe ensuite dans deux ventilateurs centrifuges qui envoient une partie du flux d'air dans la partie supérieure du séchoir où deux résistances chauffantes permettent d'élever sa température à la température de consigne, et une autre dans la partie basse qui vient « lécher » une nappe d'eau régulée en température. Durant son passage sur le bac d'eau, l'air va se refroidir et se charger en vapeur d'eau jusqu'à atteindre la pression de vapeur saturante à la surface de l'eau. Il se mélange ensuite à l'air chaud venant de la partie supérieure avant de repasser sur la planche et un régime permanent se met progressivement en place. La résistance chauffante permet de maîtriser la température sèche de la masse d'air et la régulation de la température du bac d'eau permet de maîtriser la température de rosée. L'eau du bac circule dans un échangeur thermique couplé avec un groupe froid pour abaisser rapidement sa température, et deux résistances chauffantes permettent d'élever sa température lorsque ceci est nécessaire. Un ordinateur, dans lequel est programmée une table de séchage, pilote deux contrôleurs

PID. Ceux-ci maintiennent la température sèche et la température de rosée autour de la valeur de consigne. La régulation des conditions dans l'enceinte est réalisée avec une grande précision ($\pm 1/10$) de degré pour le bac d'eau, et $\pm 2/10$ pour l'air).

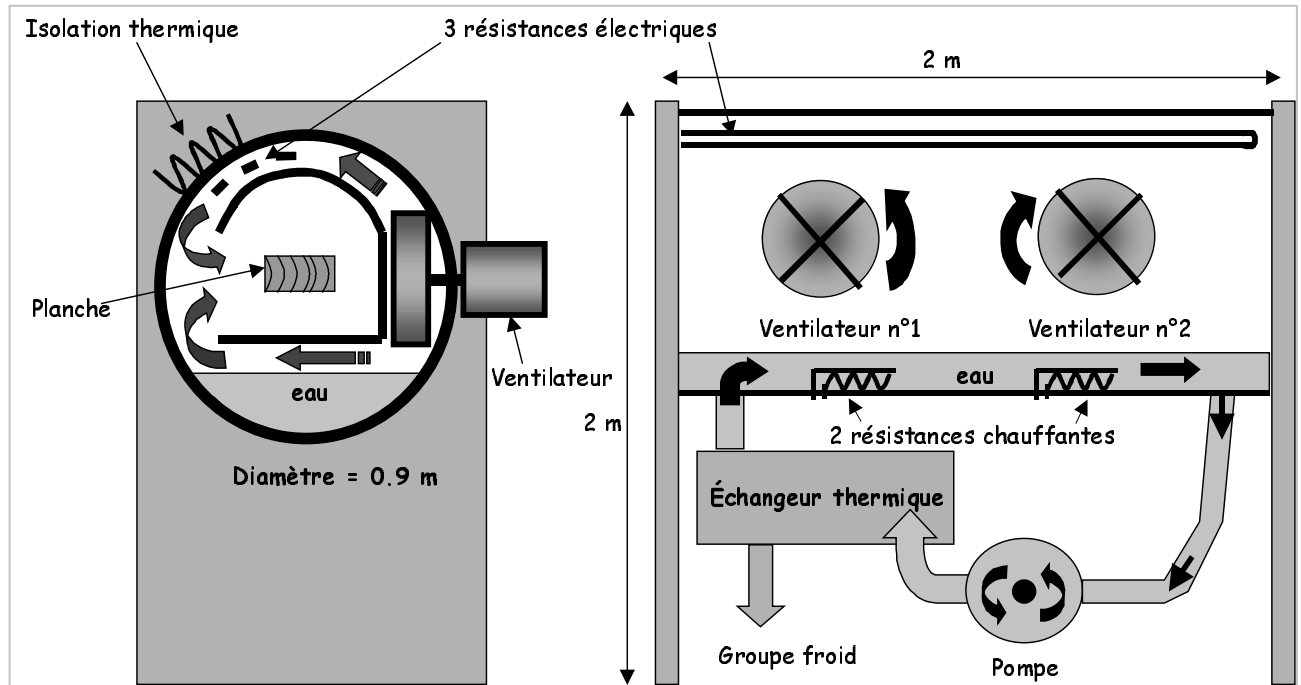


Figure II.1. Schématisation du séchoir de l'ENGREF [adapté de Perré *et al.*(2000)]

Nous avons équipé la planche d'une sonde (sonde optique de 3 mm de diamètre) mesurant la température à mi-épaisseur et une autre proche de sa surface (typiquement à 3 mm en dessous de la surface). Une balance située en dehors du séchoir permet de mesurer en continu la masse de la planche, son montage a été décrit dans Bucki (2004). Une centrale d'acquisition sert d'interface entre les appareils de mesures et un PC.

1.1.2 Le dispositif de rayonnement X

Nous avons souhaité mettre en place un dispositif de mesure de profils de teneur en eau par atténuation de rayons X, en conservant la très large gamme des conditions pouvant être appliquées par le séchoir. Les conditions drastiques dans l'enceinte, température sèche de 30 °C à 150 °C, air humide pouvant être saturé en vapeur d'eau, pression de 0,1 à 3 bar, nous ont amenés à concevoir un dispositif à l'extérieur de l'enceinte. Nous allons décrire ce dispositif expérimental élaboré, et schématisé sur la Figure.II.2.

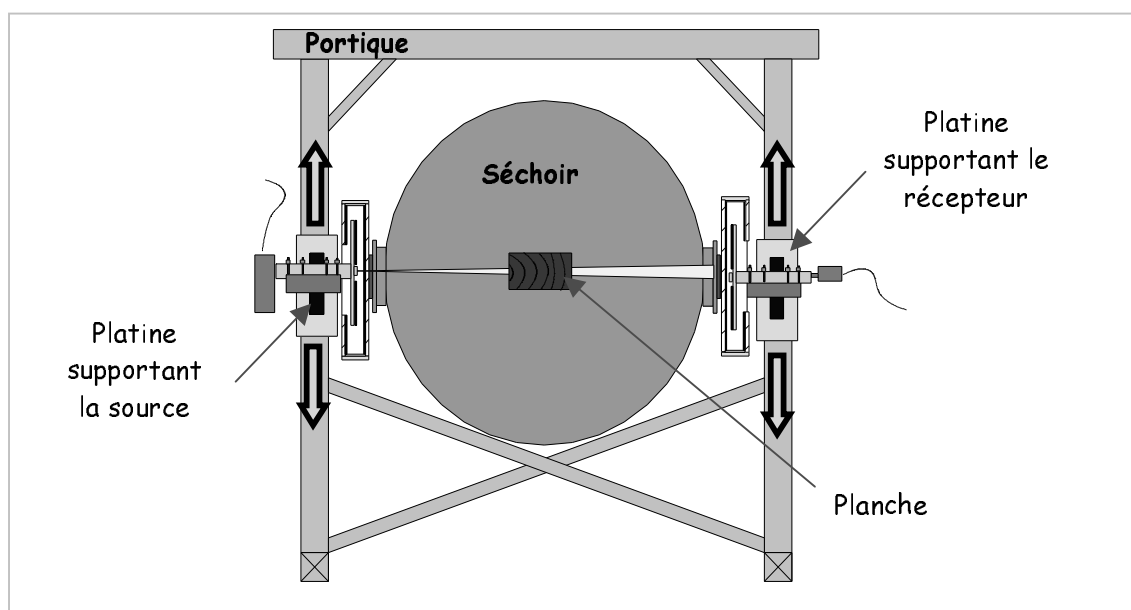


Figure II.2. Platines de déplacement fixées de part et d'autre du séchoir sur un portique rigide.

-Les platines de déplacement

Deux platines (M-UTMPE1 et M-MTMPE1 de marques *Newport*), fixées à un portique, permettent de déplacer la source et le récepteur en vis-à-vis de part et d'autre du séchoir. Chacune est entraînée par un moteur pas à pas pouvant générer un déplacement incrémental jusqu'à 1 μm de résolution. La même résolution d'affichage est obtenue à partir d'un codeur optique de positionnement, et un « top zéro » permet de trouver l'origine absolue de la platine. Un contrôleur (type MM 4006 (*Newport*)) permet de commander le déplacement des deux platines de façon synchronisée.

Le portique est réalisé avec des profils en aluminium de section 80 x 80 mm^2 (*Elcom*), contre-ventés, et ancrés au sol. Il constitue ainsi un support très stable et très rigide.

- La source de rayons X et son générateur

Nous avons utilisé un tube émetteur en céramique de diamètre de spot de 1 mm², de marque *rtw-MCB*. Sa puissance maximale est de 40 W et supporte une tension de 60 kV. L'anticathode de tungstène est refroidie par un flux continu d'eau, maintenu à une température stable avec un cryothermostat. Un générateur *Spellman XLG* alimente le tube. Ses paramètres, tension et courant, sont réglables manuellement à l'aide de potentiomètres. Ce générateur délivre une tension très stable, avec une incertitude relative inférieure à 0,02 %, après 8 heures de fonctionnement.

- La chaîne d'acquisition du détecteur

Le détecteur (Modèle Amptek XR 100T) est composé d'un petit élément de cadmium tellure (CdTe) de 9 mm² de surface et de 1 mm d'épaisseur qui est soumis à une différence de potentiel de 400 V imposée par un générateur (Model Amptek PX2T) (Fig.II.3). C'est une diode de spectrométrie X, refroidie par effet Peltier. La résolution du détecteur est de 0,53 KeV, et peut-être utilisée dans une gamme énergétique de 5 KeV à 60 KeV avec une efficacité de 100 %. Lorsqu'un photon pénètre dans le semi-conducteur du détecteur, il cède son énergie aux électrons de valence du milieu en créant tout au long de la trajectoire des charges positives et négatives mobiles, ce que l'on appelle paire électron-trou. Ces charges sont collectées par les électrodes et créent une impulsion de courant dont l'intensité est proportionnelle à l'énergie du photon. Le nombre et l'intensité de ces impulsions sont comptés par unité de temps, et sont envoyés à un amplificateur de signal (Model Amptek PX2T), puis à une carte d'acquisition (Model Amptek MCA8000A). Il est ainsi possible d'acquérir le spectre du rayonnement.

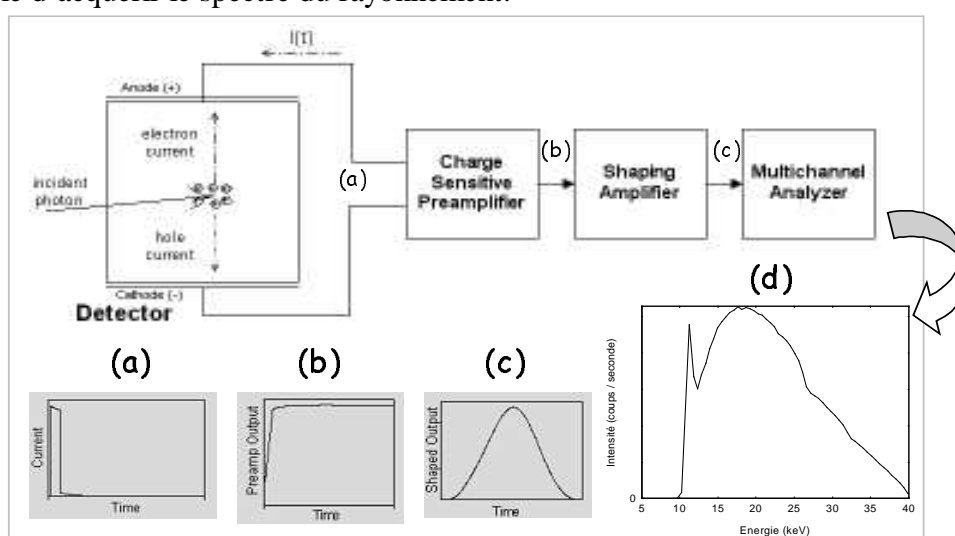


Figure II.3. Schématisation de l'acquisition du rayonnement au niveau du récepteur, avec la nature et l'évolution du signal (Illustration en partie tirée de la brochure Amptek).

- Ouvertures dans le séchoir pour la traversée du rayonnement X

Deux brides étanches ouvertes par des fentes ont été réalisées, en vis-à-vis, dans les parois du séchoir, pour permettre le passage des rayons X de l'émetteur jusqu'au récepteur. Des feuilles de Téflon® sont utilisées pour fermer ces ouvertures. Ce polymère présente l'avantage de peu atténuer le rayonnement, de supporter les températures élevées et d'être étanche à l'eau. Des câbles chauffants sont disposés de façon à maintenir ces feuilles et les brides en inox au-dessus de la température de rosée et éviter la condensation de vapeur d'eau qui perturberait la mesure du rayonnement X.

- La protection contre le rayonnement ionisant

La protection contre le rayonnement ionisant a été conçue, usinée et assemblée dans notre laboratoire. Elle est constituée d'une partie mobile, se déplaçant avec les platines de déplacement, et d'une partie statique, fixée sur le séchoir au niveau des fentes (Fig.II.4 & Annexe II.1). Les protections sont identiques pour le côté récepteur et le côté émetteur. Pour réduire leur poids, certaines pièces sont en aluminium, et sont doublées d'une feuille de plomb de 2 mm d'épaisseur. Toutes les autres pièces sont en laiton. Un système de chicanes au niveau des raccords de pièces permet d'éviter les fuites de rayons X. Enfin, deux vis de positionnement permettent de régler la position de la source par rapport à son support, afin de placer l'axe central du cône d'émission sur le récepteur.

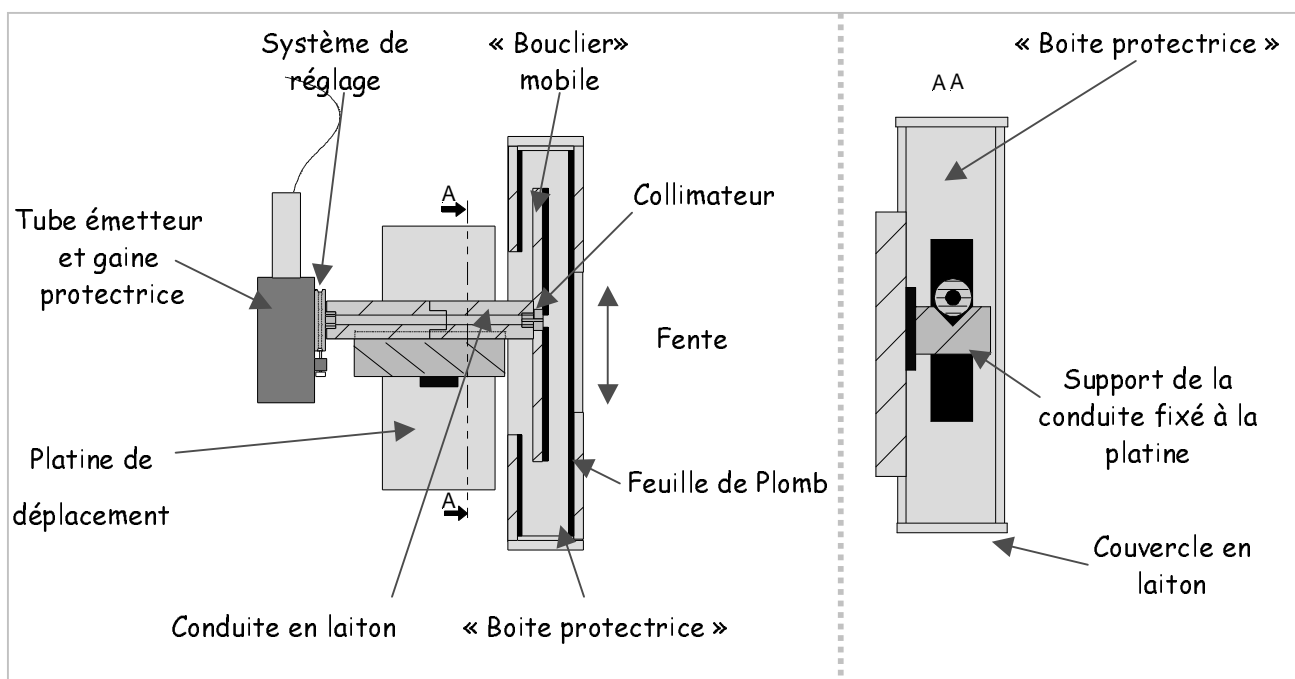


Figure II.4. Coupe de la vue de côté et de face de la protection contre le rayonnement ionisant

- Collimation

Nous avons réalisé une collimation primaire de notre faisceau X pour limiter le champ d'émission, à l'aide d'une conduite en laiton de 30 cm de long se terminant par une pièce réduisant l'orifice à 2 millimètres de diamètre (Fig.II.4 & annexe II.1). Le récepteur est situé à environ 2 mètres de la source, et reçoit un spot d'arrivée d'environ 6 centimètres de diamètre. Nous avons ajouté une collimation secondaire de 1 mm de diamètre afin que seuls les rayons (au centre du spot) ayant traversé la planche parallèlement à la surface d'échange parviennent au récepteur. Le volume de mesure est donc approximativement un cylindre de 1 mm de diamètre, traversant l'échantillon horizontalement. Une conduite en laiton de 18 cm de longueur sépare le collimateur secondaire du récepteur, et permet d'éliminer le rayonnement diffusé, créé au niveau des éléments traversés.

1.2 La mesure du profil d'humidité dans la planche

1.2.1 La méthodologie d'acquisition

Un programme d'acquisition a été réalisé en Visual-Basic pour gérer, via un ordinateur, l'ensemble des appareils de notre dispositif. Le protocole de mesure effectué par le programme se déroule selon différentes étapes exposées ci-après :

- ✓ **mesure du rayonnement incident.** Avant et après chaque balayage, le spectre énergétique du rayonnement incident, base du calcul d'atténuation (eq.I.1), a été mesuré. Le temps d'exposition doit être assez long (2.5 min dans notre application) pour obtenir un spectre suffisamment précis, notamment dans le comptage des photons de plus haute énergie (relativement moins nombreux) sachant que ce sont eux qui traverseront le bois le plus facilement (Fig.I.11) ;
- ✓ **recherche des bords de la planche.** Un balayage à pas fin (typiquement, 0,2 mm) est effectué, avant chaque mesure du profil d'humidité, au voisinage des surfaces supérieures et inférieures de la planche. Un temps de comptage de 2 secondes, pour chacune des positions de ce balayage, s'est avéré suffisant. Lorsque la dérivée de l'intensité du rayonnement transmis est maximale entre deux positions successives (contraste maximal), la position absolue de l'un des bords est repérée. Cette recherche permet de suivre l'évolution temporelle de l'épaisseur de la planche au cours de son séchage et, par conséquent, de suivre les limites du domaine à balayer ;

- ✓ **détermination des points du balayage.** Les positions des points du balayage sont définies proportionnellement à l'épaisseur de la planche (Table.II.1). Nous avons conscience, que cette considération ne prend pas du tout en compte les retraits locaux, et répartit le retrait global de l'épaisseur sur l'ensemble des points du balayage. D'autre part, ce retrait non homogène sur un échantillon de bois hétérogène (bois d'été, bois de printemps, densité locale, etc.) selon son épaisseur, augmente l'incertitude sur la mesure de la teneur en eau, à une position donnée. Un déplacement des platines selon les coordonnées lagrangiennes de l'épaisseur de la planche serait nécessaire, mais sa réalisation est difficile ;

Tableau II-1. Positions des points du balayage relativement à l'épaisseur de la planche (en pourcentage d'épaisseur), et durée d'acquisition à chacune de ces positions (les positions symétriques sont sous-entendues).

Position	Planche de 35 mm	Planche de 65 mm	Temps (s)
0	En dehors de l'échantillon	En dehors de l'échantillon	150
1	5 %	3 %	40
2	10 %	5 %	40
3	15 %	8 %	40
4	20 %	12 %	40
5	27 %	16 %	40
6	35 %	20 %	40
7	45 %	25 %	40
8	--	30 %	40
9	--	35 %	40
10	--	45 %	40

- ✓ **balayage de l'épaisseur et comptage des photons X transmis.** Le détecteur permet de mesurer le spectre du rayonnement transmis, pour chaque position, à l'instant t du séchage. Il est nécessaire de choisir un compromis entre la durée d'exposition du capteur au rayonnement X à une position donnée de l'échantillon, et la durée totale du balayage pour couvrir toute l'épaisseur. La première augmente la précision de la mesure ; la seconde doit-être faible pour réduire la perturbation apportée par le séchage durant l'acquisition d'un profil. Dans ce but, nous réalisons deux balayages, de sens opposés, et nous cumulons les deux spectres obtenus pour chacune des positions. Le temps total du balayage de l'épaisseur est d'environ 30 minutes.

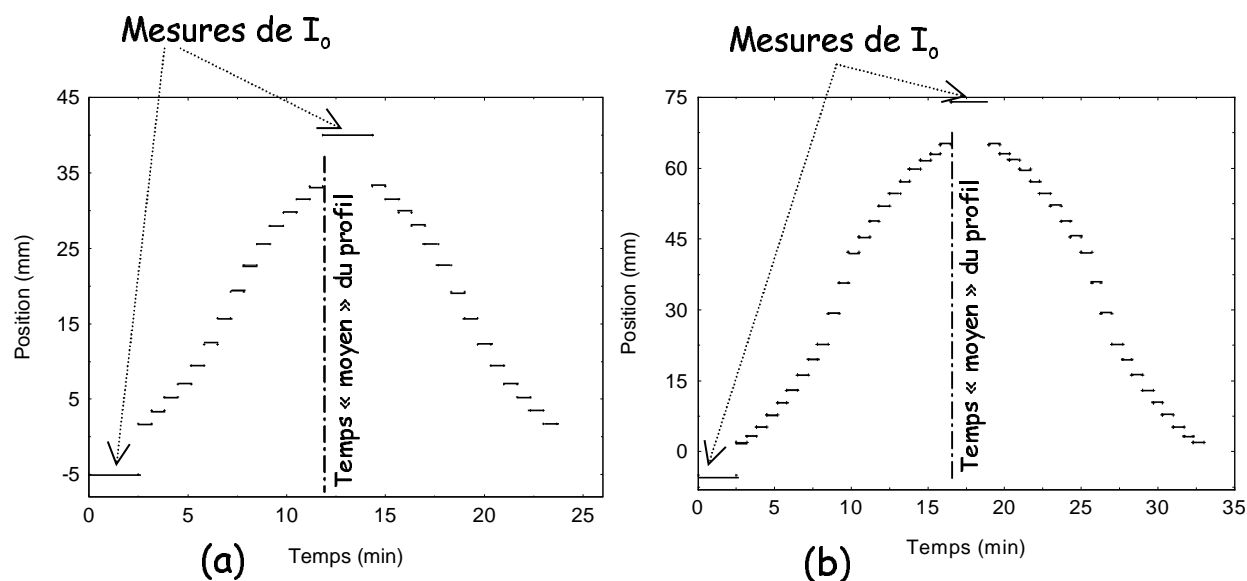


Figure II.5 Temps d'acquisition aux différentes positions du balayage : (a) planche de 35 mm, et (b) planche de 65 mm.

Le cycle est arrêté lorsque la masse de la planche atteint une valeur constante. Le profil d'humidité à la fin du test est déterminé par découpe de la section en lamelles (5 à 9 lamelles suivant l'épaisseur) et une double pesée de chacune d'elles (avant et après le passage dans une étuve à 103°C).

La transmission des rayons X et les coefficients d'atténuation des atomes constitutifs du matériau permettent de déterminer la teneur en eau du bois par la méthode inverse (Annexe.II.2).

1.2.2 Le choix de la dureté et de l'intensité du rayonnement X

- Choix de la dureté du rayonnement

Pour des humidités élevées, un rayonnement *mou* fera parvenir au récepteur trop peu de photons pour avoir une mesure précise. Ce type de rayonnement conviendra en revanche pour traverser un bois plus sec, et permettra par exemple de révéler les variations de densité à l'intérieur du matériau (Perré et Thiercelin (papier soumis)). A l'inverse, un rayonnement dur traverse trop facilement le bois sec pour permettre une mesure précise de l'atténuation et révéler ces variations, mais il trouvera son utilité lorsque la teneur en eau du bois est élevée.

La dureté du rayonnement devrait donc varier avec la teneur en eau de l'échantillon, pour obtenir une mesure d'atténuation plus précise. Cependant, le régime permanent de l'émission est obtenu environ quatre heures après l'entrée de la consigne. Il est donc impossible de faire varier cette dernière durant l'acquisition. Par conséquent, nous avons choisi une dureté de rayonnement intermédiaire constante de **40 keV**, qui n'est vraisemblablement pas la dureté pour laquelle la précision de la mesure est optimale sur l'ensemble du séchage, mais celle-ci ne peut pas être trouvée sans une étude approfondie spécifique. D'autre part, nous travaillons avec un spectre polychromatique, qui permet donc de toujours avoir une zone énergétique « sensible » pour la mesure de teneur en eau, que l'avivé soit sec ou humide.

- Choix de l'intensité

Le choix de l'intensité du rayonnement s'effectue en cherchant à obtenir un taux de photons X s'approchant de la limite haute du domaine de linéarité du récepteur (taux seuil ≈ 2500 coups/s pour notre capteur) car plus le nombre de photons comptés est important, et plus la mesure est précise pour un temps d'acquisition donnée. A partir du taux de transmission « à vide », nous avons réglé le courant électrique de retour au générateur sur la valeur de **10 μ A**.

1.2.3 Les perturbations de la mesure

La détermination de la teneur en eau du bois par cette méthode non destructive et sans contact est soumise à différentes perturbations inhérentes au matériel adopté ou à l'action d'autres grandeurs physiques qui ne sont pas l'objet de la mesure :

- caractère aléatoire de l'émission

L'émission du rayonnement X a un caractère aléatoire qui suit approximativement une loi de Poisson. Rappelons que l'écart type de cette distribution est égal à la racine carrée de la variance, et la probabilité de contenir la valeur dans un intervalle de $\pm \sigma$ (écart type) est de 68 %, et de 99,7 % dans un intervalle de $\pm 3\sigma$. Nous avons pu estimer le domaine d'incertitude de la mesure de la teneur en eau (Fig.II.6) dû au caractère aléatoire de l'émission à l'aide : d'une méthode statistique donnant une suite de rayonnements incidents aléatoires obéissant à une distribution de Poisson, de l'équation déterministe de la transmission du rayonnement (eq.I.1 et eq.I.2) et de l'algorithme de minimisation décrit dans l'annexe II.2.

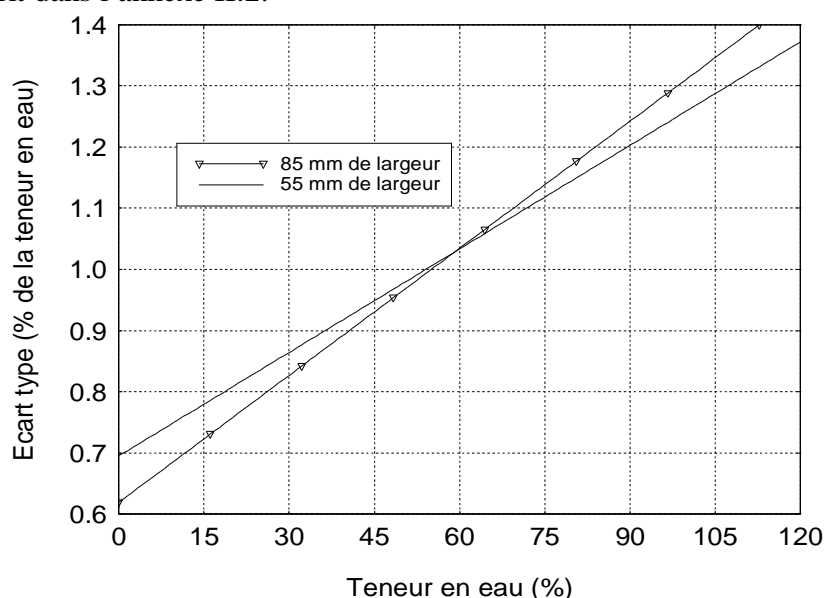


Figure II.6. Incertitude sur l'estimation de la teneur en eau, en fonction de l'humidité réelle de l'échantillon. dans les conditions de notre application : 40 kV, 0.01 mA, 80 s d'expositions, et pour des échantillons de bois de 55 mm et 85 mm de large.

Ainsi, l'incertitude sur la mesure augmente-t-elle avec la teneur en eau du bois. Nous constatons sur la figure II.6, que la mesure est plus précise dans les faibles humidités lorsque la largeur de matière ligneuse traversée est plus importante.

-Erreurs de comptage au niveau du récepteur

Le phénomène de recombinaison des électrons-trous dans le semi-conducteur du détecteur conduit une fraction de charges à ne pas être collectée par les électrodes. Ce phénomène perturbe la mesure par une perte de linéarité entre l'énergie du photon frappant la diode et l'énergie mesurée par le capteur. Cet effet conduit à surévaluer le nombre de photons peu énergétiques arrivant jusqu'au récepteur, au détriment des photons plus énergétiques. Sur la figure II.7, nous voyons la conséquence de cet effet sur les coefficients d'atténuation expérimentaux du bois et de l'eau, par comparaison avec ceux du *NIST* (*National Institute of Standards and Technology, USA*), mesurés sans cet effet.

Le programme de traitement des données (Annexe.II.2) a été alimenté à partir des coefficients d'atténuation expérimentaux, et nous nous sommes limités à la gamme énergétique [15 keV ; 35 keV] pour diminuer la perturbation, générée par le phénomène de recombinaison des électrons-trous sur la mesure de la teneur en eau. Nous remarquerons que l'échantillon de bois anhydre utilisé dans la mesure du coefficient d'atténuation du bois provient du même arbre que les échantillons dont les profils d'humidité ont été étudiés.

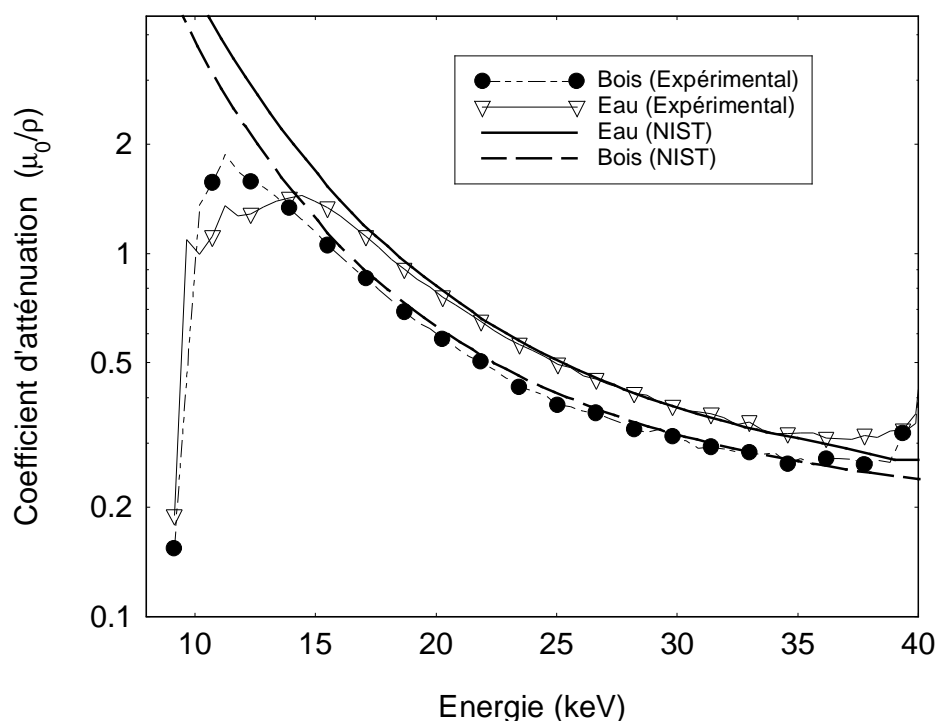


Figure II.7. Conséquence du phénomène de recombinaison des électrons-trous sur les coefficients d'atténuation de l'eau et du bois mesurés expérimentalement, par comparaison avec ceux du *NIST*. (Echelle logarithmique en ordonnée)

D'autre part, la résolution du capteur conduit à classer les photons par gamme d'énergie d'environ 0,4 keV (données constructeur) à 40 keV, ce qui perturbe la mesure. Ceci conduit par exemple les deux raies L du tungstène de l'anticathode à figurer sous la forme d'un seul pic au niveau du spectre mesuré (Fig.II.3-(d), p 55).

-Perturbation thermique

Le séchoir étant placé dans un local fermé, son fonctionnement élève la température du lieu. Aussi, la fluctuation de la température de la pièce entre le jour et la nuit, avec les déperditions thermiques, perturbe-t-elle le comptage des photons au niveau du récepteur:

- ✓ la dilatation des collimateurs réduit le diamètre de leurs orifices et diminue le nombre de photons arrivant jusqu'au récepteur ;
- ✓ la dilatation des profilés dans un ensemble sans degré de liberté peut conduire le portique à « vriller » très légèrement. La déformation engendrée amènerait le récepteur à recevoir une partie différente de la base du cône d'émission, sur laquelle le nombre de coups n'est pas réparti de façon homogène ;
- ✓ le réchauffement du récepteur affecte la linéarité du signal.

Pour limiter l'effet de la température, les essais de séchage ont été réalisés à température constante, un système de refroidissement à eau au niveau du récepteur a été ajouté, et le spectre énergétique du rayonnement incident est mesuré à chaque balayage.

-Perturbation due au retrait du bois

Le retrait perturbe la mesure d'atténuation du rayonnement X pour deux raisons majeures :

- ✓ la surface séchant avant le cœur, le retrait va être hétérogène dans l'épaisseur de la planche. Par conséquent, le faisceau ne suit pas un parcours unique à une position relative donnée dans l'épaisseur de l'avivé. Or la densité du bois peut-être très hétérogène suivant cette direction ;
- ✓ le retrait modifie la densité de matière ligneuse (rapprochement des parois cellulaires) lorsque la teneur en eau diminue.

A l'heure actuelle, il est très difficile de suivre et de corriger l'influence du retrait sur ces différents points.

1.3 Quelques résultats

1.3.1 Les conditions expérimentales et le matériel végétal des essais

Les planches présentées dans cette partie ont été prélevées à 1,5 mètres de l'empatement, dans un épicéa de 30 cm de diamètre à l'état vert, poussant dans une futaie proche de Nancy.

Deux planches ont été débitées sur quartier et rabotées aux dimensions 35 x 55 x 600 mm³, 65 x 85 x 600 mm³, et une autre a été débitée sur dosse aux dimensions de 35 x 71 x 600 mm³.

Pour mettre en valeur les capacités de notre dispositif à réaliser des mesures au-dessus du point de saturation des fibres, chacune de ces planches contient de l'aubier. Enfin, pour approcher le comportement réel des transferts de masse dans des planches larges et de grande longueur, les extrémités des pièces et les faces latérales ont été recouvertes d'une colle polyuréthane pour empêcher les transferts sur ces faces.

Les conditions de séchage appliquées sont sévères (*température sèche : 70 °C, température de rosée : 60 °C, humidité d'équilibre du bois : 8 %, vitesse de l'air : ~1,5 m/s*).

1.3.2 Résultats et discussion

1.3.2.a Débit sur quartier

Après une phase de réchauffage d'environ une heure (Fig.II.8), la température des deux planches dépasse la température humide de l'air (59.5 °C), ce qui prouve l'absence d'une première phase de séchage. La périphérie du matériau a donc son humidité en dessous du point de saturation des fibres. Nous noterons que le ratio *épaisseur/largeur* étant proche de 1, le flux de chaleur s'effectue de façon bidimensionnelle dans la planche.

Durant les 6 premières heures, les profils présentent la forme caractéristique d'un *séchage à front* (escarpés à la périphérie de la planche, et plat dans la partie centrale) (Fig.II.10), en raison des transferts externes intenses imposés et de l'inertie du matériau à mettre en place la migration capillaire. Nous remarquerons, au début du séchage, que l'humidité de la planche de forte épaisseur est beaucoup plus élevée à la périphérie que dans la partie centrale. Cette distribution de teneur en

eau est essentiellement due au débit des planches. Nous voyons, en effet, sur la figure II.11 que les cernes de croissance ont une courbure forte dans la section, et par conséquent, les rayons X traversent une épaisseur d'aubier plus ou moins importante selon la position à laquelle on se situe. L'aubier étant la partie la plus humide du bois, le profil mesuré initialement n'est pas plat.

La cinétique du séchage diminue progressivement (Fig.II.9) avec la contribution croissante de la diffusion de la vapeur d'eau et de l'eau liée dans le transfert de masse. Les profils d'humidité prennent peu à peu une forme parabolique (Fig.II.10) avec le ralentissement des transferts à la périphérie du matériau.

Nous noterons (Fig.II.9) que l'évolution de l'humidité à la surface du matériau est à peu près similaire pour les deux épaisseurs d'avivé. Cependant, l'évolution de la teneur en eau des couches plus profondes, à des positions à égale distance de la surface d'échange, est très différente pour les deux épaisseurs (Fig.II.9). Le cœur constitue en effet une réserve en eau qui s'amenuise rapidement pour la faible épaisseur, et devient insuffisante pour alimenter par capillarité le front d'évaporation en eau libre. Le **gradient d'humidité** est par conséquent **plus important pour les fortes épaisseurs** à une distance donnée de la surface.

Lorsque l'épaisseur de la couche se situant dans le domaine hygroscopique augmente, le flux d'humidité interne diminue. L'écart de température entre cette *couche sèche* et l'air se réduit pour diminuer les transferts de chaleur et maintenir l'équilibre énergétique. Nous l'observons sur la figure II.8 à 6 h pour la surface et 18 h pour le cœur de la planche de 35 mm d'épaisseur, et à 24 h pour la surface et à 84 h pour le cœur de la planche de 65 mm.

Lorsqu'en tout point l'humidité est en dessous du point de saturation des fibres (environ 26 % à 70 °C), la planche entre en troisième et dernière phase de séchage (à 18 h et à 84 h, respectivement, pour la planche de 35 mm et celle de 65 mm d'épaisseur (Fig.II.9)). Durant cette phase, la température interne tend vers la température sèche de l'air (Fig.II.8) et les profils d'humidité paraboliques s'aplatissent peu à peu jusqu'à atteindre la teneur en eau d'équilibre dans toute l'épaisseur de la planche (Fig.II.10).

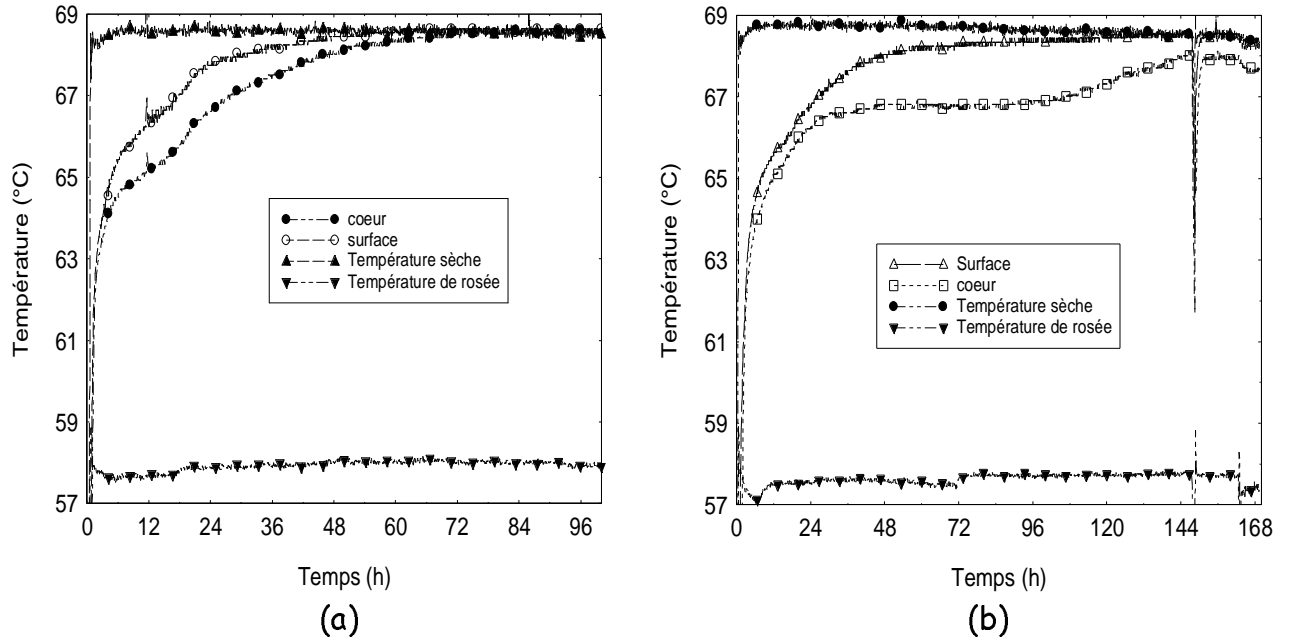


Figure II.8. Évolution de la température au niveau de la surface et du cœur de la planche de 35 mm (a), et de 65 mm d'épaisseur (b).

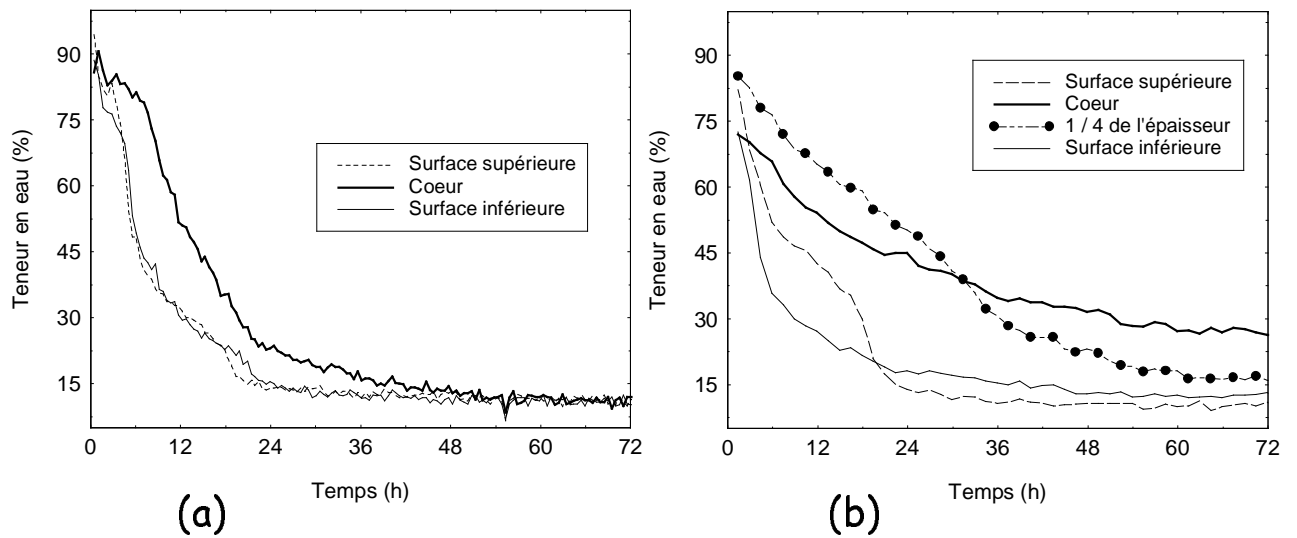


Figure II.9. Évolution de la teneur en eau au voisinage de la surface et du cœur, pour la planche de 35 mm d'épaisseur (a), et pour la planche de 65 mm (b).

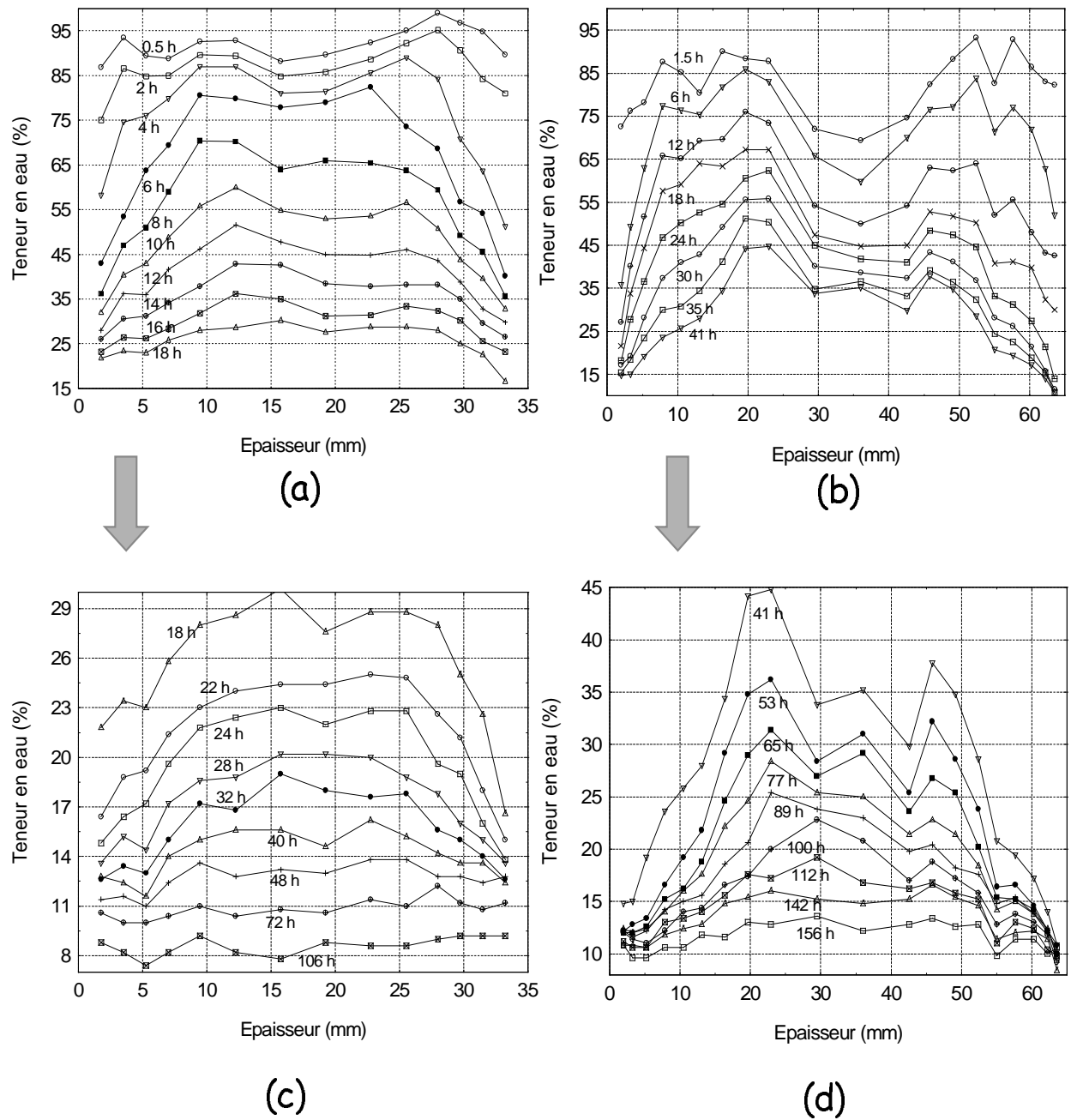


Figure II.10. Profils d'humidité dans l'épaisseur de la planche de 35 mm (a et c), et de 65 mm (b et d). (a) et (b) sont les profils mesurés au début du séchage, et (c) et (d) les suivants.

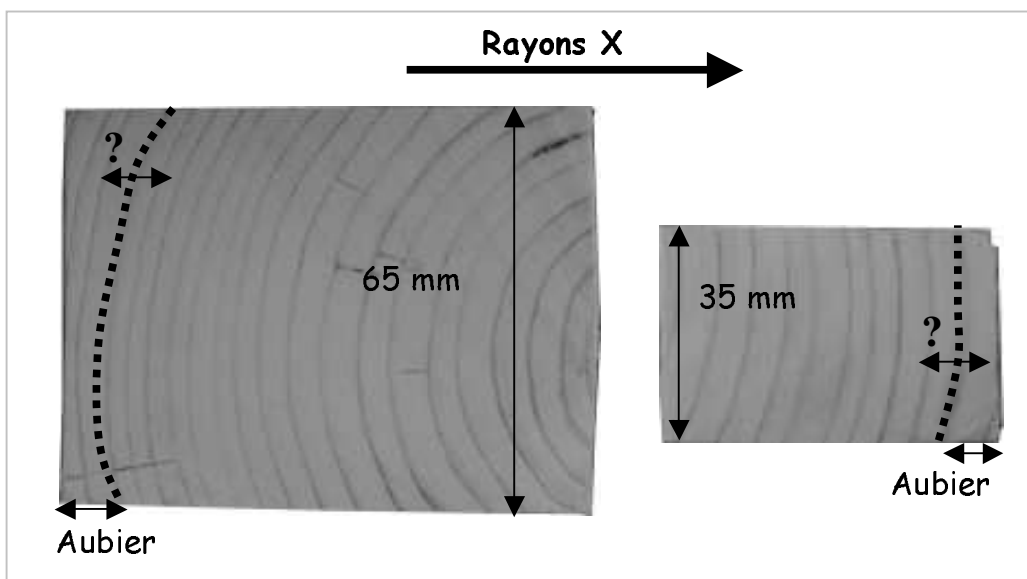


Figure II.11. Photographies de la section des deux planches séchées. La limite en pointillée schématise la courbure de la frontière aubier/duramen, mais sa position précise n'a pas été déterminée.

1.3.2.b Débit sur dosse

Le débit sur dosse présente le désavantage d'avoir des accroissements annuels parallèles à la direction du rayonnement X. Ainsi, l'alternance du bois d'été et de printemps s'observe sur la forme du profil d'humidité, car le bois d'été a une teneur en eau initiale plus faible. Aussi, ces variations importantes, associées au retrait non homogène de l'épaisseur qui modifie la position du rayonnement X sur l'échantillon, vont-elles augmenter l'incertitude de la mesure d'humidité.

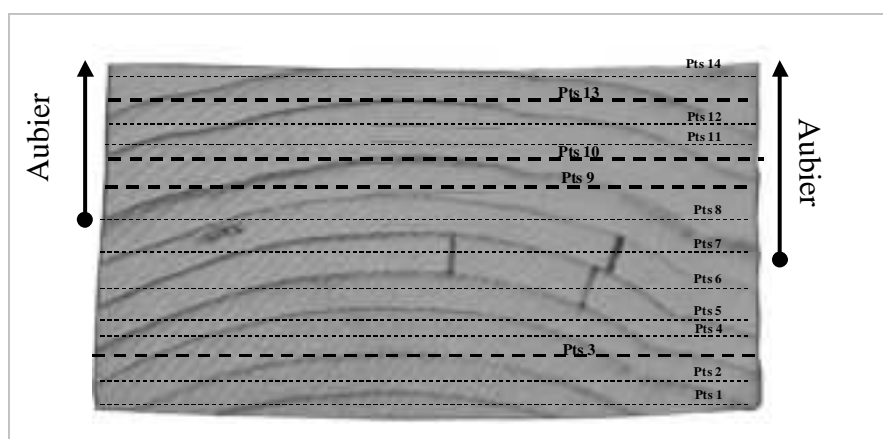


Figure II.12. Illustration des positions des points du balayage dans la section de la planche (dimensions : 35 mm x 70 mm).

Les points les plus sensibles à cette perturbation sont ceux dont la direction du rayonnement tangente un cerne (Points 3, 9, 10, 13 (Fig.II.12)), car ils se situent à la frontière de deux zones

d'atténuation très différentes. D'autre part, ce débit va conduire la planche à tuler avec l'expression de son retrait. Le repérage des surfaces par le rayonnement X (contraste maximal entre deux points consécutifs) est plus imprécis et l'erreur se transmet aux positions des points du balayage

Nous distinguons très clairement sur la figure II.13-(a) la partie aubieuse, beaucoup plus humide, la zone de transition (5 mm environ) mélangeant aubier et duramen, et enfin le duramen de la planche. Il semblerait que le séchage de ces deux parties se réalise indépendamment l'une de l'autre. La migration liquide de l'aubier vers le duramen n'est pas visible, et une frontière basse/haute teneur en eau se maintient à la même position durant la première journée de séchage. Cette constatation reste à l'heure actuelle une question ouverte.

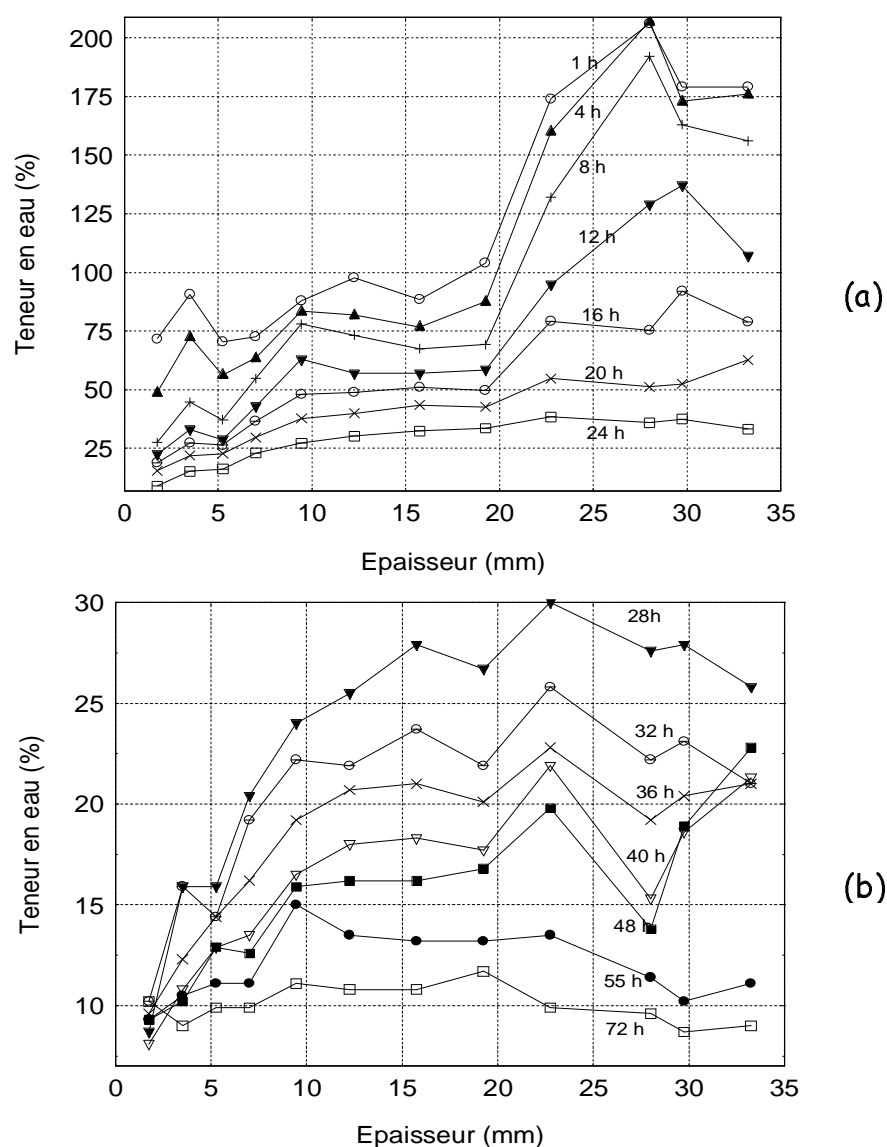


Figure II.13. Profils de teneur en eau dans la section. Les profils (a) sont obtenus au début du séchage et (b) sont les suivants. Les positions 13 et 10 (Fig.II.12) ne sont pas représentées sur ces profils.

La température proche de la surface est mesurée dans la partie aubieuse de la section. Là encore, les courbes de température nous indiquent l'absence d'une première phase de séchage car elles dépassent la température humide de l'air dès le commencement (Fig.II.14-(a)).

L'absence de cette phase est surprenante en raison du niveau très élevé d'humidité et la forme plate des profils de teneur en eau. Plusieurs explications semblent plausibles :

- ✓ un séchage à front avec une fine couche sèche périphérique qui se développe dès le début du séchage et permet un réchauffement de la planche. [Wiberg *et al.* (2000), Rémond *et al.* (2005)] ;
- ✓ une perturbation locale de la migration capillaire autour de la sonde de température qui conduit à diminuer l'évaporation et à réchauffer localement le bois.

Le cœur est réchauffé par la partie inférieure de la planche qui est plus chaude au début du séchage car elle est moins humide (capacité calorifique plus faible et évaporation moins intense). De plus, les transferts thermiques au niveau des faces latérales de la planche vont chauffer la partie centrale avant la surface (transfert de chaleur bidimensionnel) (Fig.II.14-(b)). Par conséquent, au début du séchage, la température à cœur est supérieure à celle mesurée à la surface de la planche, puis ces températures s'inversent lorsque la surface sèche et réduit son écart de température avec celle de l'air.

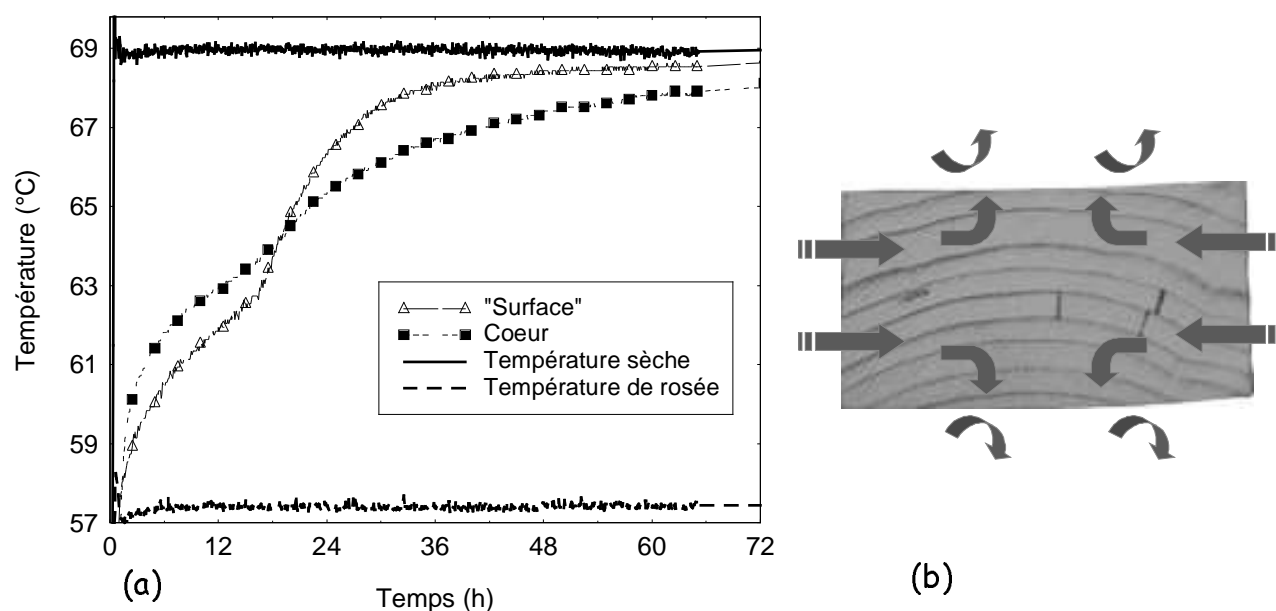


Figure II.14. Evolution temporelle de la température à cœur et à la « surface » (2 mm en dessous de la surface) (a) et schématisation des transferts de chaleur par les faces latérales de la planche (b).

2 Approche instrumentale de la qualité du séchage

2.1 Le séchoir du site ENSTIB

Les essais ont été réalisés sur un tunnel de séchage, semi-automatique, de type air chaud climatisé de l'ENSTIB (Fig.II.15). Ce séchoir permet de placer plusieurs planches dans son enceinte ($0,4 \text{ m}^3$), et sa géométrie accompagnée d'un environnement dégagé, permet de mettre facilement en place l'équipement d'acquisition d'image qui sera détaillé dans le paragraphe II.2.2. Nous avons cherché à acquérir un grand nombre d'informations pour caractériser à la fois les transferts dans la planche et sa qualité, à l'aide d'une instrumentation simple.

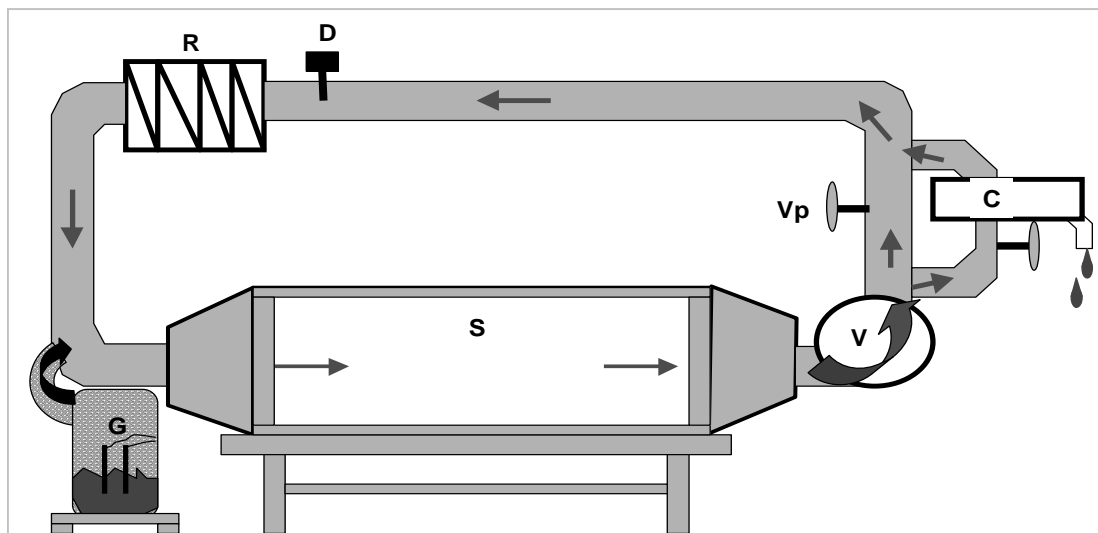


Figure II.15. Séchoir à air chaud climatisé (ENSTIB).

L'air est chauffé par une résistance R, humidifié par un générateur de vapeur G (Electro-Vap EL5), et entre dans la cellule S où est placé le bois. L'air s'humidifie et se refroidit au contact du bois, une batterie froide (condenseur) C située dans le circuit secondaire permet de déshumidifier l'air, si nécessaire. Un ventilateur centrifuge V assure un débit d'air réglable avec une vanne Vp entre 600 et 2000 m^3/h , mesuré par le débitmètre D. Les parois du séchoir sont équipées de rubans chauffants régulés par un thermostat pour éviter la condensation au niveau des parois.

La température dans l'enceinte du séchoir (S) est mesurée par une sonde de platine (PT 100) et l'humidité relative de l'air par une sonde capacitive. Une mesure de la température humide de l'air

a été ajoutée pour pouvoir contrôler la justesse de la mesure du capteur capacitif lorsque l'humidité relative de l'air est très élevée. Les sondes de mesure de l'humidité de l'air ont été calibrées à l'aide d'un hygromètre à point de rosée.

2.2 Les mesures sur la planche

-Mesure de la température interne

La température est mesurée en continu à différentes positions dans la planche à l'aide de thermocouples calibrés. Ceux-ci sont introduits dans la planche parallèlement à la surface d'échange. L'extrémité du thermocouple, où se situe le point de mesure, est ainsi située sur une surface isotherme. Généralement, deux thermocouples ont été insérés dans chaque planche : l'un est à la mi-épaisseur et l'autre est proche de la surface (typiquement à 1 mm en dessous de la surface). D'autre part, afin de réduire les perturbations sur la pesée et sur la conduction de chaleur le long de la gaine du thermocouple, les gaines utilisées sont de faible diamètre (0,5 mm).

-Mesure de la masse de la planche

Pour suivre l'évolution de la masse de deux planches, deux cellules de masse compensées pour les changements de température, jusqu'à une température maximale de 110 °C, sont fixées sur un montage simple (Fig.II.16). L'erreur absolue est d'environ 0.02 N.

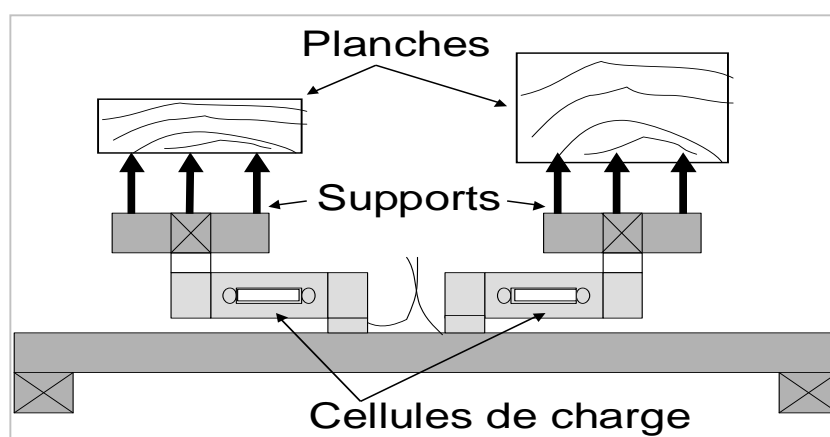


Figure II.16 . Montage pour suivre la masse de deux planches.

Pour retrouver l'humidité moyenne des échantillons au cours du séchage, ceux-ci sont placés à la fin du séchage dans une étuve à 103 °C, jusqu'à stabilisation de leur poids, pour déterminer leur masse anhydre.

-Mesure du changement de l'épaisseur

Des étriers équipés de capteurs de position (potentiomètre) (Fig.II.17) ont été conçus pour mesurer en continu l'épaisseur de la planche. Les étriers sont composés de deux barres d'aluminium en forme de U. Celles-ci augmentent l'inertie mécanique dans la direction verticale (Fig.II.17) et empêchent la flexion des barres sous l'action du ressort du potentiomètre. Afin d'éviter l'effet de la température sur la résistance électrique, les positions sont déterminées par la mesure des tensions aux bornes des potentiomètres montés en pont diviseur de tension avec un générateur de tension continue.

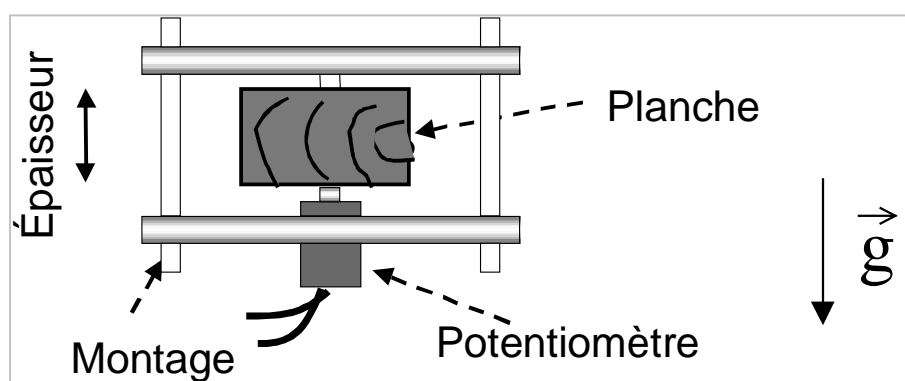


Figure II.17. Montage et capteur de position

La dilatation thermique des étriers a été contrôlée jusqu'à une température de 75 °C, en remplaçant la planche par un morceau de granit de 60 mm d'épaisseur possédant un coefficient de dilatation thermique très inférieur à celui du bois. La dilatation des étriers, mesurée en régime transitoire dans les premiers instants de l'expérience, est de l'ordre de 0,04 mm.

-Observation des surfaces

Un appareil photo numérique, Olympus C-4040, est contrôlé par ordinateur via un port USB, pour acquérir des images de la surface du bois. L'appareil photo est placé en dehors du séchoir, et observe la surface de la planche à travers une double paroi en verre. Pour éviter la condensation de la vapeur d'eau sur les surfaces vitrées (Fig.II.18), deux précautions ont été prises :

- ✓ un câble chauffant est inséré entre les deux parois. Il maintient le volume d'air, emprisonné entre les deux surfaces vitrées, à une température supérieure à la température de rosée de l'air circulant dans la cellule de séchage ;

- ✓ la paroi, séparant ce volume d'air confiné de l'atmosphère extérieure, n'est pas étanche. Ainsi, la pression de vapeur de ce volume et celle de l'air extérieur sont égales.

Un éclairage froid, utilisant une ampoule halogène et une fibre optique pour déporter le faisceau lumineux à l'intérieur du séchoir, a été utilisé pour éclairer périodiquement (typiquement toutes les 30 min) la surface de la planche sans perturber son séchage. Le programme écrit en Visual Basic, allume la lampe, prend la photo, télécharge l'image et la sauvegarde dans le disque dur du PC, efface la mémoire de l'appareil photo numérique et éteint la lampe, à chaque pas de temps (typiquement toutes les 30 minutes).

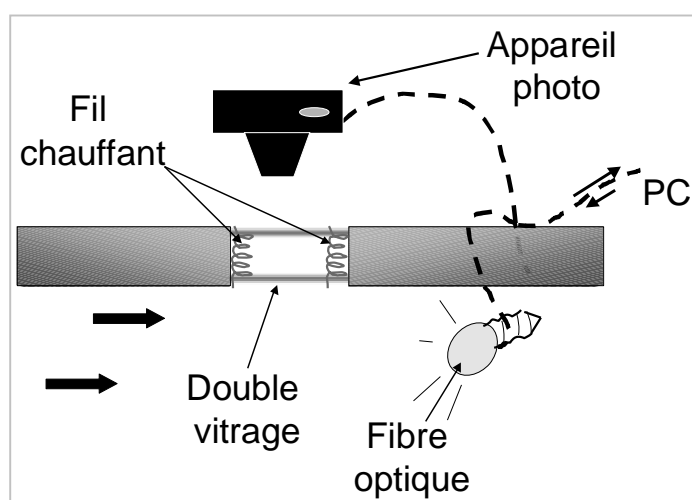


Figure II.18. Schématisation du dispositif d'acquisition d'images de la surface de la planche.

Les photos couleurs obtenues (4,1 millions de pixels) permettent de suivre l'évolution de la face supérieure de la planche, à mi-longueur, sur une surface de 6 x 12 cm².

-Mesures après séchage

A la fin du cycle, trois échantillons ont été découpés sur chaque planche, à mi-longueur :

- ✓ le premier échantillon permet de mesurer l'humidité moyenne de la planche à la fin du séchage par la méthode de double pesée. Une partie de cette section est ensuite utilisée pour déterminer l'infradensité de la planche de bois (le volume saturé est estimé avec le principe de la poussée d'Archimède). Une autre partie permet d'obtenir les coefficients de retraits transversaux du bois ;

- ✓ le second est utilisé pour déterminer le gradient d'humidité dans l'épaisseur de la planche, par découpe de lamelles et par la méthode de double pesée ;
- ✓ la troisième section est coupée en deux parties pour relaxer les contraintes résiduelles de séchage (méthode du *Slicing test*) (Annexe II.3). La flèche est mesurée juste à la fin du séchage (flèche « immédiate ») et une nouvelle fois, 8 jours après. Durant cette période, l'échantillon est enfermé dans une boîte étanche pour que sa teneur en eau s'homogénéise.

2.3 Quelques résultats

2.3.1 Les transferts dans la planche et le retrait

Deux planches ont été soumises à des conditions de séchage sévères (*température sèche : 62 °C , température humide : 38 °C , humidité d'équilibre du bois : 4 %*). Elles ont été prélevées dans la partie duraminisée de l'arbre, débitées sur dosse et rabotées aux dimensions de 41 x 220 x 750 mm³ et de 20 x 220 x 750 mm³. La planche la plus fine a été débitée dans les mêmes accroissements que la plus épaisse. La vitesse de l'air était de 2,5 m/s.

La variation de l'épaisseur des planches donne des informations sur l'évolution de l'humidité et des contraintes internes. Elle permet par exemple de déterminer (Fig.II.19) :

- ✓ l'instant à partir duquel le retrait apparaît dans l'épaisseur. Il marque l'entrée de la planche en seconde phase de séchage et l'apparition de contraintes internes ;
- ✓ les périodes où la planche a sa teneur en eau qui augmente (gonflement de l'épaisseur) ;
- ✓ la position du front d'évaporation dans la planche [Rémond *et al.*(2005)] ;
- ✓ l'instant à partir duquel la planche a atteint son humidité d'équilibre, lorsque plus aucune variation de l'épaisseur n'est détectée.

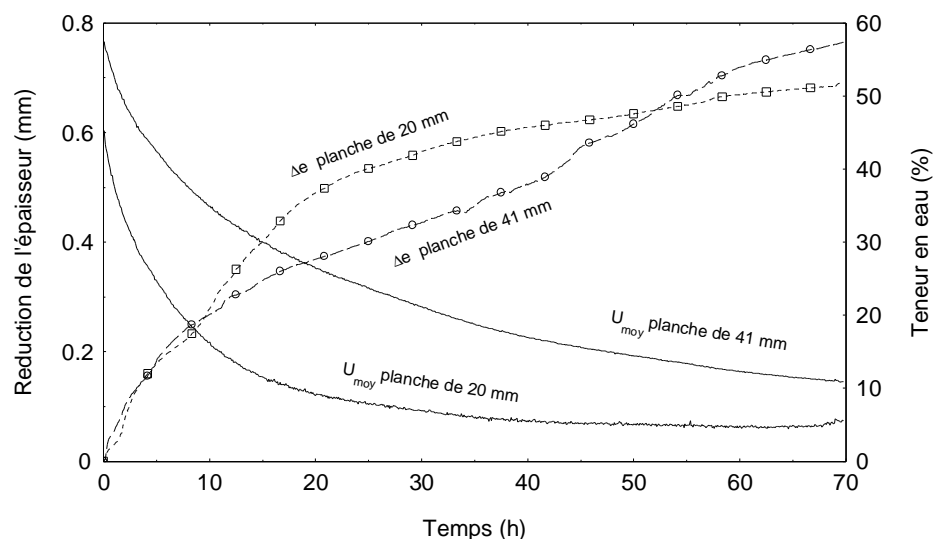


Figure II.19. Évolution temporelle de l'épaisseur des planches et de leur humidité moyenne au cours du séchage (Δe : Variation de l'épaisseur).

2.3.2 La qualité du séchage

Une fente est apparue à la surface de la planche épaisse (41 mm), après 12 heures de séchage. Elle s'est élargie progressivement, puis s'est refermée jusqu'à ne plus être visible (Fig.II.20). En effet, au début du séchage, la surface entre en traction et les contraintes peuvent dépasser la limite de rupture. La largeur de la fente augmente afin de libérer l'état de traction de la périphérie. Elle se ferme progressivement lorsque la surface entre en compression conformément au phénomène d'inversion des contraintes dû à l'effet mémoire du bois.

Cette fente s'est formée à mi-largeur et s'est ouverte sur toute la longueur de la planche. Les contraintes de traction de la couche périphérique sont en effet maximales loin des bords latéraux de la planche, car ces derniers peuvent sortir des déformations de cisaillement qui diminuent localement la traction. La largeur des fentes a été mesurée à l'aide d'un logiciel de traitement d'image de manière manuelle. La taille des pixels rendant difficile l'estimation des bords de la fente, l'incertitude de la mesure de la largeur est estimée à 0,04 mm.

Le cycle a été arrêté lorsque l'humidité moyenne de la planche, de plus faible épaisseur, a atteint son humidité d'équilibre. Les retraits locaux engendrés par le gradient d'humidité, encore présent à la fin du processus, cachent l'expression de l'effet mémoire du bois dans la déformée du *Slicing test*. Nous le constatons sur la figure II.21, où l'histoire des contraintes se manifeste complètement sur la déformée lorsque l'humidité est homogène dans la section, huit jours après la coupe. De même, l'écart des flèches est plus important pour la planche épaisse car son gradient d'humidité est

plus fort à la fin du séchage. Malgré la similitude des flèches obtenues pour ces deux échantillons, les déformations différées sont plus importantes pour l'échantillon de forte épaisseur car son moment d'inertie est plus grand.

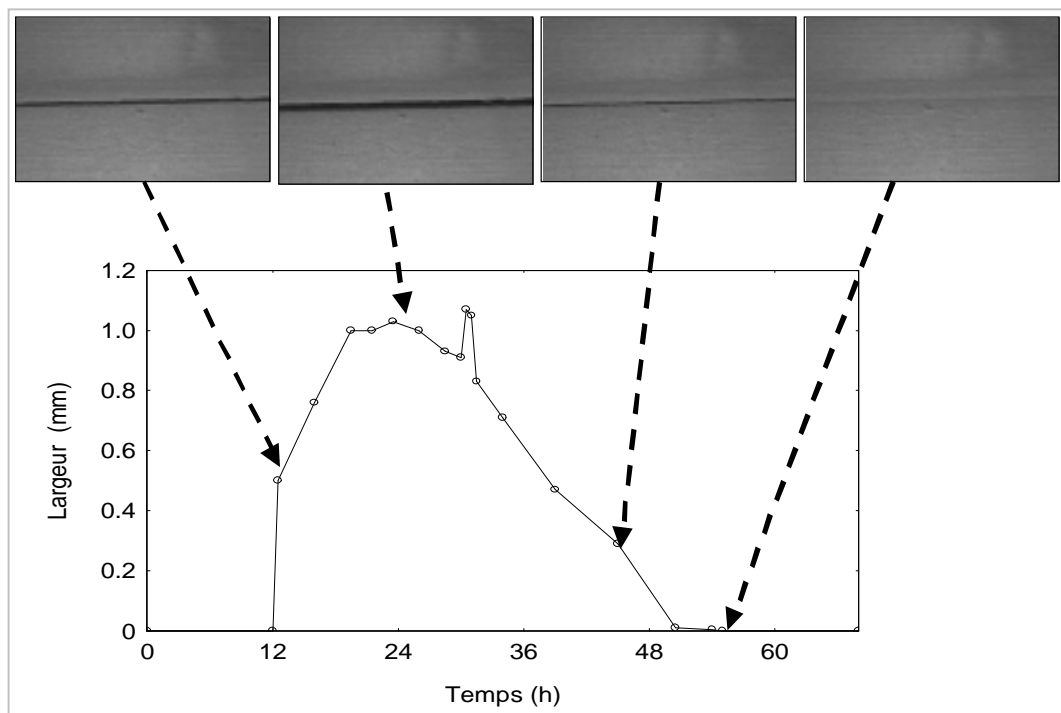


Figure II.20. Évolution temporelle de la largeur de la fente

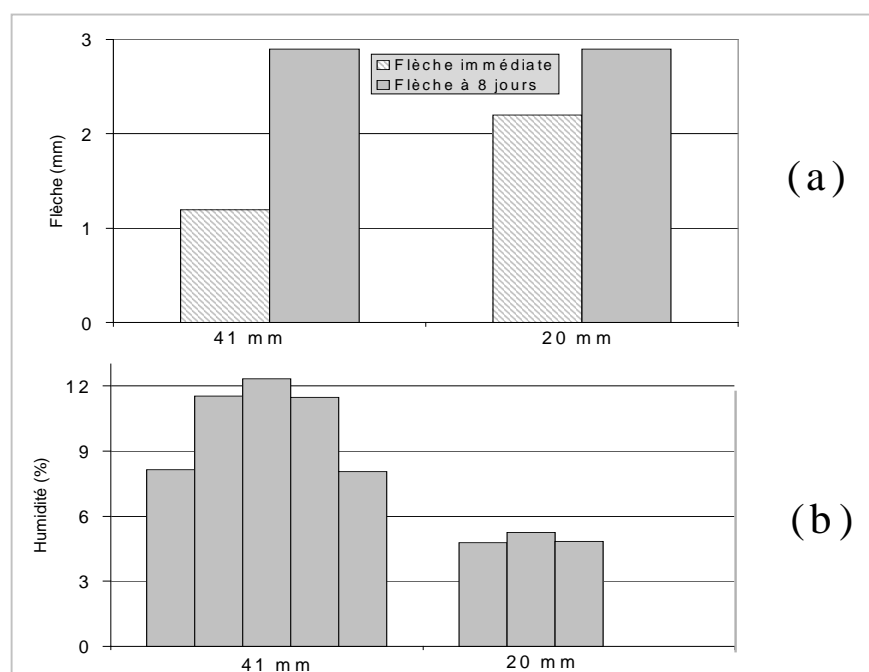


Figure II.21. Flèches de la déformée du slicing test immédiatement après la coupe et après homogénéisation de la teneur en eau (8 jours) pour deux épaisseurs de planche (41 mm, 20 mm) (a). Gradient d'humidité dans l'épaisseur de deux planches (b).

De manière à valider le dispositif d'imagerie sur des fentes de plus petites dimensions, nous avons réalisé un essai sur une planche de hêtre. En effet, les cellules de parenchymes radiales (rayons ligneux) du hêtre sont des points de fragilité pour la structure ligneuse, soumise à des sollicitations tangentielles. La planche a été prélevée dans l'aubier et débitée sur dosse. Ses dimensions étaient 14 x 100 x 750 mm³ et elle a été soumise à des conditions sévères (température sèche : 56 °C , température humide : 31,9 °C, vitesse de l'air : 1,2 m/s).

Nous avons pu aisément distinguer les fentes de surfaces à partir des images, mais leurs étroitesse rendent l'estimation de leurs largeurs difficile avec la résolution actuelle de l'image (Fig.II.22).

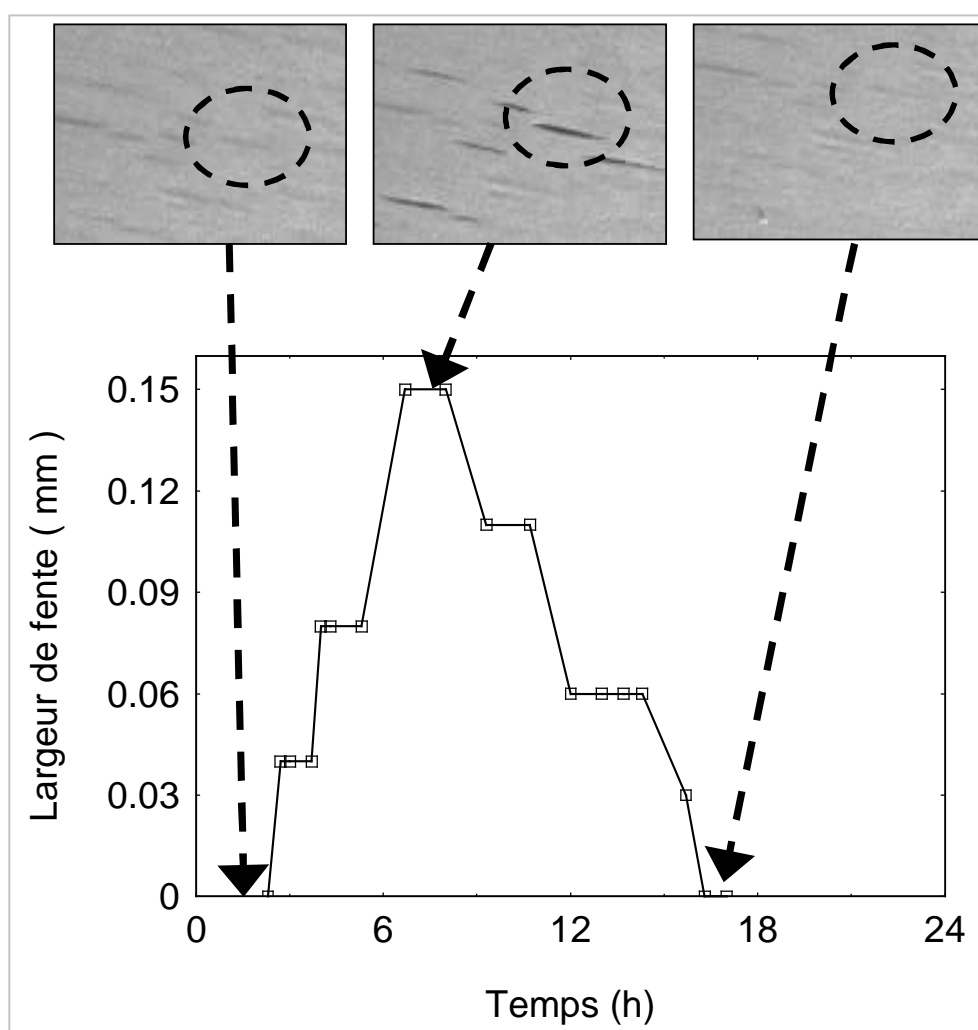


Figure II.22. Évolution temporelle de la largeur d'une fente à la surface d'une planche de hêtre.

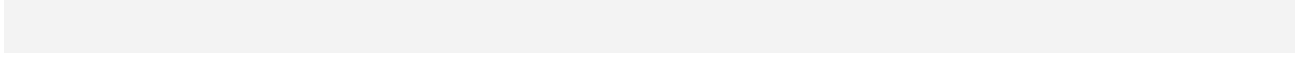
Conclusion

Deux nouveaux dispositifs expérimentaux, présentés dans ce chapitre, ont été développés pour obtenir des informations sur les transferts de masse et sur les contraintes mécaniques dans une planche de bois au cours du séchage.

Le premier dispositif expérimental détermine de façon non destructive et sans contact le profil de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. À une position donnée de la planche, la mesure est réalisée en deux étapes : mesure de la transmission de rayons X à un instant donné du séchage puis, mesure de la transmission lorsque l'humidité locale a été déterminée par une méthode destructive. La source et le récepteur de rayonnement X ont été placés sur des platines de déplacement pour effectuer le balayage de l'épaisseur de la planche et obtenir des profils d'humidité. Nous avons vu que la mesure de la teneur en eau du bois subit des perturbations inhérentes au matériel utilisé (phénomène de recombinaison des électrons-trous, résolution spectrale au niveau du détecteur, etc.) ou sous l'action de grandeurs physiques liées au séchage lui même (température, retrait du bois). Les résultats présentés ont mis en évidence la cohérence entre la forme des profils de teneur en eau dans l'épaisseur et l'évolution de la température interne. D'autre part, il a été constaté que le gradient d'humidité en un point donné de la périphérie d'une planche est plus important lorsqu'elle est plus épaisse. Cette différence devrait aussi se manifester au niveau des contraintes mécaniques.

Le second dispositif permet d'acquérir simultanément, la variation d'épaisseur, l'humidité moyenne de la planche, l'évolution de la largeur des fentes en surface, la température et l'humidité (résistance électrique) à l'intérieur de la planche. La mesure du gradient d'humidité finale et l'estimation du niveau de contraintes résiduelles ont aussi été effectuées. Cet équipement apporte des informations à la fois sur les transferts de chaleur et de masse dans la planche et sur le développement des contraintes mécaniques et des déformations. L'exploitation concomitante de ces données, permettent de mieux comprendre les mécanismes du séchage, en fonction du climat imposé. Dans l'essai présenté, deux épaisseurs de planche présentant des propriétés physiques similaires ont été séchées dans les mêmes conditions. Seule la planche la plus épaisse s'est fissurée au cours du séchage. Elle présente des contraintes résiduelles plus importantes.

Dans le cadre de cette thèse, l'ensemble de ces informations est destiné à affirmer et à valider les résultats prédits par la simulation numérique. Aussi, le chapitre suivant présente-t-il la modélisation mécanique du séchage qui sera greffée au code de simulation des transferts couplés de chaleur et de masse *TransPore*.



ANNEXE II.1 : Quelques photos du montage

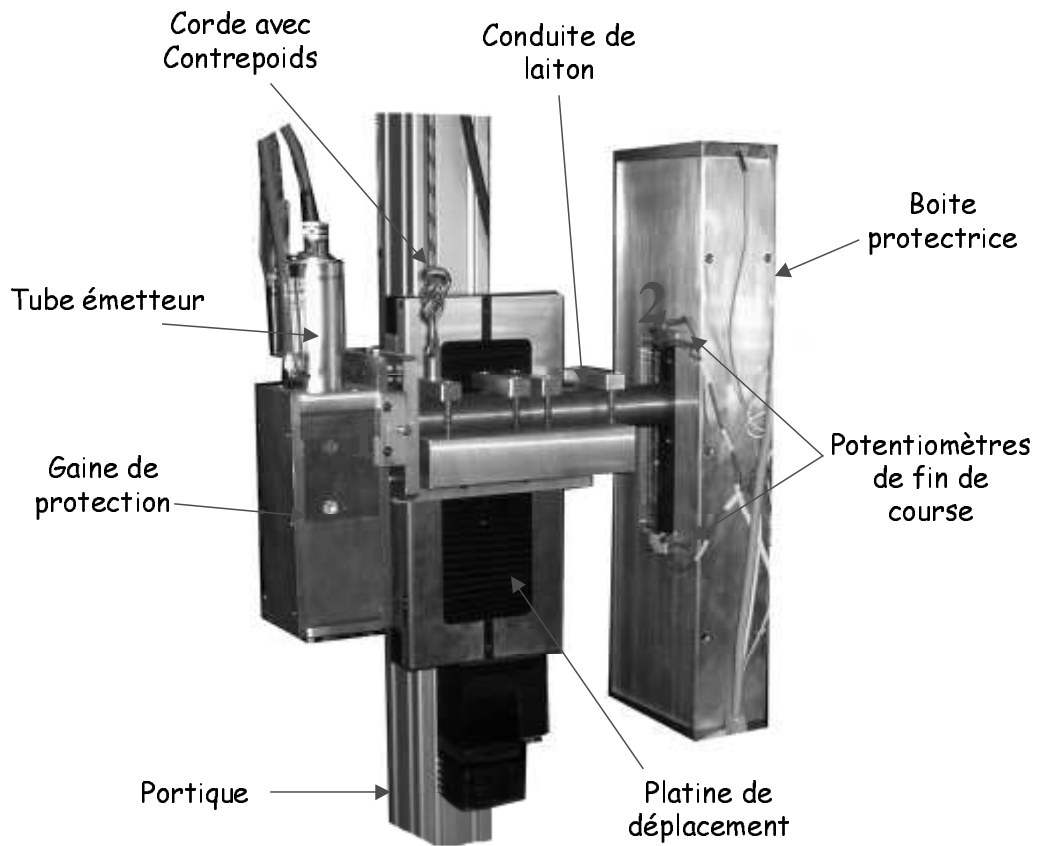


Figure II.23. Protections contre les rayons X

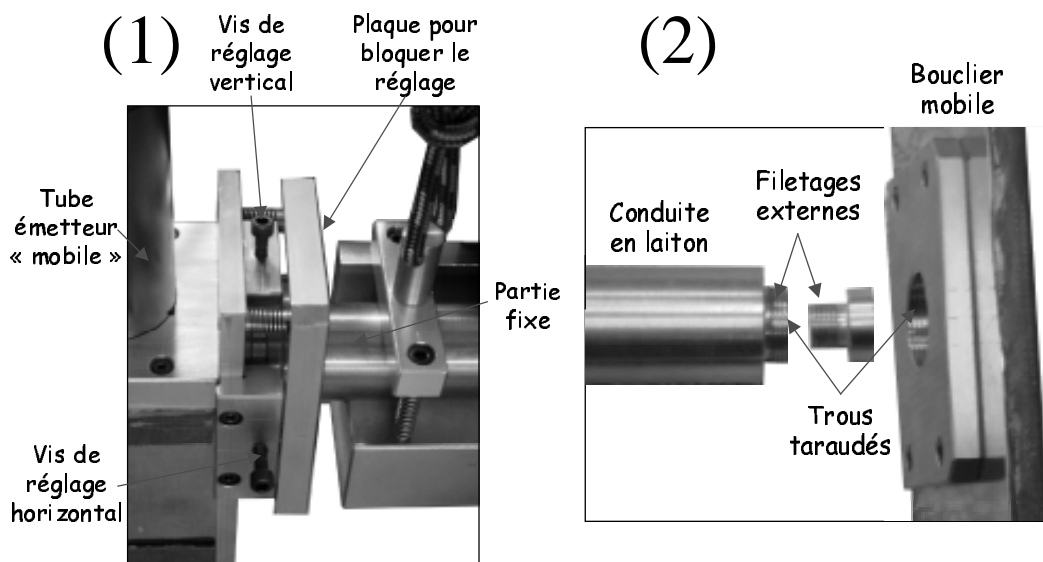


Figure II.24. Zoom sur le dispositif de réglage (1), et sur le montage du collimateur (2)

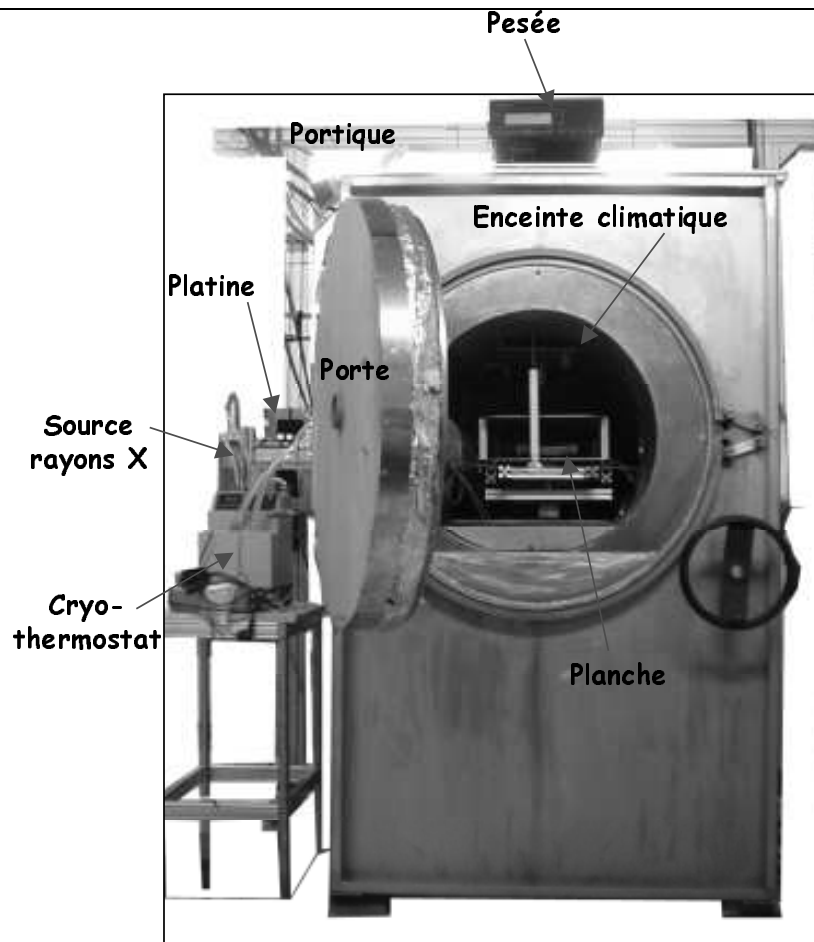


Figure II.25. Face avant du séchoir de l'ENGREF

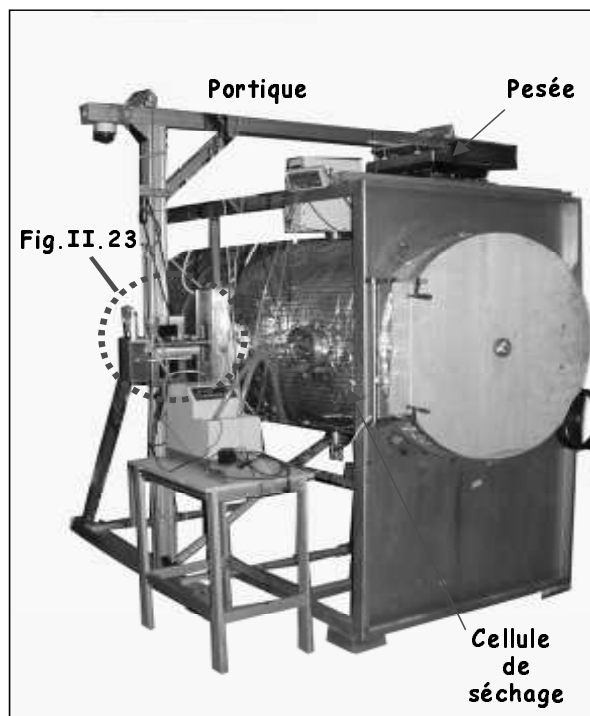


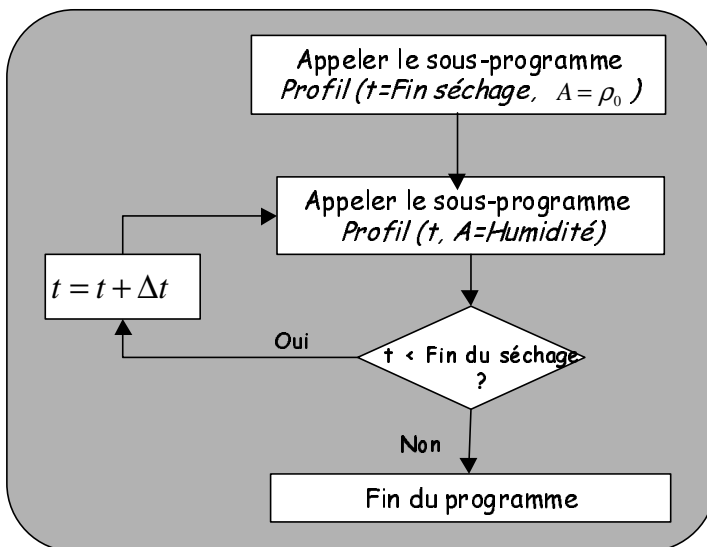
Figure II.26. Perspective du séchoir

ANNEXE II.2 : Organigramme du programme de traitement des données

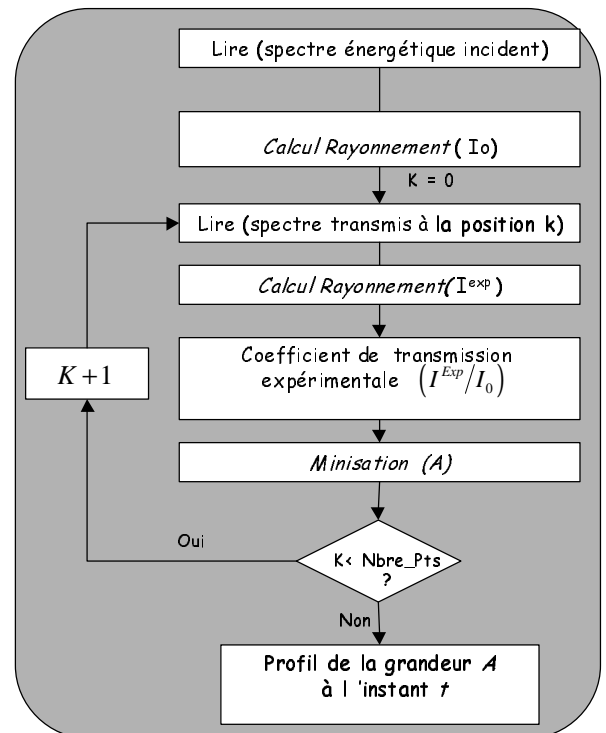
Nous présentons, ci-après, l'organigramme du code identifiant la densité de matière ligneuse et la teneur en eau à partir des spectres énergétiques transmis. Le profil de densité de la matière ligneuse dans l'épaisseur de la planche, est recherché par un algorithme numérique qui minimise l'écart entre la transmission calculée (eq.I.1 et eq.I.2) et la transmission obtenue expérimentalement lors du dernier balayage, pour lequel nous connaissons le profil de teneur en eau. Ce profil de densité est ensuite utilisé dans un algorithme similaire, pour déterminer, à partir des autres spectres enregistrés, l'évolution du profil de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche.

Les formes intégrales de l'équation I.1 sont approchées par des sommes de fonctions en escalier.

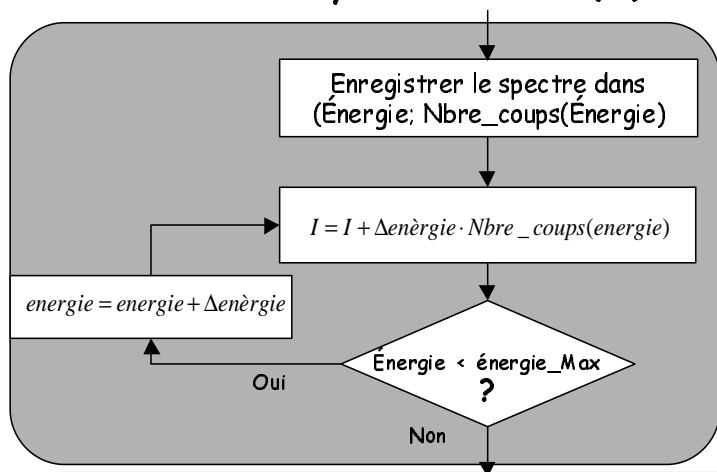
Programme principal



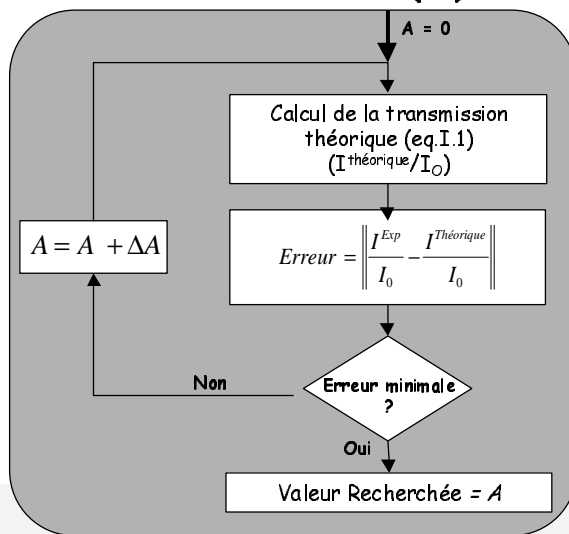
Profil (t, A)



Calcul Rayonnement (I)



Minimisation (A)



ANNEXE II.3 : Méthode du Slicing test

Schématisation provisoire de la méthode du *Slicing test* par l'organisme d'homogénéisation des techniques à l'échelle de l'Europe (CEN).

Après la coupe de l'échantillon en deux parties égales, il est posé sur deux appuis linéiques espacés de 100 mm et l'écart, ou plus précisément la flèche maximale, apparaissant entre les deux surfaces coupées est mesurée.

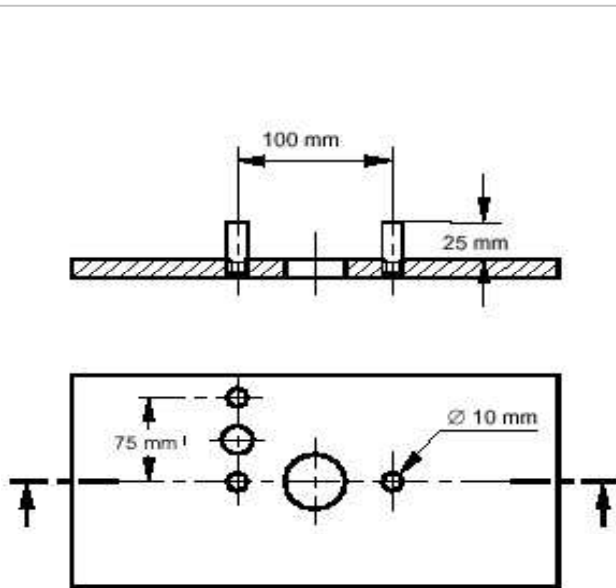


Figure 1: Test jig for assessment of case-hardening

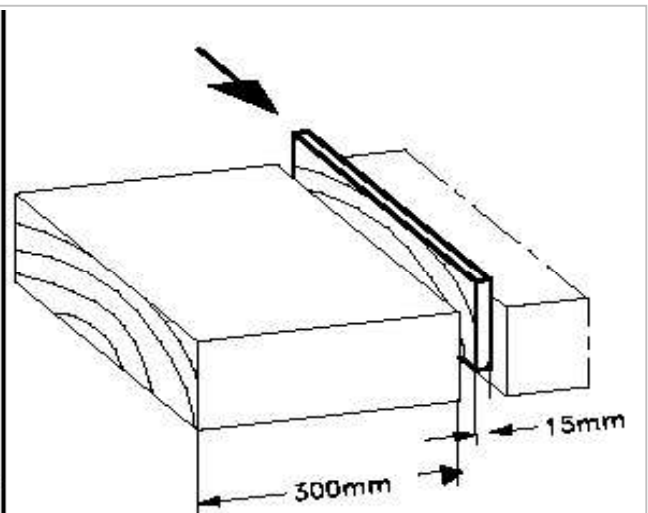


Figure 2: Preparation of test slice

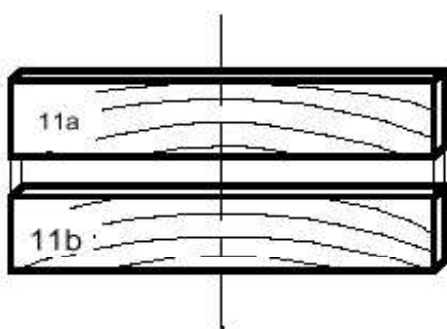


Figure 3: Separation and marking of test slice

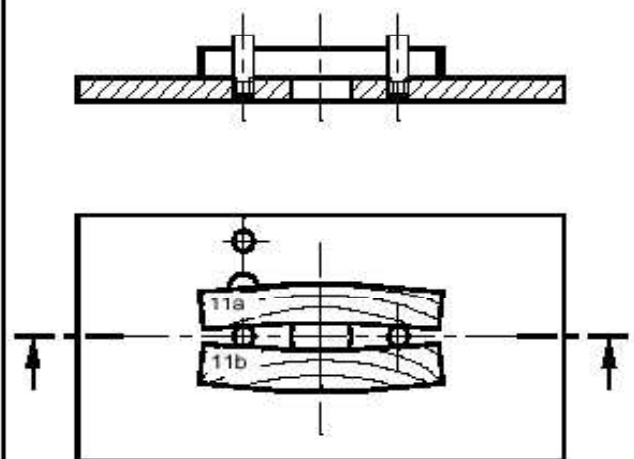


Figure 4: Evaluation of case-hardening with test jig

III L'outil numérique

<u>Introduction</u>	89
1 <u>Mise en équations des phénomènes mécaniques en séchage du bois</u>	90
1.1 Hypothèses physiques	90
1.1.1 Énumération des hypothèses physiques	90
1.1.2 Quelques remarques sur les hypothèses adoptées	93
1.2 Modèles de comportement du bois	96
1.3 Équilibre mécanique	99
2 <u>Résolution par méthode numérique</u>	101
2.1 Discrétisation et résolution des équations de la mécanique	101
2.1.1 Discrétisation spatiale	101
2.1.2 Discrétisation temporelle	103
2.1.3 Résolution du système linéaire :	109
2.2 Ajout du module mécanique au code <i>TransPore</i>	110
3 <u>Le code <i>TransPore</i>, outil d'aide à la compréhension</u>	113
3.1 Importance de l'effet différé du bois dans les contraintes de séchage	113
3.2 Thermohydroactivation du fluage viscoélastique	116
<u>Conclusion</u>	119
Nomenclature	120
ANNEXE III.1 : Formulation des transferts couplés	122
ANNEXE III.2 : Paramètres physiques entrés dans le code	128

Introduction

Dans un séchoir classique à convection forcée, les planches sont empilées, baguettées et placées bord à bord sur un même lit horizontal. Dans ces conditions les transferts de masse et de chaleur sont prépondérants dans l'épaisseur des planches, car elles présentent deux faces de part et d'autre exposées au courant d'air (Fig.III.1).

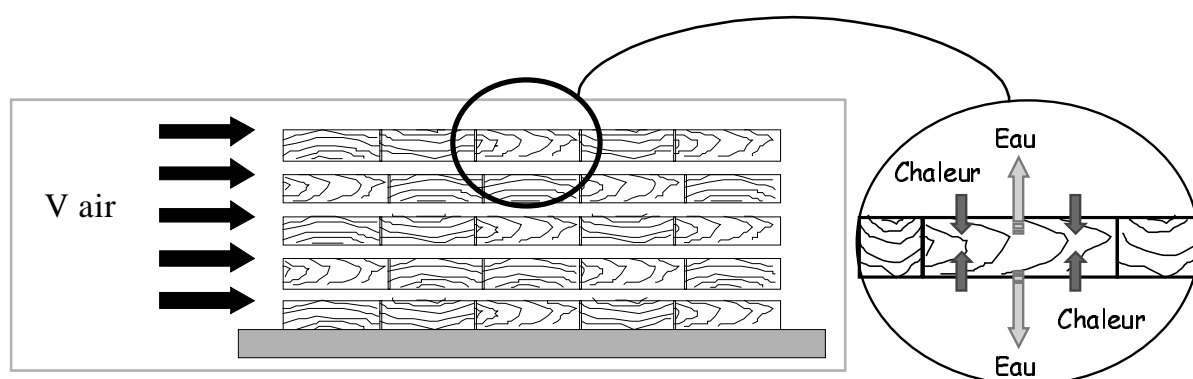


Figure III.1 : Disposition des planches à sécher dans un empilement, et schématisation des transferts aux surfaces d'échanges de l'une des planches.

Nous avons choisi d'utiliser la version monodimensionnelle du code numérique *TransPore* développé par P.Perré. Ce code est capable de simuler l'évolution temporelle de la teneur en eau, de la température, et de la pression interne de gaz dans l'épaisseur d'une planche, à partir des propriétés de transfert du matériau et des conditions hygrothermiques de l'air ambiant (les équations de transferts résolues par ce code sont exposées dans l'annexe III).

Afin d'aborder l'aspect qualitatif du séchage, un modèle mécanique doit-être greffé à *TransPore 1D*. Les hypothèses, les formulations mécaniques adoptées pour ce modèle, la discrétisation de ces équations et leur résolution numérique ont été présentées dans ce chapitre. L'organisation générale du code de séchage est ensuite présentée lorsque ce module est ajouté à *TransPore*. Dans une dernière partie, quelques simulations sont proposées pour mieux comprendre l'effet des différentes déformations sur les contraintes de séchage.

Une nomenclature des symboles utilisés est disponible en fin de chapitre (p120 et p121).

1 Mise en équations des phénomènes mécaniques en séchage du bois

1.1 Hypothèses physiques

Les hypothèses physiques majeures, qui ont été adoptées pour modéliser la mécanique du séchage, sont énumérées ci-après. Elles sont commentées à la fin de cette partie.

1.1.1 Énumération des hypothèses physiques

-Coïncidence des repères géométrique et matériel (H1)

Le repère lié à la planche est défini par : un axe (OZ) confondu avec l'axe longitudinal de la planche, un axe (OX) avec son épaisseur, et un axe (OY) avec sa largeur (Fig.III.2).

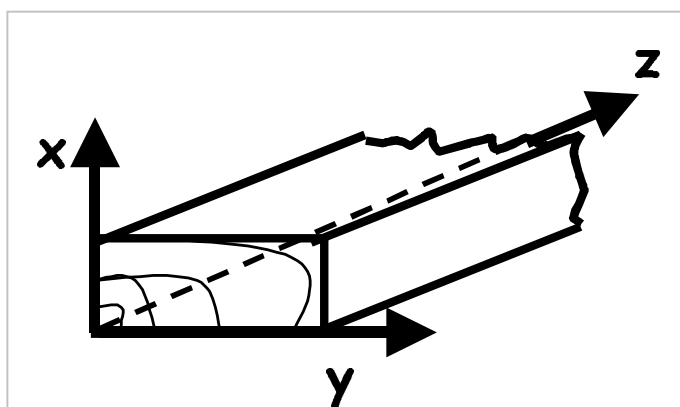


Figure III.2. Repère géométrique de la planche.

De plus, la base $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ est supposée coïncider avec la base matérielle du matériau. Ainsi, $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ coïncide avec $(\bar{R}, \bar{T}, \bar{L})$ pour une planche débitée sur dosse, et avec la base $(\bar{T}, \bar{R}, \bar{L})$ pour une planche débitée sur quartier (\bar{R} le vecteur unitaire selon la direction radiale, \bar{T} selon la direction tangentielle, \bar{L} selon la direction longitudinale).

-État initial vierge (Condition initiale) (H2)

Il a été supposé qu'à l'instant initial, la planche n'a pas de contraintes ni de déformations figées dans son épaisseur.

-Aucun effort extérieur sur la planche (Condition aux limites) (H3)

Nous supposons qu'il ne s'applique **aucun effort extérieur sur la planche**, c'est à dire, sur tous les contours extérieurs de la planche de normal \bar{n} , l'expression suivante est vérifiée :

$$\bar{\sigma} \cdot \bar{n} = \bar{0} \quad (-1)$$

-Évolution quasi-statique (H4)

L'état mécanique initial de la planche évolue vers d'autres états au cours du séchage. Nous supposons que cette évolution est quasi-statique, c'est à dire que l'équilibre mécanique de la planche est vérifié à chaque instant, et que les termes d'inertie de l'équation dynamique sont négligeables.

-Hypothèse des petites perturbations (H5)

Nous supposons qu'au cours de cette évolution, les transformations en tout point du matériau sont petites (hypothèse des petites perturbations (**HPP**)). Dans le cadre de cette hypothèse, le tenseur de déformation total dérive d'un champ vectoriel de déplacement et, par conséquent, les équations de compatibilité géométrique sont automatiquement validées.

$$\mathcal{E}_{ij}^{tot} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (-2)$$

avec, $x_1 \equiv x$, $x_2 \equiv y$, $x_3 \equiv z$ variable d'espace, v_i déplacement suivant la direction \bar{x}_i .

- Modélisation mécanique monodimensionnelle (H6)

Pour garder la rapidité de calcul apportée par la version monodimensionnelle de *TransPore*, une modélisation mécanique, également **monodimensionnelle**, a été choisie. Le problème mécanique est résolu en terme de déplacement \bar{v} . Le champ vectoriel \bar{v} est défini selon l'**écriture monodimensionnelle de l'hypothèse des déplacements plans** [Perré et Passard (1995), Cantéri

(1996)]. Cette écriture permet de tenir compte de l'influence des axes x et z sur les contraintes et les déformations apparaissant suivant l'axe y. Elle suppose que, suffisamment loin des extrémités et des bords, le déplacement est linéaire selon la largeur et la longueur de la planche. Dans le repère cartésien le champ de déplacement sera de la forme :

$$\bar{v} = \begin{cases} u(x,t) \\ \alpha(t) \times y \\ \beta(t) \times z \end{cases}_{(0,x,y,z)} \quad (- 3)$$

-Courbure possible de la section (H7)

Afin d'avoir un modèle capable de simuler les contraintes d'un séchage dissymétrique, la **courbure** éventuelle de la pièce autour de l'axe longitudinal a été prise en compte, et les courbures suivant les autres axes ont été négligées. Un profil d'humidité monodimensionnelle entraîne dans chaque partie d'une section de planche une déformation identique et par conséquent, amène la section à avoir une déformation globale parfaitement cylindrique (Fig.III.3).

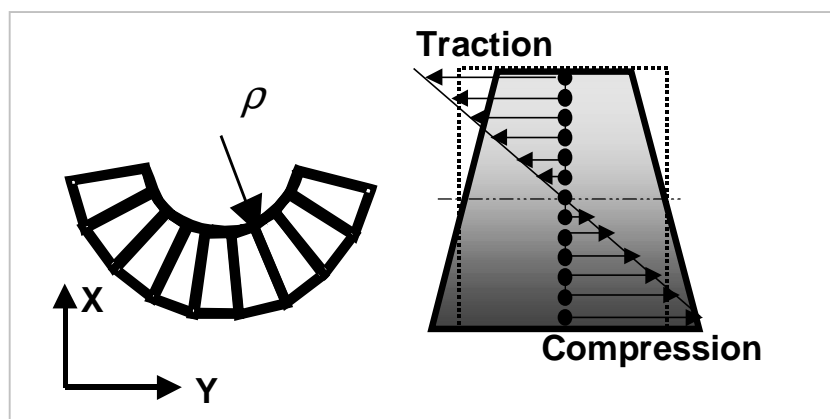


Figure III.3. Déformation cylindrique d'une section de planche sous l'action de transfert de masse monodimensionnelle (gauche) et profil des contraintes selon l'épaisseur (droite).

Lorsque la courbure de la section n'est plus nulle, le champ de déplacement proposé à l'équation 3 doit être modifié. Ce nouveau champ s'écrit:

$$\bar{v} = \begin{cases} u(x,t) \\ \alpha(t) \times y + \left(\frac{-xy}{\rho(t)} \right) \\ \beta(t) \times z \end{cases}_{(0,x,y,z)} \quad (- 4)$$

Selon la théorie des poutres [Timoshenko (1968)], la distance x est référencée par rapport à la ligne neutre qui évolue au cours du temps avec le séchage. Cependant, le paramètre $\alpha(t)$, tenant compte des variations de la largeur de la planche avec le retrait ou l'effet Poisson, peut également être utilisé comme un degré de liberté pour déplacer la position de la ligne neutre. Ainsi, x désigne par la suite la distance entre la surface d'échange et le point considéré de l'épaisseur.

-Indépendance des propriétés mécanosorptives et viscoélastiques (H8)

Les propriétés mécanosorptives du bois sont supposées ne pas être couplées avec les propriétés viscoélastiques.

-Mécanosorption non thermoactivée (H9)

La déformation mécanosorptive est supposée être indépendante de la température.

-Possibilité d'une recouvrance complète (H10)

Lorsque les contraintes internes dépassent une certaine limite, le matériau entre dans son domaine plastique, et des déformations instantanées irrécupérables apparaissent. Cette limite dépend de la température, de la teneur en eau du bois et de la direction matérielle considérée. La déformation plastique du bois, et la partie non linéaire de la déformation élastique n'ont pas été prises en compte dans ce travail, car la littérature présente peu de données sur ce sujet.

D'autre part, un modèle véhiculant la possibilité d'une recouvrance totale de la déformation mémoire (fluage viscoélastique et mécanosorptive) est adopté.

1.1.2 Quelques remarques sur les hypothèses adoptées

Les échantillons de bois vert sont rarement dans un état mécanique initial vierge comme nous l'avons supposé en **H2**. Il existe, en effet, toujours un champ de contraintes et de déformations figées issues des contraintes de croissance (maturation cellulaire). En conséquence, le modèle adopté donnera seulement la partie des contraintes et des déformations relatives au séchage.

D'autre part, la planche insérée dans une pile est soumise à des efforts extérieurs importants, localisés au niveau des tasseaux, de par le poids propre des autres planches. Ces efforts externes limitent la déformation de la planche au cours de son séchage. Ce principe est utilisé, par exemple,

dans l'industrie avec la disposition d'une charge importante au-dessus de la pile (séchage sous charge). Aussi, l'hypothèse **H3** est-elle valide lorsque la planche est seule à sécher. Dans ce cas, elle est soumise uniquement à l'action de son poids propre et la réaction aux appuis (tasseaux), qui engendrent des contraintes dans la planche négligeables par rapport à celles générées par le séchage.

Au cours du séchage, l'évolution du champ de teneur en eau dans la planche fait évoluer, à cause du retrait, son état mécanique. L'hypothèse d'une évolution quasi-statique (**H4**) est pleinement justifiée pour un processus tel que le séchage, car les variations de teneur en eau sont très lentes.

Concernant le choix d'une modélisation mécanique monodimensionnelle, avec l'hypothèse des déplacements plans (**H6**), elle conduit à négliger les déformations et les contraintes de cisaillement. Loin des bords de la planche cette hypothèse n'est pas irréaliste. Pour l'illustrer, l'équilibre mécanique d'une demi-lamelle à la périphérie de la planche, présentant un profil monodimensionnel d'humidité (Fig.III.4), a été étudié. Au début du séchage, le retrait périphérique met en traction notre système sur la face A. Au niveau du bord latéral de la planche, l'absence de matière conduit la demi-lamelle à équilibrer son état de traction avec des contraintes de cisaillement sur la face B. La surface cisailée sera suffisante pour équilibrer la traction à partir d'une certaine frontière F. Cette frontière correspondrait selon Sales (1984) et Perré (1987) à une distance du bord d'au moins deux fois l'épaisseur de la planche.

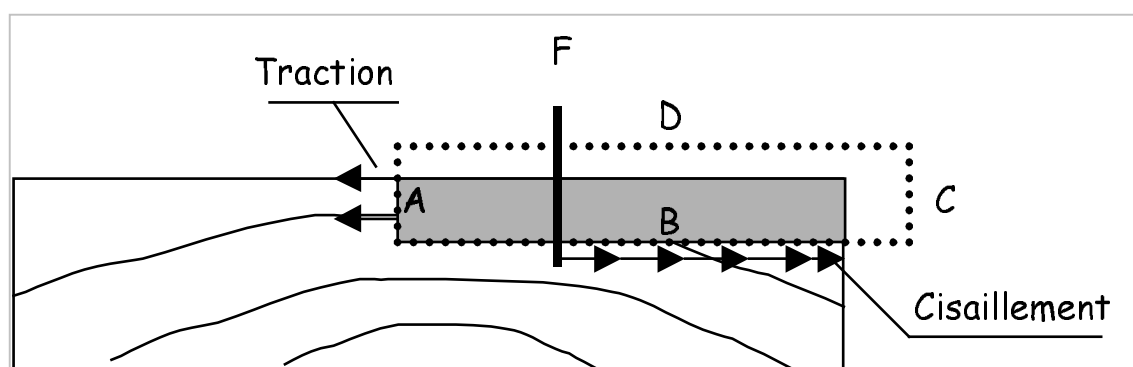


Figure III.4. Efforts de traction et de cisaillement apparaissant, au début du séchage, sur une demi-lamelle périphérique d'une planche. Les pointillés délimitent la zone sur laquelle le bilan mécanique est effectué.

La courbure possible de la planche autour de l'axe longitudinal (**H7**), conduit l'accumulation des petites déformations (**H5**) suivant la largeur de l'échantillon à produire un champ de grands

déplacements [Mauget (1996)] (Fig.III.5). Seul les points vérifiant $|y| \ll 1$ restent dans le cadre des petits déplacements (zone en pointillés gras de la figure III.5). Aussi, l'équation 4 n'est-elle vérifiée que sur ce domaine.

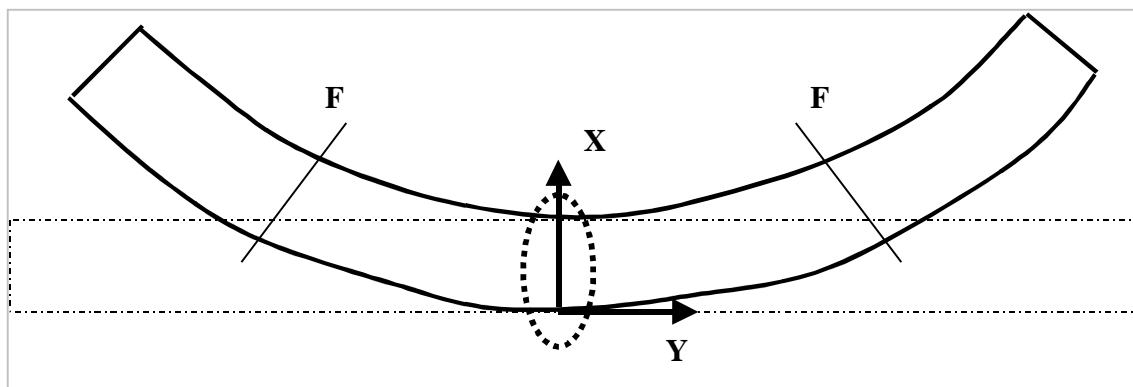


Figure III.5. Courbure de la planche. La section en pointillés fins désigne l'état de la planche sans courbure. F désigne la frontière à partir de laquelle le cisaillement devient trop important pour être négligé et le cercle en pointillés gras délimite la zone où l'hypothèse des petits déplacements reste valable.

La prise en compte de l'effet mémoire du bois dans la modélisation, indispensable pour tenir compte du phénomène d'inversion des contraintes, a nécessité plusieurs hypothèses **H8**, **H9**, **H10**. Concernant l'absence de couplage entre les propriétés mécanosorptives et viscoélastiques (**H8**), cette hypothèse est fréquemment utilisée dans la littérature afin de pouvoir identifier expérimentalement les paramètres des modèles. Néanmoins, elle est le sujet de discussions scientifiques [Hanhijärvi et Hunt (1998), Navi *et al.* (2002)]. La seconde hypothèse (**H9**) sur l'indépendance des propriétés mécanosorptives avec la température, est sans doute irréaliste, mais elle est souvent adoptée dans la littérature à défaut d'avoir suffisamment de données obtenues pour des températures élevées. En effet, les expériences de caractérisation sont en générales réalisées à basse température pour limiter l'expression du fluage viscoélastique et ainsi, isoler le fluage mécanosorptif. Enfin, concernant la dernière hypothèse **H10**, sur la recouvrance complète du fluage, elle se justifie par la difficulté à l'heure actuelle, de différencier la part de la déformation plastique dans les déformations mémoires irrécupérables observées et modélisées dans certains travaux.

1.2 Modèles de comportement du bois

Basé sur les travaux de Perré et Passard (1995) et de Mauget (1996) (modélisation mécanique bidimensionnelle), un modèle monodimensionnel spécifique a été développé, et il est présenté dans cette partie.

Durant le séchage, le retrait apparaît en tous points de la planche se situant dans le domaine hygroscopique. Ce phénomène induit une déformation, notée $\overline{\varepsilon}^r$, proportionnelle à l'écart entre la teneur en eau liée $X_b(x,t)$ et le point de saturation des fibres,

$$\overline{\varepsilon}^r = H(x,t) \cdot \begin{pmatrix} R_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & R_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & R_{zz} \end{pmatrix} \quad (- 5)$$

$$\text{Avec, } H(x,t) = \begin{cases} (X_b(x,t) - X_{Psf}(T)) & \text{si } X_b(x,t) < X_{Psf}(T) \\ \mathbf{0} & \text{si } X_b(x,t) \geq X_{Psf}(T) \end{cases}$$

Pour garder une cohérence avec les transferts de masse modélisés dans *TransPore*, nous avons considéré dans ce modèle que le point de saturation des fibres dépend de la température, $X_{Psf} = 0.325 - 0.001 \times T(x,t)$. Le retrait du bois est donc supposé diminuer avec l'augmentation de la température (Eq.5). Cette hypothèse est non vérifiée, mais nous n'avons pas rencontré de données dans la littérature qui nous permettent de savoir si l'eau liée, libérée des parois cellulaires par agitation thermique avec l'augmentation de la température, entre en compétition avec l'encombrement stérique des chaînes polymériques du bois.

Lorsque ce champ de déformations n'est pas cinématiquement admissible, un champ de déformations mécaniques $\overline{\varepsilon}^{méca}$ et des contraintes apparaissent. La déformation totale $\overline{\varepsilon}^{Tot}$ s'écrit alors :

$$\overline{\varepsilon}^{Tot} = \overline{\varepsilon}^r + \overline{\varepsilon}^{méca} \quad (- 6)$$

Concernant, la déformation mécanique, elle est la somme d'une déformation élastique $\overline{\overline{\varepsilon^e}}$, liée par la loi de Hooke aux contraintes à l'instant actuel t , et d'une déformation différée prenant en compte la déformation viscoélastique $\overline{\overline{\varepsilon^{Ve}}}$ et mécanosorptive $\overline{\overline{\varepsilon^{ms}}}$.

$$\overline{\overline{\varepsilon^{méca}}} = \overline{\overline{\varepsilon^e}} + \overline{\overline{\varepsilon^{Ve}}} + \overline{\overline{\varepsilon^{ms}}} \quad (- 7)$$

La modélisation adoptée pour chacun des termes de l'équation 7 est énumérée ci dessous :

- ✓ l'hypothèse des déplacements plans (**H6**) utilisée avec l'hypothèse des petites perturbations (**H5**) permet d'écrire la déformation totale à partir du champ vectoriel de déplacements,

$$\overline{\overline{\varepsilon^{Tot}}} = \begin{bmatrix} \partial u(x,t)/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \alpha(t) - \frac{x}{\rho(t)} & 0 \\ 0 & 0 & \beta(t) \end{bmatrix} \quad (- 8)$$

- ✓ le bois étant un matériau orthotrope, son comportement élastique fait apparaître 9 paramètres indépendants. L'hypothèse **H6**, conduisant à négliger les composantes de cisaillement, permet de n'avoir plus que 6 composantes indépendantes. La partie diagonale du tenseur de déformation élastique ($\overline{\overline{\varepsilon^e}}$) est, selon la loi de Hooke généralisée :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^e \\ \varepsilon_{yy}^e \\ \varepsilon_{zz}^e \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{xy}}{E_y} & \frac{-\nu_{xz}}{E_z} \\ \frac{-\nu_{xy}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{yz}}{E_z} \\ \frac{-\nu_{xz}}{E_z} & \frac{-\nu_{yz}}{E_z} & \frac{1}{E_z} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (- 9)$$

Les modules élastiques **dépendent de la teneur en eau du bois** dans la plage 6 % à 20 % selon une relation linéaire proposée par Guitard (1987) ;

- ✓ le modèle mécanosorptif choisi est celui de Salin (1992). Il est commode à utiliser (deux paramètres phénoménologiques pour chacune des directions), et introduit le concept d'une limite de la déformation mécanosorptive,

$$\frac{\partial \varepsilon_{aa}^{ms}}{\partial t} = m_a \times \left(\sigma_{aa} - E_a^{ms} \cdot \varepsilon_{aa}^{ms} \right) \cdot \left| \frac{\partial X_b}{\partial t} \right| \quad (-10)$$

avec $a = x, y$ ou z .

- ✓ la déformation viscoélastique $\overline{\varepsilon^{ve}}$ est modélisée à l'aide d'un modèle exponentiel avec quatre éléments de Kelvin. La thermoactivation des propriétés viscoélastiques est prise en compte par une loi d'Arrhenius dans laquelle la température est modifiée pour appréhender l'effet de l'humidité du bois. Les valeurs des paramètres constituant ce modèle ont été identifiées à partir d'essais de fluage sur des échantillons d'épicéa, sur une large gamme de température dans le travail de Perré et Passard (2004).

$$\varepsilon_{aa}^{ve}(t) = \sum_{n=1}^4 \int_0^t \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_n(T_{app})} \right) \right) \cdot J_a^n \cdot \frac{d\sigma_{aa}(x,t')}{dt'} \cdot dt' \quad (-11)$$

avec $a = x, y$ ou z et,

$$\tau_n = \tau_n^{T_{ref}} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W_n}{R} \left(\frac{1}{T_{app}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad , \text{ où } \quad T_{app} = T - 115 \times \text{Max}\left(0 ; \frac{X_{cr} - X_b}{X_{cr}} \right)^{1.6} ,$$

R désigne la constante des gaz parfait, ΔW_n l'énergie d'activation apparente (J/mol), T_{ref} une température de référence en Kelvin (typiquement, 293 K), $\tau_n^{T_{ref}}$ le temps caractéristique à T_{ref} , T_{app} la température apparente tenant compte de l'humidité de l'échantillon, et X_{cr} l'humidité critique (typiquement $X_{cr}=0,18$).

Les termes J_a^n (avec $a = x, y$ ou z) sont supposés **respecter les ratios d'anisotropie** mesurés dans le comportement élastique du bois [Passard et Perré (2001)]. Les mêmes hypothèses sont réalisées pour m_a , paramètre mécanosorptif, et E_a^{ms} , limite mécanosorptive (avec $a = x, y$ ou z).

1.3 Équilibre mécanique

L'équilibre mécanique d'un volume V , sur lequel aucun effort extérieur ne s'applique, est réalisé à chaque instant lorsque le tenseur des contraintes internes à ce volume vérifie $\text{div}(\overline{\overline{\sigma}}(x, y, z, t)) = \overline{0}$. Les hypothèses **H3** et **H4** permettent d'utiliser cette équation pour exprimer l'équilibre mécanique de la planche.

- Contraintes suivant (OX)

Avec la configuration retenue du champ de déplacement, l'équation $\text{div}(\overline{\overline{\sigma}}) = \overline{0}$, donne la notation suivante selon l'axe (OX) :

$$\frac{\partial \sigma_{xx}(x, t)}{\partial x} = 0 \quad , \quad \forall x \in [0, e]$$

or avec l'hypothèse **H2**, $\sigma_{xx}(0, t) = \sigma_{xx}(e, t) = 0$

Par conséquent,

$$\boxed{\sigma_{xx}(x, t) = 0 \quad , \quad \forall x \in [0, e].} \quad (- 12)$$

- Contraintes suivant (OY)

L'équilibre mécanique du volume V , de la figure III.6 (gauche) s'écrit :

$$\begin{aligned} \iiint_V \text{div} \overline{\overline{\sigma}} \cdot d\mathbf{v} &= \iint_{\partial V} \overline{\overline{\sigma}} \cdot \overline{\mathbf{n}} \, ds = 0 && (\partial V \text{ étant la surface extérieure du volume } V) \\ &= 0 + \iint_{\partial V^*} \sigma_{yy}(x, t) \cdot dz \cdot dx \cdot \overline{\mathbf{y}} && (\partial V^* \text{ étant la surface de } \partial V \text{ contenue dans la planche)} \\ &= \int_0^e \sigma_{yy}(x, t) \cdot dx \cdot \overline{\mathbf{y}} = 0 \end{aligned}$$

$$\longrightarrow \boxed{\int_0^e \sigma_{yy}(x, t) \cdot dx = 0} \quad (- 13)$$

L'équilibre des moments est obtenu sur ce même volume lorsque,

$$\iint_{\partial V} \overline{OM} \wedge \overline{\sigma \cdot n} \, ds = \overline{0}$$

$$= 0 + \iint_{\partial V} (x \cdot \overline{x}) \wedge (\sigma_{yy}(x,t) \cdot \overline{y}) \, dz \, dx$$

$$\longrightarrow \boxed{\int_0^e x \cdot \sigma_{yy}(x,t) \cdot dx = 0} \quad (- 14)$$

avec O origine du repère, et M le point courant du contour ∂V .

- Contraintes suivant (OZ)

De même, l'équilibre mécanique du volume V de la figure III.6 (droite), projeté sur l'axe (OZ), est réalisé lorsque les contraintes σ_{zz} vérifient,

$$\boxed{\int_0^e \sigma_{zz}(x,t) \, dx = 0} \quad (- 15)$$

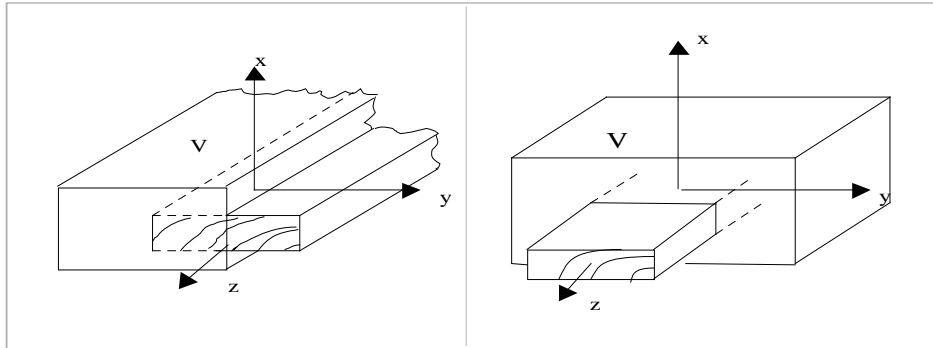


Figure III.6. Volume V, entourant une partie de la planche, sur lequel un bilan d'équilibre est réalisé. Condition d'équilibre sur σ_{yy} , à gauche et sur σ_{zz} , à droite.

Les équations constitutives (Eq.6 et Eq.7 complétées des équations 5, 8-11), l'équilibre mécanique (Eq.12-15) et les conditions aux limites (Eq.1) permettent d'obtenir un jeu d'équations différentielles couplées et linéaires (vis-à-vis du champ de déplacement) dont la solution analytique n'est pas accessible. Nous aurons recours à une résolution par méthode numérique afin de trouver une solution approchée des inconnues de ce système.

2 Résolution par méthode numérique

2.1 Discrétisation et résolution des équations de la mécanique

Le jeu d'équations différentielles précédent est exprimé en fonction de deux variables indépendantes, une coordonnée d'espace et le temps. Dans le but d'obtenir un jeu d'équations algébriques selon la variable d'espace et selon le temps, la discrétisation des équations est réalisée en deux étapes.

2.1.1 Discrétisation spatiale

La **méthode des volumes finis** est utilisée dans le code *TransPore* car elle permet de respecter rigoureusement les équations de conservation. Nous avons adopté la même méthode pour la discrétisation spatiale du jeu d'équations exprimant l'équilibre mécanique. Aussi, l'état des contraintes est-il évalué aux nœuds sur lesquels ont été estimés l'humidité, la pression totale de gaz et la température par le code *TransPore*. Décrivons les différentes étapes de cette méthode à travers la discrétisation des équations 12 à 15.

- discrétisation du domaine de calcul

L'épaisseur de la planche est divisée en sous-domaines appelés volumes de contrôle (*CV*), chacun d'entre eux étant séparé par des surfaces de contrôle (*CS*), et défini par un nœud central [Patankar, (1980)]. Soit N_{cv} le nombre de contrôle de volume dans l'épaisseur de la planche, x_i l'abscisse des nœuds à partir d'une des surfaces d'échange de la planche (avec $i:1 \rightarrow N_{cv}$), et Δx_i la distance entre x_i et x_{i+1} (Fig.III.7).

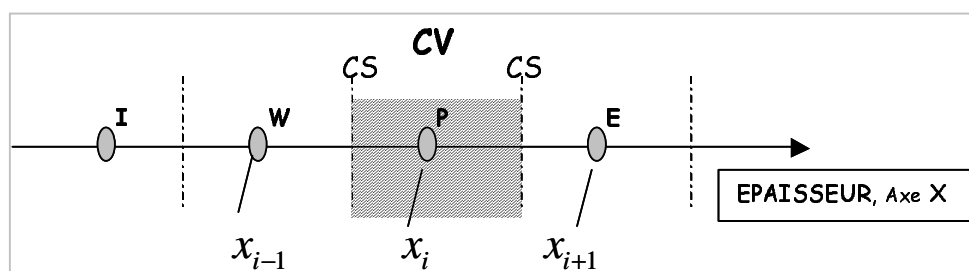


Figure III.7. Discrétisation de l'épaisseur par la méthode des volumes finis. Le volume de chaque CV sera ici de $\Delta x \times 1 \times 1$.

Les équations de conservations sont intégrées sur chaque volume élémentaire de l'épaisseur de la planche, en considérant les termes d'accumulation et les flux sur les surfaces de contrôle. Par conséquent, l'équilibre mécanique est vrai sur chacun des volumes de contrôle et sur l'ensemble du domaine de calcul, indépendamment de la résolution du maillage. Cependant, la solution proposée garde un sens physique seulement lorsque la résolution du maillage est suffisamment fine [Patankar, (1980)].

Pour discrétiser les équations d'équilibre mécanique, il est nécessaire de définir une fonction approchée (σ^*) de la fonction solution (σ). Les valeurs de σ et σ^* aux nœuds du maillage sont identiques. Une variation spatiale simplifiée de σ^* doit ensuite être adoptée entre les nœuds voisins du sous-domaine.

- profil adopté

Dans la méthode des volumes finis, le profil de la solution approchée entre chacun des nœuds est accessoire, et n'intervient que pour évaluer les formes intégrales dans l'équation différentielle. Dans notre travail, la fonction d'espace approchée est supposée avoir des valeurs aux nœuds qui prévalent sur leurs volumes de contrôles (fonction en escalier) (Fig.III.8).

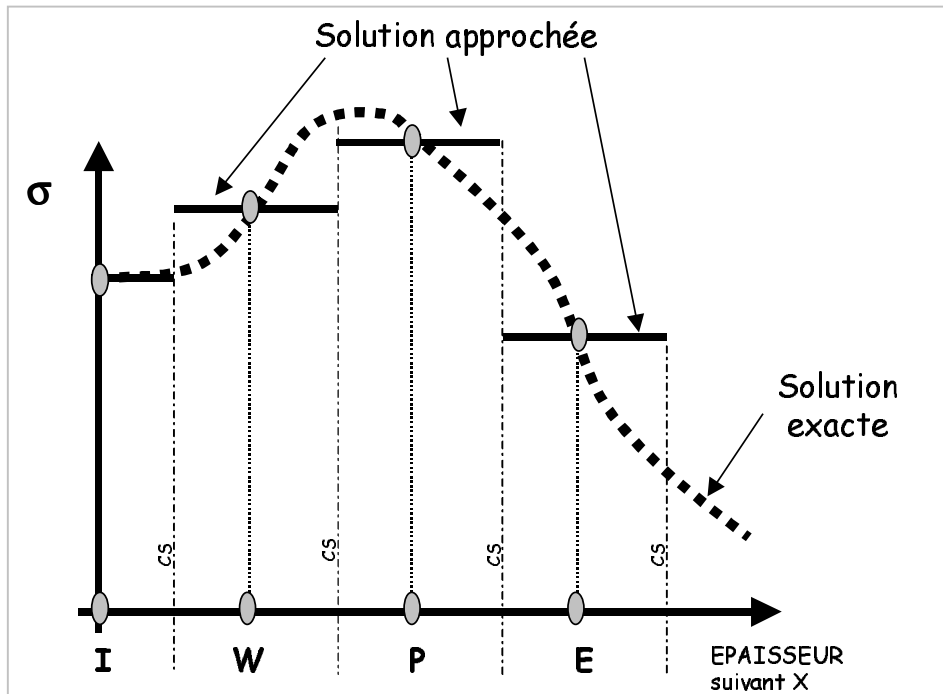


Figure III.8. La solution exacte est approchée par une fonction en escalier.

La simplicité du profil adopté entre les nœuds rend nécessaire l'utilisation d'un incrément d'espace petit, pour que la fonction en escalier approche la fonction solution. Néanmoins, ce profil présente l'avantage de pouvoir garder un pas, entre nœuds voisins, Δx_j variable dans l'équation discrétisée.

- équations d'équilibre discrétisées

La discrétisation de l'équation d'équilibre, projeté sur l'axe (OX) donne N_{cv} équations,

$$\sigma_{xx}(x_j, t) = 0, \quad \forall j \in [0, N_{cv}] \quad (- 16)$$

La discrétisation spatiale des équations d'équilibre 13 et 15, donne deux équations algébriques globales,

$$\sum_{j=1}^{N_{cv}} \sigma_{aa}(x_j, t) \cdot \Delta x_j = 0, \quad (- 17)$$

avec $a = y$ ou z

De la même façon, la discrétisation spatiale de l'équation 14 (équilibre des moments) fournit une équation globale supplémentaire,

$$\sum_{j=1}^{N_{cv}} x_j \cdot \sigma_{yy}(x_j, t) \cdot \Delta x_j = 0 \quad (- 18)$$

2.1.2 Discrétisation temporelle

La discrétisation des équations par rapport au temps est réalisée à l'aide de la **méthode des différences finies**, reposant sur l'approximation des dérivées partielles en séries de Taylor, tronquées au premier ordre.

Le temps est discrétisé en un certain nombre de sous-domaines, de longueur Δt_i variable, tel que

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i.$$

Une **écriture implicite** en temps a été adoptée, (Fig.III.9), c'est à dire,

$$\phi_j^{i+1} = \phi_j^i + \frac{\partial \phi_j^{i+1}}{\partial t} \cdot \Delta t_i \quad (- 19)$$

avec ϕ une grandeur dépendante de l'espace et du temps, et notons

$$\phi_j^i = \phi(x_j, t_i) \quad \text{et} \quad \phi_j^{i+1} = \phi(x_j, t_{i+1}).$$

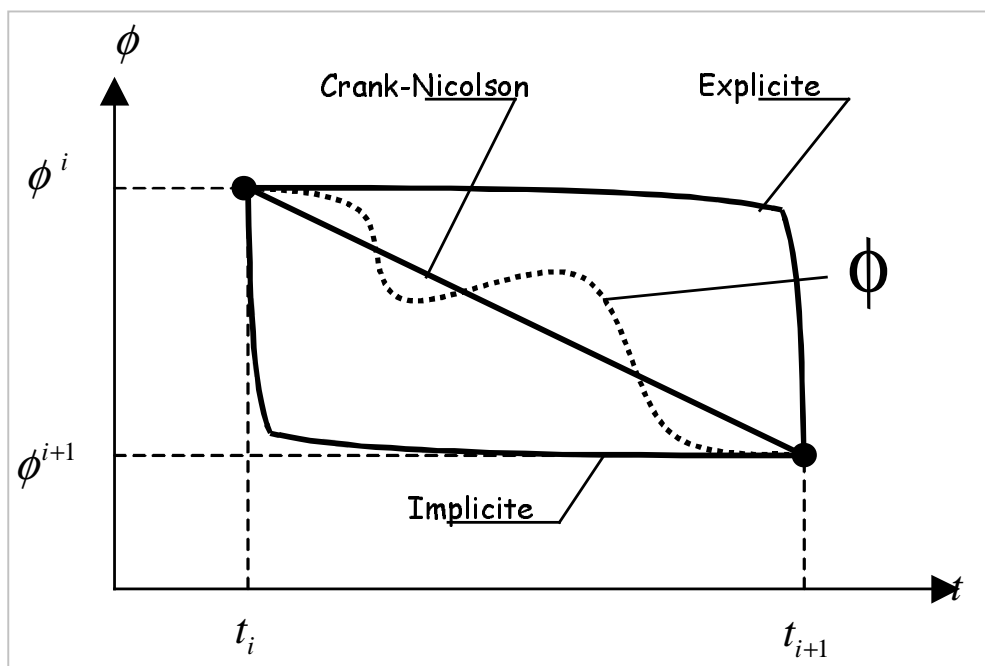


Figure III.9. Représentation des profils de différentes fonctions approchées sur un pas de temps [adapté de Patankar, (1980)].

Cette écriture est précise à l'ordre 1 et a l'avantage d'être inconditionnellement stable. Sa précision numérique est bonne par rapport aux autres écritures lorsque l'incrément de temps est long. Cette caractéristique nous a permis, par la suite, d'utiliser le pas de temps variable du code *TransPore* qui s'adapte à la vitesse de convergence de l'algorithme de résolution des équations de transferts couplées et non linéaires.

Le développement implicite permet d'exprimer de manière algébrique les différents termes de la déformation mémoire par rapport au temps (Eq.10 et 11) :

- le terme **mécanosorptif**,

$$\varepsilon_{aa}^{ms}(x_j, t_{i+1}) = \left[1 + \left| \frac{\partial X_b}{\partial t} \right|_j^{i+1} \cdot \Delta t_i \cdot m_a \cdot E_a^{ms} \right]^{-1} \cdot \left((\varepsilon_{aa}^{ms})_j^i + \left| \frac{\partial X_b}{\partial t} \right|_j^{i+1} \cdot \Delta t_i \cdot m_a \cdot (\sigma_{aa})_j^{i+1} \right) \quad (-20)$$

- l'expression **du fluage viscoélastique**, inspirée du travail de Mauget (1996),

$$\text{Soit, } \varepsilon_{aa}^{Ve}(x_j, t_i) = \sum_{n=1}^4 A_{aa}^n(x_j, t_i) \quad (-21)$$

avec A_{aa}^n une variable interne dont l'expression est

$$A_{aa}^n(x_j, t_i) = \int_0^{t_i} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_i - t'}{\tau_n(T_{app})}\right) \right) \cdot J_a^n \cdot \frac{d\sigma_{aa}(x_j, t')}{dt'} \cdot dt'$$

Cette expression est solution de l'équation différentielle,

$$\frac{d A_{aa}^n}{dt}(x_j, t_i) = \frac{1}{\tau_n(T_{app})} \left(J_a^n \cdot \sigma_{aa}(x_j, t_i) - A_{aa}^n(x_j, t_i) \right)$$

En utilisant le développement implicite (Eq.19) de \overline{A}^n et avec l'équation précédente, nous obtenons,

$$A_{aa}^n(x_j, t_{i+1}) = \frac{1}{1 + B_n \cdot \Delta t_i} \cdot A_{aa}^n(x_j, t_i) + \frac{B_n \cdot dt}{1 + B_n \cdot \Delta t_i} \cdot J_a^n \cdot \sigma_{aa}(x_j, t_{i+1}), \quad (-22)$$

où $B_n = 1/\tau_n$.

Les équations algébriques 20, 21 et 22 insérées dans les équations 6 et 7 permettent d'exprimer les termes diagonaux du tenseur des contraintes à l'instant t_{i+1} :

$$\sigma_{aa}^{i+1} = \left(G_{ax} \cdot \left(\frac{\partial u_j^{i+1}}{\partial x} - f_j^{i+1} \right) + G_{ay} \cdot \left(\left(\alpha^{i+1} - \frac{x}{\rho^{i+1}} \right) - g_j^{i+1} \right) + G_{az} \cdot \left(\beta^{i+1} - h_j^{i+1} \right) \right) \quad (-23)$$

avec,

$$\begin{cases} f_j^{i+1} = R_{XX} \cdot \left(\left(X_b \right)_j^{i+1} - X_{psf} \right) + \frac{\mathcal{E}_{xx}^{ms}(x_j, t_i)}{1 + \left| \dot{X}_b \right|_j^{i+1} \cdot \Delta t_i \cdot m_x \cdot E_x^{ms}} \\ g_j^{i+1} = R_{YY} \cdot \left(\left(X_b \right)_j^{i+1} - X_{psf} \right) + \frac{\mathcal{E}_{yy}^{ms}(x_j, t_i)}{1 + \left| \dot{X}_b \right|_j^{i+1} \cdot \Delta t_i \cdot m_y \cdot E_{yy}^{ms}} - \sum_{n=1}^4 \frac{1}{1 + B_n \cdot \Delta t_i} \cdot A_{yy}^n(x_j, t_i) \\ h_j^{i+1} = R_{ZZ} \cdot \left(\left(X_b \right)_j^{i+1} - X_{psf} \right) + \frac{\mathcal{E}_{zz}^{ms}(x_j, t_i)}{1 + \left| \dot{X}_b \right|_j^{i+1} \cdot \Delta t_i \cdot m_z \cdot E_{zz}^{ms}} - \sum_{n=1}^4 \frac{1}{1 + B_n \cdot \Delta t_i} \cdot A_{zz}^n(x_j, t_i) \end{cases}$$

$$\overline{\overline{G}} = \begin{bmatrix} G'_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & G'_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & G'_{zz} \end{bmatrix}^{-1},$$

$\overline{\overline{S}}$ étant le tenseur des complaisances élastiques (Eq.9), et

$$G'_{aa} = S_{aa} + \left(1 + \left| \dot{X}_b \right|_j^{i+1} \cdot \Delta t_i \cdot m_a \cdot E_a^{ms} \right)^{-1} \cdot m_a \cdot \left| \dot{X}_b \right|_j^{i+1} \cdot \Delta t_i + \sum_{n=1}^4 \frac{B_n \cdot \Delta t_i}{1 + B_n \cdot \Delta t_i} \cdot J_a^n$$

Cette écriture laisse apparaître un terme correctif au tenseur des complaisances élastiques ($\overline{\overline{S}}$). Mais Mauget (1996) remarque que cette correction est artificielle et liée à la formulation implicite du problème.

En résumé, la méthode des différences finies permet d'exprimer les contraintes mécaniques au pas de temps suivant, à partir de la teneur en eau, du taux d'humidité, de la déformation totale à cet instant, ainsi qu'en fonction d'autres termes à l'instant présent. En ce qui concerne l'humidité X_b et

sa vitesse de variation \dot{X}_b , elles seront estimées par *TransPore*. Les termes écrits à l'instant présent tels que le fluage viscoélastique et la déformation mécanosorptive, pourront être déterminés à partir de leurs valeurs passées (Eq.20, Eq.22). Les grandeurs de déplacements (u, α, β) et la courbure (ρ), toutes exprimées au pas de temps suivant, sont les inconnues de ce système d'équations.

Le déplacement selon (OX) étant défini pour chacun des nœuds du maillage les inconnues sont au nombre de $Ncv+3$. L'utilisation de l'équation 23 dans les $Ncv+3$ équations algébriques 16, 17, 18 permet d'imposer des conditions d'équilibre mécanique sur le champ de déplacement et sur la courbure de la planche qui permettront de déterminer leurs valeurs.

✓ équation d'équilibre, projetée sur l'axe (OX),

$$\left((G_{xx})_j^{i+1} \cdot \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^{i+1} - f_j^{i+1} \right) + (G_{xy})_j^{i+1} \cdot \left((\alpha^{i+1} + x_j / \rho^{i+1}) - g_j^{i+1} \right) + (G_{xz})_j^{i+1} \cdot (\beta^{i+1} - h_j^{i+1}) \right) = 0$$

$j \rightarrow 1, Ncv$

✓ équilibre des moments,

$$\sum_{j=1}^{Ncv} \left((G_{yx})_j^{i+1} \cdot \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^{i+1} - f_j^{i+1} \right) + (G_{yy})_j^{i+1} \cdot \left(\left(\alpha^{i+1} - \frac{x_j}{\rho^{i+1}} \right) - g_j^{i+1} \right) + (G_{yz})_j^{i+1} \cdot (\beta^{i+1} - h_j^{i+1}) \right) \cdot x_j \cdot \Delta x_j = 0$$

✓ équation d'équilibre, projetée sur l'axe (OY),

$$\sum_{j=1}^{Ncv} \left((G_{yx})_j^{i+1} \cdot \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^{i+1} - f_j^{i+1} \right) + (G_{yy})_j^{i+1} \cdot \left(\left(\alpha^{i+1} - \frac{x_j}{\rho^{i+1}} \right) - g_j^{i+1} \right) + (G_{yz})_j^{i+1} \cdot (\beta^{i+1} - h_j^{i+1}) \right) \cdot \Delta x_j = 0$$

✓ équation d'équilibre, projetée sur l'axe (OZ),

$$\sum_{j=1}^{Ncv} \left((G_{zx})_j^{i+1} \cdot \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_j^{i+1} - f_j^{i+1} \right) + (G_{zy})_j^{i+1} \cdot \left(\left(\alpha^{i+1} - \frac{x_j}{\rho^{i+1}} \right) - g_j^{i+1} \right) + (G_{zz})_j^{i+1} \cdot (\beta^{i+1} - h_j^{i+1}) \right) \cdot \Delta x_j = 0$$

Il est possible d'écrire ces $Ncv+3$ équations algébriques sous la forme matricielle $\overline{\overline{A}} \cdot \overline{\overline{X}}^* = \overline{\overline{B}}$. Le vecteur $\overline{\overline{X}}^*$, désigne l'inconnue du problème, il contient le champ de déplacement dans la planche et la courbure globale.

$$\begin{array}{c} \longleftarrow \text{Ncv} \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \longrightarrow \\ \longleftarrow \text{+ 3} \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \longrightarrow \end{array}$$

$$\left[\begin{array}{cccc|cccc} (G_{xx})_1^{i+1} & 0 & 0 & 0 & 0 & (G_{yx})_1^{i+1} & (G_{xz})_1^{i+1} & -(G_{xy})_1^{i+1} \cdot x_1 \\ 0 & * & 0 & 0 & 0 & (G_{yy})_2^{i+1} & (G_{yz})_2^{i+1} & -(G_{yx})_2^{i+1} \cdot x_2 \\ 0 & 0 & * & 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * & * \\ (G_{yx})_1^{i+1} \cdot \Delta x_1 & * & * & * & * & (G_{yx})_{Ncv}^{i+1} \cdot \Delta x_{Ncv} & \sum_{j=1}^{Ncv} (G_{yy})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j & \sum_{j=1}^{Ncv} (G_{yz})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j & -\sum_{j=1}^{Ncv} (G_{yy})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j \cdot x_j \\ (G_{zx})_1^{i+1} \cdot \Delta x_1 & * & * & * & * & (G_{zx})_{Ncv}^{i+1} \cdot \Delta x_{Ncv} & \sum_{j=1}^{Ncv} (G_{zy})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j & \sum_{j=1}^{Ncv} (G_{zz})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j & -\sum_{j=1}^{Ncv} (G_{zy})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j \cdot x_j \\ (G_{yx})_1^{i+1} \cdot \Delta x_1 \cdot x_1 & * & * & * & * & (G_{yx})_{Ncv}^{i+1} \cdot \Delta x_{Ncv} \cdot x_{Ncv} & \sum_{j=1}^{Ncv} (G_{yy})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j \cdot x_j & \sum_{j=1}^{Ncv} (G_{yz})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j \cdot x_j & -\sum_{j=1}^{Ncv} (G_{yy})_j^{i+1} \cdot \Delta x_j \cdot x_j^2 \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_1^{i+1}}{\partial x} \\ \frac{\partial u_2^{i+1}}{\partial x} \\ * \\ * \\ * \\ * \\ * \\ * \\ \frac{\partial u_{Ncv}^{i+1}}{\partial x} \\ \alpha^{i+1} \\ \beta^{i+1} \\ 1/\rho^{i+1} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} f_1^{i+1} \cdot (G_{xx})_1^{i+1} + g_1^{i+1} \cdot (G_{yy})_1^{i+1} + h_1^{i+1} \cdot (G_{xz})_1^{i+1} \\ * \\ * \\ * \\ * \\ * \\ f_{Ncv}^{i+1} \cdot (G_{xx})_{Ncv}^{i+1} + g_{Ncv}^{i+1} \cdot (G_{yy})_{Ncv}^{i+1} + h_{Ncv}^{i+1} \cdot (G_{xz})_{Ncv}^{i+1} \\ \sum_{j=1}^{Ncv} \left(f_j^{i+1} \cdot (G_{yx})_j^{i+1} + g_j^{i+1} \cdot (G_{yy})_j^{i+1} + h_j^{i+1} \cdot (G_{yz})_j^{i+1} \right) \cdot \Delta x_j \\ \sum_{j=1}^{Ncv} \left(f_j^{i+1} \cdot (G_{zx})_j^{i+1} + g_j^{i+1} \cdot (G_{zy})_j^{i+1} + h_j^{i+1} \cdot (G_{zz})_j^{i+1} \right) \cdot \Delta x_j \\ \sum_{j=1}^{Ncv} \left(f_j^{i+1} \cdot (G_{yx})_j^{i+1} + g_j^{i+1} \cdot (G_{yy})_j^{i+1} + h_j^{i+1} \cdot (G_{yz})_j^{i+1} \right) \cdot x_j \cdot \Delta x_j \end{array} \right\}$$

$$\begin{array}{l} \uparrow \text{Ncv} \\ \uparrow \text{+3} \\ \downarrow \end{array}$$

L'inversion de cette matrice va permettre de déterminer le champ de déplacement et la courbure de la planche au pas de temps suivant, afin d'avoir une évolution quasi-statique du système (planche) (H4).

2.1.3 Résolution du système linéaire : $\overline{\overline{A}} \cdot \overline{\overline{X}}^* = \overline{\overline{B}}$

Les algorithmes choisis sont décrits dans ce paragraphe, ainsi que leur rôle dans la résolution de l'équation matricielle $\overline{\overline{A}} \cdot \overline{\overline{X}}^* = \overline{\overline{B}}$. Ceux-ci sont issus de l'ouvrage *Numerical Recipes In Fortran 77*.

Grâce à l'augmentation de la mémoire vive des ordinateurs il est désormais possible d'assembler à chaque pas de temps la matrice $\overline{\overline{A}}$, de dimension $(Ncv+3) \times (Ncv+3)$. $\overline{\overline{A}}$ est une matrice creuse possédant au moins $(Ncv^2 - Ncv)$ composantes nulles et aussi une bande diagonale et trois bandes latérales de termes non tous nul. Cette forme matricielle particulière peut être **compactée** afin d'éviter le stockage en mémoire des termes nuls ou d'effectuer des opérations dont l'un des opérandes est nul, opérations inutiles et coûteuses en temps de calcul. L'algorithme utilisé à cette fin réunit l'ensemble des termes de la matrice différents de zéro en un vecteur colonne, indicé suivant leurs positions dans la matrice creuse. Il est ensuite nécessaire de redéfinir les opérations matricielles simples au niveau de la forme compactée pour son utilisation dans la résolution.

Nous avons choisi d'utiliser une méthode itérative pour résoudre cette équation appelée **méthode du gradient conjugué**. Cette méthode construit, à partir d'un vecteur initial, une suite de vecteurs qui convergent vers la solution du système linéaire. Elle fait partie des méthodes dites de descente selon une direction privilégiée. Elle définit, pour une matrice $\overline{\overline{A}}$ symétrique et définie positive, la fonction quadratique, $f(\overline{\overline{X}}) = \frac{1}{2} \cdot \overline{\overline{X}}^T \overline{\overline{A}} \overline{\overline{X}} - \overline{\overline{X}}^T \overline{\overline{B}}$, dont le gradient, $\overline{\nabla} f = \overline{\overline{A}} \overline{\overline{X}} - \overline{\overline{B}}$, s'annule au minimum de f . La résolution du système devient alors un problème d'optimisation qui est traité pas à pas (Fig.III.10). Cet algorithme converge théoriquement en, au plus, $(Ncv+3)$ itérations.

Cependant, notre matrice $\overline{\overline{A}}$ n'est pas symétrique. Aussi, le système équivalent de Fletcher est-il utilisé pour **généraliser la méthode du gradient conjugué** à toutes matrices $\overline{\overline{A}}$ quelconques. La résolution se réalise alors sur le système linéaire équivalent, de rang $(2 \times (Ncv+3))$:

$$\begin{bmatrix} \overline{\overline{0}} & \overline{\overline{A}} \\ \overline{\overline{A}} & \overline{\overline{0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{\overline{X}} \\ \overline{\overline{Y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\overline{C}} \\ \overline{\overline{B}} \end{bmatrix}, \text{ où } \overline{\overline{C}} \text{ et } \overline{\overline{Y}} \text{ sont des vecteurs auxiliaires éliminés dans l'algorithme.}$$

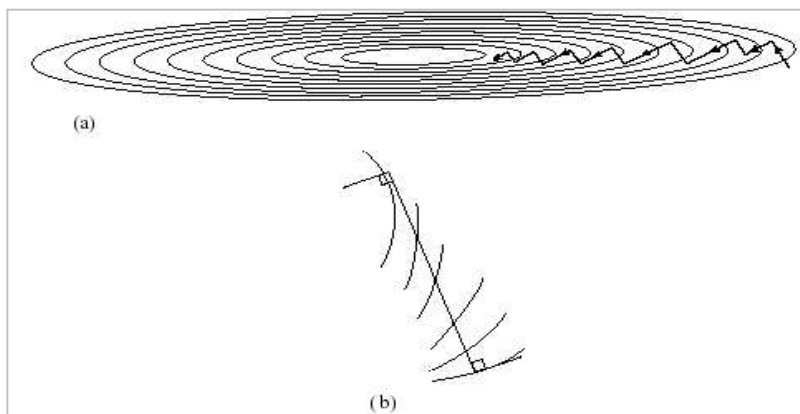


Figure III.10: Représentation de la méthode du gradient conjugué dans un espace de dimension 2. (a) Descente en plusieurs itérations vers le minimum de f ; (b) Zoom sur une itération : recherche suivant une direction perpendiculaire au contour $f(X_k)$ du minimum local X_{k+1} , à partir duquel une nouvelle direction de recherche orthogonale est construite. [Numerical Recipes In Fortran 77 (1986-1992)].

2.2 Ajout du module mécanique au code *TransPore*

A partir du champ d'humidité et de température dans l'épaisseur d'une planche, un module, écrit en *Fortran*, assemble la matrice A et le vecteur B et résout le système. Ce programme est appelé par *Transpore* (programme principal) à chaque pas de temps (Fig.III.11).

Le temps de calcul du code a été allongé par l'ajout de ce programme. Néanmoins, l'ensemble conserve son aspect interactif grâce à des durées de calculs faibles, restant de l'ordre de quelques secondes. Pour l'illustrer, le code *TransPore* simule le séchage complet d'une planche de 50 mm d'épaisseur, discrétisée en 100 contrôles de volume en 2.5 secondes (Pentium IV, 1,3 GHz). L'ajout du sous-programme de mécanique rallonge ce temps de calcul d'environ 2 secondes. La méthode du gradient biconjugué converge dans ce cas après seulement 10 itérations.

Lorsque les conditions de transferts, de part et d'autre de la planche sont symétriques, seul le séchage d'une demi-épaisseur de planche est simulé, afin de réduire le nombre de volumes de contrôle, et ainsi réduire le temps de calcul du code. Les conditions aux limites sont modifiées :

- inexistence des transferts externes sur l'une des faces,
- rayon de courbure imposé et tendant vers l'infini.

En revanche, dans le cadre d'un séchage dissymétrique, la première hypothèse est maintenue, mais le rayon de courbure est laissé variable pour qu'il puisse intervenir dans l'équilibre mécanique de l'échantillon.

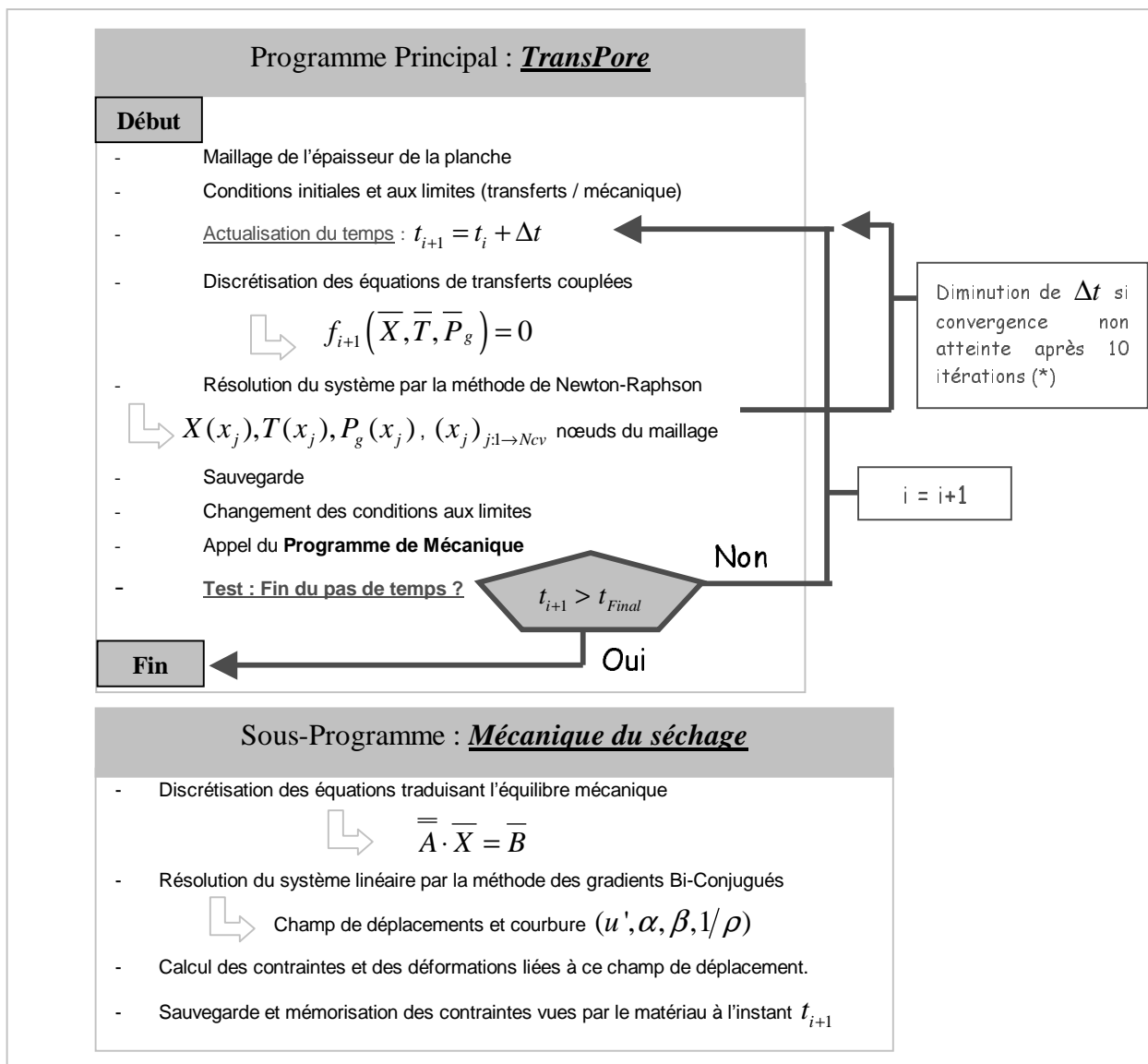


Figure III.11. Structure du code TransPore et du sous programme de mécanique.

(*) Le choix du pas Δt est délicat car s'il est grand, la convergence vers la solution du système sera difficile. En revanche, s'il est petit, la résolution sera très lente. Par conséquent, TransPore a un pas de temps variable dont la valeur s'adapte à la vitesse de convergence de la méthode de résolution du système d'équations.

Le code ainsi écrit a besoin des valeurs d'un grand nombre de grandeurs physiques pour alimenter les équations de transferts et de mécanique (Fig.III.12).

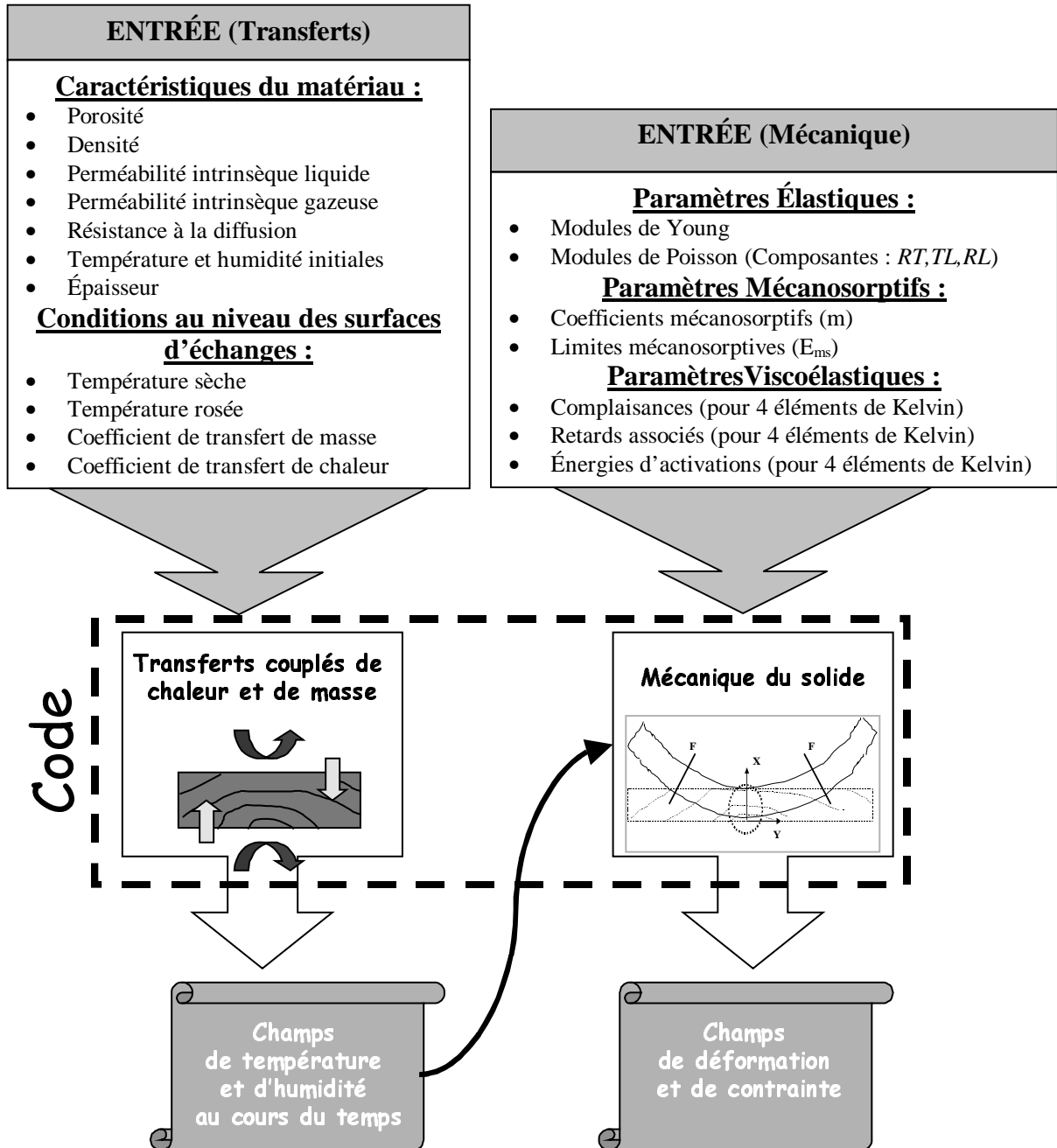


Figure III.12. Entrées/Sorties du code.

3 Le code *TransPore*, outil d'aide à la compréhension

Le modèle de connaissance décrit dans la partie précédente est utilisé ici pour aider à la compréhension des mécanismes complexes et couplés intervenant durant le séchage.

3.1 Importance de l'effet mémoire du bois dans les contraintes de séchage

Nous simulons, dans cette partie, le séchage d'une planche d'épicéa de 30 mm d'épaisseur, débitée sur dosse ($X_{\text{init}} = 55 \%$), soumise à des conditions de séchage constantes avec une température sèche de 80 °C et une température de rosée de 70 °C.

La figure III.13 présente l'évolution temporelle des contraintes mécaniques au cœur et à la surface de la planche séchée, selon deux modélisations différentes : élastique pur ; élastique, viscoélastique et mécanosorptif. Au début du séchage, la couche périphérique de la planche est en traction, et par équilibre mécanique son cœur est en compression. Un niveau de contraintes élevé de façon irréaliste apparaît pour la planche modélisée en élasticité pure. La courbe prenant en compte l'effet différé du bois, est plus vraisemblable et montre clairement son importance. Sans cet effet, il serait impossible de sécher une planche sans avoir de fissuration.

Une déformation mémoire vient, en effet, s'ajouter à la déformation élastique, et s'opposer au retrait, pour relaxer le matériau au début du séchage (Fig.III.14). Les profils d'humidité et de contraintes dans l'épaisseur de la planche (Fig.III.15) montrent que le retrait gagne les couches plus profondes et relaxe les contraintes internes. La progression du retrait dans l'épaisseur révèle la différence des déformations mémoires entre la périphérie et la partie centrale de la planche (Fig.III.14), et une inversion des contraintes de séchage apparaît (Fig.III.13 et Fig.III.15) entre ces deux zones. Le centre de la planche est alors en traction, et la périphérie en compression.

Face à cette nouvelle configuration des contraintes dans la planche, la déformation mécanosorptive évolue dans le sens opposé à sa précédente évolution. Puis, cette déformation se fige dans le temps à partir du moment où l'équilibre hygroscopique est atteint. Dans le cas présent, le fluage mécanosorptif de la surface est figé à partir de 50 heures et celui du centre de la planche à partir de 90 heures.

En parallèle, la déformation viscoélastique suit l'évolution des contraintes internes. Au cours du séchage, les variations du fluage viscoélastique sont de plus en plus faibles, car l'hygroactivation de ses propriétés disparaît peu à peu et les éléments de Kelvin à temps de retard plus long s'expriment. Seul l'activation thermique empêche le fluage viscoélastique d'être figé dans le temps (Fig.III.14).

À la fin du séchage, la planche modélisée en élasticité pure présente un niveau de contrainte nul dans son épaisseur, tandis que le modèle prenant en compte l'effet mémoire du bois (réaliste) simule la présence de contraintes résiduelles dans la planche.

L'effet mémoire du bois occupe une place importante dans les procédés de cintrage, l'étuvage des pièces de bois vert, ou encore dans la phase d'équilibrage du processus de séchage.

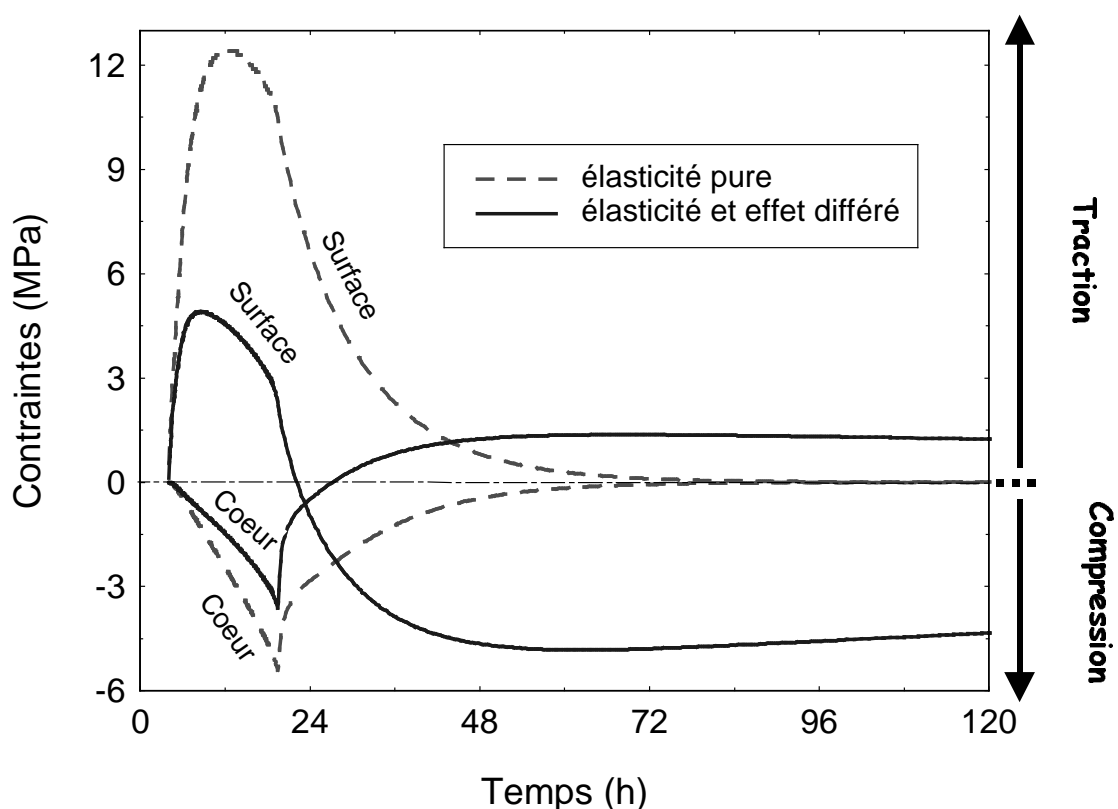


Figure III.13. Comparaison de l'évolution des contraintes à la surface et à cœur, de la planche séchée, avec une modélisation en élasticité pure et une autre tenant compte des propriétés viscoélastiques et mécanosorptives du bois.

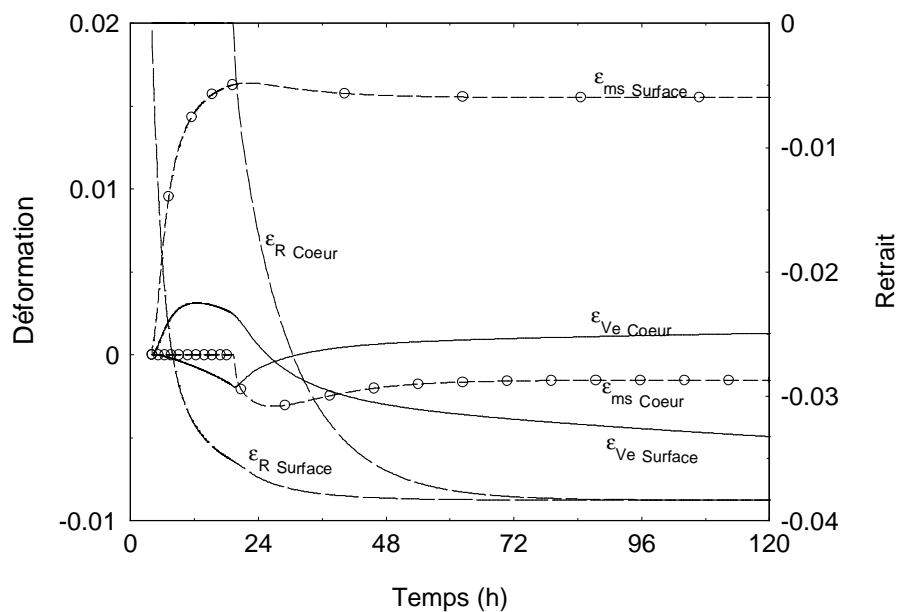


Figure III.14. Évolution temporelle des déformations différées et du retrait à cœur et à la surface de la planche de bois (R : Retrait ; Ve : Viscoélastique ; ms : Mécanosorptif)

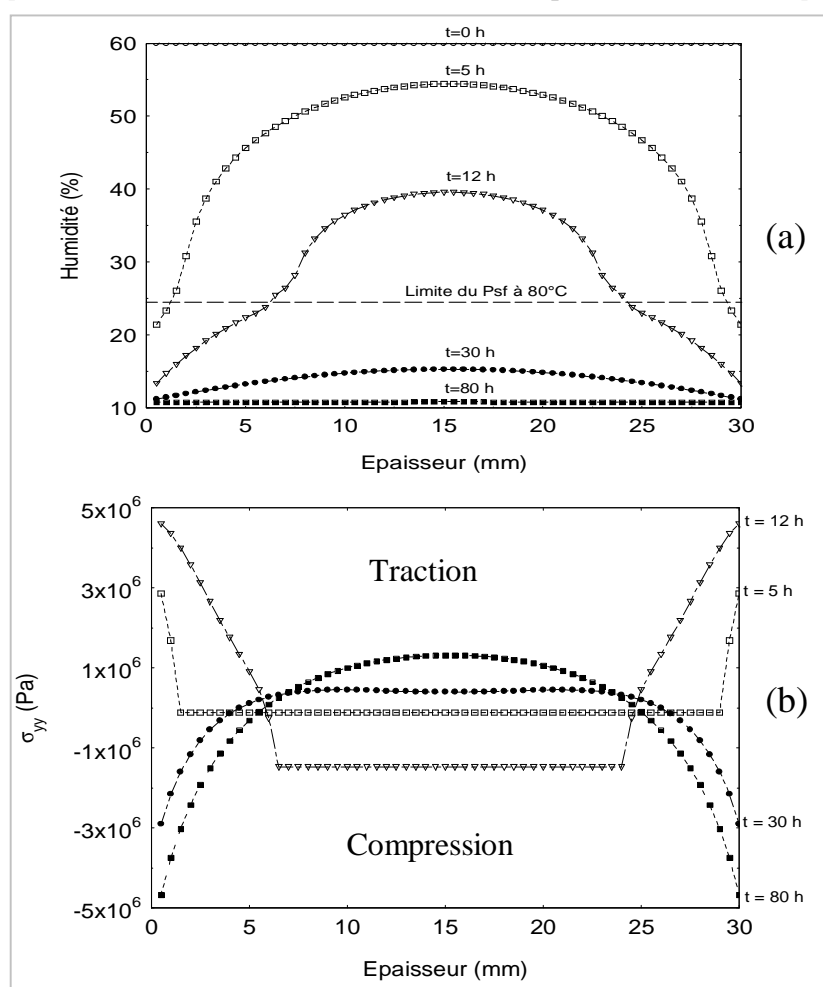


Figure III.15. (a) Gradient d'humidité dans l'épaisseur de la planche de bois. (b) Contraintes dans l'épaisseur de la planche séchée.

3.2 Thermo-hygroactivation du fluage viscoélastique

Nous souhaitons montrer dans cette partie l'influence de la température et de l'humidité du bois sur le fluage viscoélastique et sur les contraintes de séchage. Pour distinguer plus clairement l'influence des conditions externes sur les mécanismes viscoélastiques, le fluage mécanosorptif n'a pas été pris en compte dans la modélisation.

Deux types de conditions de séchage ont été appliqués à la planche précédente pour étudier l'effet de la thermoactivation :

- ✓ *conditions A* : température sèche de l'air de 70 °C, et une température de rosée de 61 °C ($X_{\text{équilibre}} = 9 \%$) ;
- ✓ *conditions B* : Conditions identiques durant la phase de séchage, mais les conditions sont changées à 20 °C, et 9°C ($X_{\text{équilibre}} = 9 \%$), respectivement pour la température sèche et la température de rosée, lorsque l'humidité moyenne de la planche a atteint 12 % (Fig.III.16). Ceci, simule le devenir d'une pile de planches à la sortie du séchoir en fin de cycle.

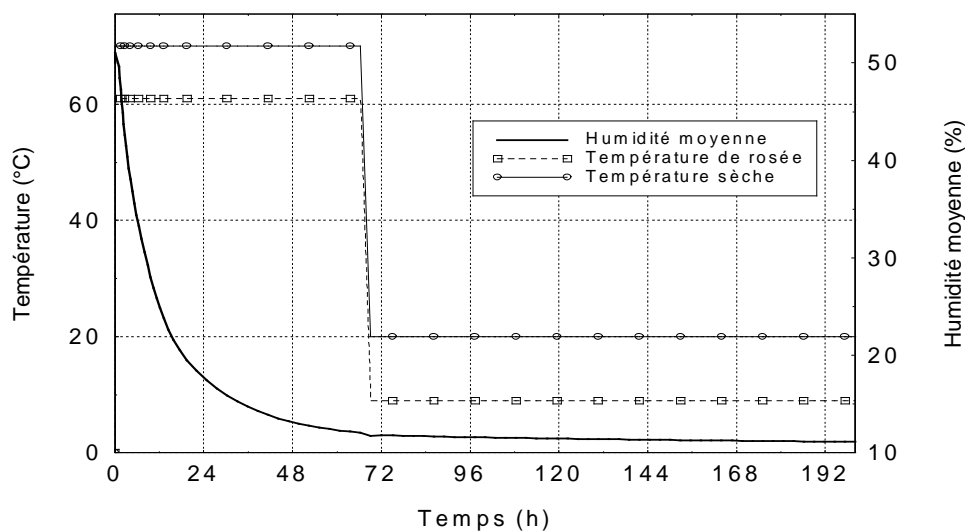


Figure III.16. Conditions B.

La figure III.17 montre que les déformations viscoélastiques sont figées dans le temps par l'ambiance à 20 °C (cas B). En effet, la disparition de l'activation thermique décélère les mécanismes viscoélastiques, et par conséquent, le taux de déformation viscoélastique tend

vers zéro. Des contraintes résiduelles pourront alors persister à l'intérieur de la planche. Cette simulation met en évidence l'intérêt de la phase d'équilibrage effectuée en séchage industriel.

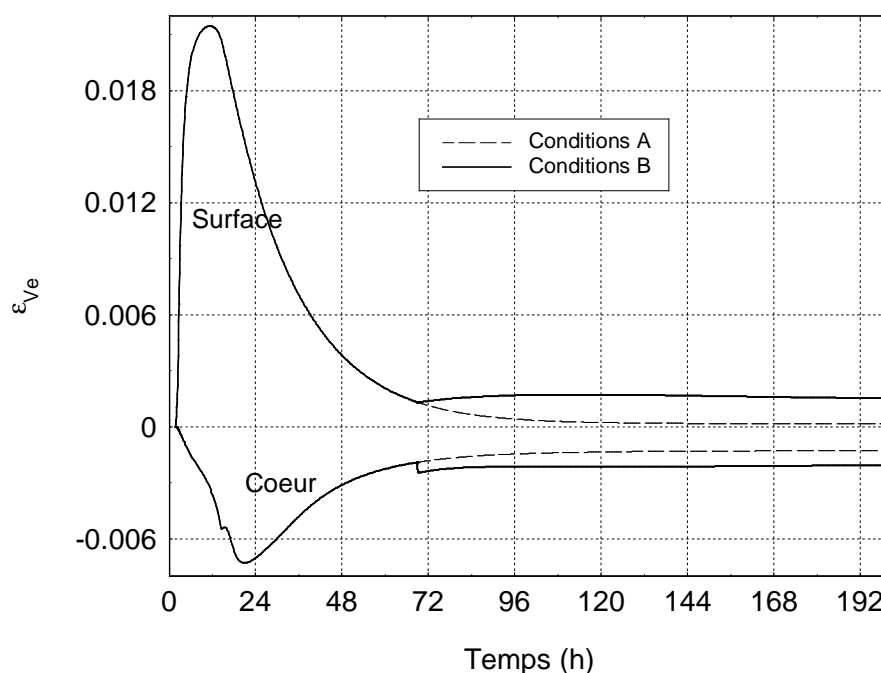


Figure III.17. Évolution du fluage viscoélastique à la surface et au cœur de la planche pour deux conditions de séchage.

Nous souhaitons désormais étudier l'influence de l'hygroactivation du fluage. Une première simulation a été réalisée en tenant compte de la désactivation hydrique lorsque l'humidité diminue (cas réaliste, retardant l'expression de certains éléments de Kelvin en dessous de 18% (Eq.11)), et une autre sans en tenir compte (hygroactivation permanente similaire à celle du bois vert) (Fig.III.18). Le flux d'air appliqué est de type A.

La désactivation hydrique s'exprime très tôt à la surface de la planche (3 heures), et limite l'amplitude du fluage. Dans ce cas, la traction de la surface est plus élevée (Fig.III.19), et par équilibre mécanique, la compression du cœur est plus importante (visible sur la courbe de fluage Fig.III.18). Ensuite, le retrait des couches plus profondes relaxe l'état des contraintes dans la planche. Bientôt, la désactivation hydrique du fluage viscoélastique s'exprime au niveau du centre de la planche (30 heures), lorsque celui-ci a son humidité inférieure à 18 % (teneur en eau critique Eq.11). La planche présente à la fin du séchage des déformations viscoélastiques non récupérées qui maintiennent la planche sous contraintes.

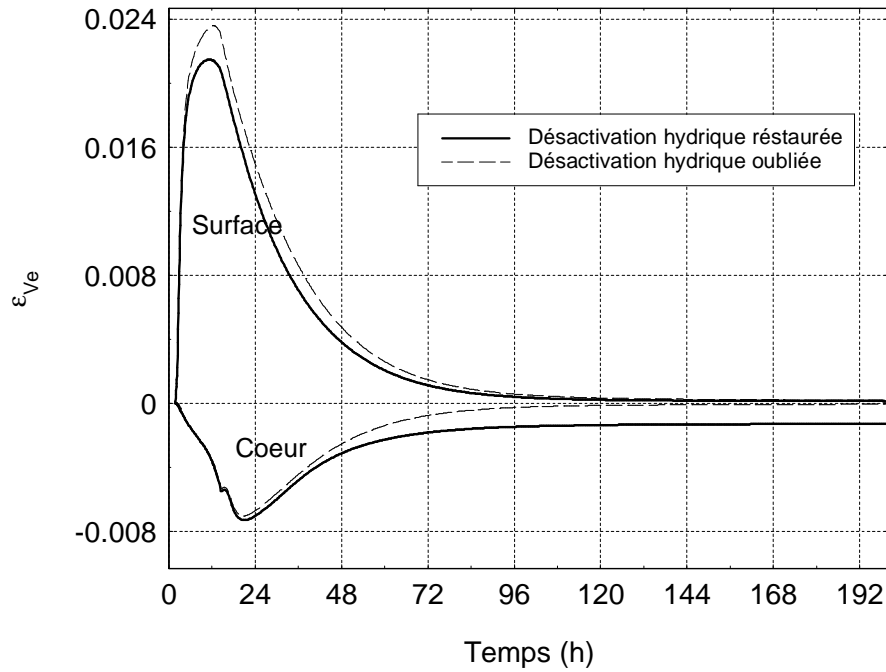


Figure III.18. Fluage viscoélastique au cœur de la planche et à la surface. Modélisation avec ou sans la désactivation hydrique. Conditions de séchage A.

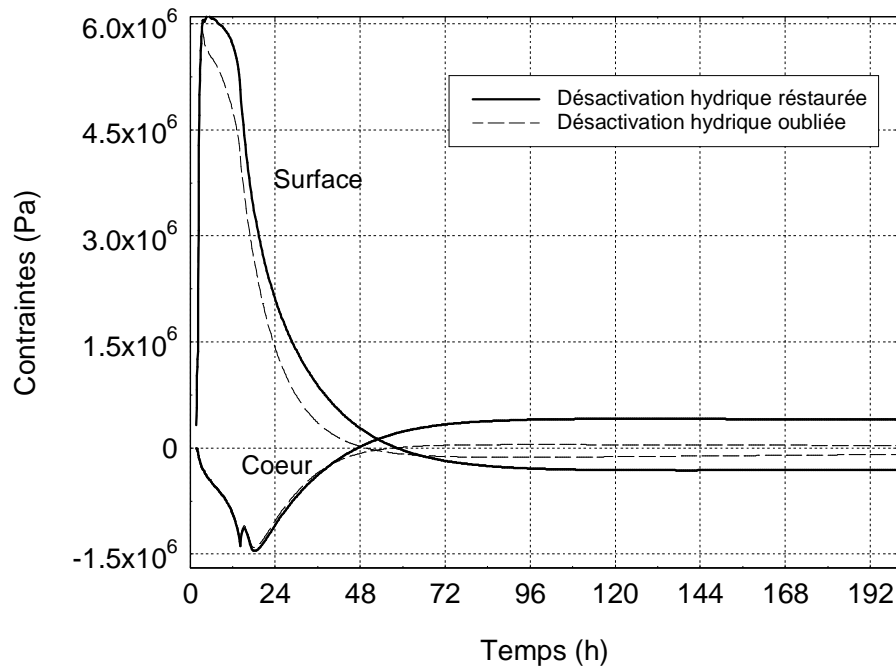


Figure III.19. Contraintes de séchage à la surface et à cœur au cours du séchage. Modélisation avec ou sans la désactivation hydrique. Conditions de séchage A.

Ainsi, les conditions appropriées pour un séchage de qualité devront-elles favoriser la thermohydroactivation des propriétés viscoélastiques. Cette dernière permet, en effet, d'obtenir un fluage élevé au début du séchage qui s'oppose aux différences de retraits locaux et diminue les contraintes. Après l'inversion des contraintes, le fluage continue d'évoluer pour diminuer le niveau des contraintes résiduelles dans le matériau.

Conclusion

Dans cette partie, *TransPore 1-D*, code simulant les transferts couplés de chaleur et de masse, a été complété par une unité de calcul des contraintes de séchage présentant les caractéristiques suivantes :

- une modélisation monodimensionnelle du comportement mécanique de la planche est réalisée à l'aide de l'hypothèse des déplacements plans ;
- le modèle de comportement utilisée prend en compte le retrait, l'élasticité linéaire du matériau, sa viscoélasticité thermohygroactivée, et le comportement mécanosorptif ;
- la discrétisation temporelle des équations d'équilibre a été réalisée avec la méthode des différences finies, en adoptant un développement implicite. La discrétisation spatiale a été effectuée avec la méthode des volumes finis. Enfin, la résolution du système est rapide grâce à un compactage de la matrice et à l'utilisation de la méthode généralisée du gradient biconjugué ;
- la possibilité de libérer ou de bloquer la courbure de la planche pour, par exemple, simuler un séchage dissymétrique.

À la fin de ce chapitre, ce modèle de connaissance est utilisé ici pour aider la compréhension des mécanismes complexes et couplés intervenant durant le séchage. À cette occasion l'importance de l'effet mémoire du bois et de la thermohygroactivation des propriétés viscoélastiques sur les contraintes de séchage a été soulignées.

Nous disposons désormais d'un code numérique donnant des informations qualitatives sur le séchage tel que le gradient d'humidité final, la durée du séchage, le niveau de contrainte maximale atteint durant le cycle ou encore les contraintes résiduelles en fin de séchage. L'approche monodimensionnelle de *TransPore* donne une réelle interactivité, en simulant le séchage complet d'une planche (transferts internes et contraintes mécaniques) en quelques secondes.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier le caractère prédictif de ce modèle de connaissance.

Nomenclature

Notations particulières

Soit une grandeur A :

$|A|$ Valeur absolue de A

\overline{A} Vecteur A

\overline{A}^T Transposé du vecteur A (ligne)

$\overline{\nabla A}$ Gradient de A

$\overline{\overline{A}}$ Tenseur A

$\overline{\overline{A}}^{-1}$ Tenseur inverse de $\overline{\overline{A}}$

A_{ij}^i Grandeur A estimée à l'instant t_i et au point x_j

A_{ij} Composante de la $i^{\text{ème}}$ ligne, $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice A .

A_i Composante de la $i^{\text{ème}}$ ligne de $\overline{\overline{A}}$

Scalars:

e Épaisseur de la planche

E_a^{ms} Limites de la déformation mécanosorptive selon la direction a

J_a^n Complaisances visco-élastiques relatives à l'élément n , selon la direction a .

$Kelv$ Nombre d'éléments de Kelvin

m_a Coefficients mécano-sorptifs selon la direction a .

N_{cv} Nombre total de contrôles de volume dans l'épaisseur de la planche

R Coefficient de retrait

T Temperature [$^{\circ}\text{C}$ ou K]

t Temps, [s]

Δt_i $i^{\text{ème}}$ incrément de temps, [s]

ν Coefficient de poisson

$X_{p, sf}$ Humidité au point de saturation des fibres

X_b Teneur en eau du bois dans le domaine hygroscopique

x_i	Abscisse du $i^{\text{ème}}$ noeuds, $[m]$	u	déplacement suivant l'axe (OX)
Δx_i	Distance entre x_i et x_{i+1} , $[m]$	α	déplacement suivant l'axe (OY)
τ_n	Temps de relaxation du $n^{\text{ème}}$ élément de Kelvin, $[s]$	β	déplacement suivant l'axe (OZ)
ρ	Rayon de courbure, $[m]$	R	Radial
		T	Tangentiel

Grandeurs tensorielles ou vectorielles

\vec{v}	Vecteur déplacement
$\underline{\underline{\varepsilon}}$	Tenseur des déformations d'ordre 2
$\underline{\underline{\sigma}}$	Tenseur des contraintes d'ordre 2
$[Id]$	Matrice Identité
$[S]$	Tenseur d'ordre 4 des complaisances élastiques.

Indices inférieurs:

e	Élastique
ms	Mécanosorptif
Ve	Viscoélastique
r	Retrait
Tot	Total(e)
L	Longitudinal

ANNEXE III.1 : Formulation des transferts couplés

Une série d'équations, déduite de la théorie de Whitaker, décrit les transferts couplés de chaleur, de masse, de quantité de mouvement [Perré (1987), Perré et A.Degiovanni (1990)]. Il nous a semblé important de rappeler, ce jeu complet d'équation, sur lesquels repose le code *TransPore*.

Les lois de conservation et les lois phénoménologiques peuvent s'appliquer à chacune des trois phases au niveau microscopique. Cependant, devant la complexité géométrique du milieu poreux, il est décrit de manière globale en utilisant des équations macroscopiques. La valeur macroscopique de la grandeur Ψ en un point sera définie comme la moyenne de Ψ sur un petit volume représentatif du milieu poreux (VER) centré sur le point géométrique considéré. Deux moyennes peuvent être définies : la moyenne globale, $\bar{\Psi} = \frac{1}{VER} \int_{VER} \Psi \cdot dV$,

et la moyenne intrinsèque, limité à une phase i , $\bar{\Psi}^i = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \Psi \cdot dV$. Ces équations sont ensuite

moyennées et sommées sur un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau poreux afin d'obtenir des équations macroscopiques. Cette prise de moyenne revient à considérer par la suite le milieu poreux comme un milieu continu fictif (P.Perré et A.Degiovanni (1990)).

Soit un petit élément du matériau poreux, dans lequel coexistent de l'eau liquide (eau libre), une phase gazeuse contenant à la fois de la vapeur d'eau, de l'air sec, et une phase solide composée de matière cellulosique et d'eau liée.

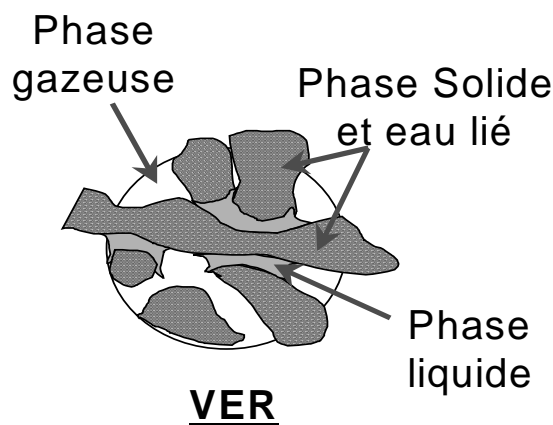


Figure III.20. Petit volume représentatif du matériau poreux (VER)

Nous rappelons brièvement la formulation d'une équation de conservation. Soit la grandeur extensive Φ (représentant une fraction massique, l'enthalpie, etc.) contenu dans un volume V délimité par une surface extérieure ∂V . L'équation de conservation de la grandeur Φ dans le volume V s'écrit :

$$\underbrace{\iiint_V \frac{\partial \phi}{\partial t} dv}_{\text{Variation totale de } \phi \text{ dans le volume } dV \text{ par unité de temps}} = \underbrace{\iint_{\partial V} \zeta ds}_{\text{Flux à travers la surface } \partial V \text{ de } \zeta \text{ (=densité de flux de la grandeur } \phi)} + \underbrace{\iiint_V F dv}_{\text{Production à l'intérieur de } V \text{ (Fi= Production par unité de volume et de temps de la grandeur } \phi)}$$

En utilisant le théorème de divergence, nous obtenons, $\frac{\partial}{\partial t}(\Phi) = \text{div}(\zeta) + F$

Bilans massiques

Le **bilan sur l'humidité** fait intervenir l'eau en phase liquide, en phase vapeur et l'eau liée à la matrice cellulosique :

✓ *la phase liquide :*

$$\rho_l \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_l \bar{U}_l) = -\langle \dot{m} \rangle$$

✓ *la phase gazeuse*, elle est constituée d'air sec et de vapeur d'eau et l'équation de conservation massique sera donc composée de deux équations non liées :

$$\frac{\partial \bar{\rho}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_g \bar{U}_g) = \langle \dot{m} \rangle + \langle \dot{m}_b \rangle \quad \text{et} \quad \frac{\partial \bar{\rho}_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_v \bar{U}_v) = \langle \dot{m} \rangle + \langle \dot{m}_b \rangle$$

avec \bar{U}_g , la vitesse moyenne du gaz [$m \cdot s^{-1}$] défini par la loi de Darcy généralisée.

✓ *l'eau liée :*

$$\frac{\partial \bar{\rho}_b}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_b \bar{U}_b) = -\langle \dot{m}_b \rangle$$

Bilan énergétique

Le bilan d'énergie va permettre de déterminer l'évolution de la température moyenne au sein du matériau :

$$\frac{\partial \overline{\rho h}}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho U \cdot h}) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \cdot \nabla \overline{T}),$$

$$\text{avec } \overline{\rho h} = \overline{\rho}_{cell} h_{cell} + \overline{\rho}_a h_a + \overline{\rho}_v h_v + (\overline{\rho}_l + \overline{\rho}_b) h_l - \int_0^{\rho_b} h_s d\rho_b$$

$$\text{et } \overline{\rho u h} = \overline{\rho}_a \overline{u}_a h_a + \overline{\rho}_v \overline{u}_v h_v + (\overline{\rho}_l \overline{u}_l + \overline{\rho}_b \overline{u}_b) h_l - \overline{\rho}_b \overline{u}_b h_s(\overline{\rho}_b).$$

Les relations enthalpie-température sont données par les relations suivantes :

$$h_c = Cp_c(T - T_0) ; \quad h_a = Cp_a(T - T_0) ; \quad h_v = Cp_v(T - T_0) + h_{vap}^0 ; \quad h_l = Cp_l(T - T_0) ;$$

$$\overline{h}_b = h_l(\overline{T}) - h_s(\overline{\rho}_b)$$

Équations de Transfert :

Au sein de la phase gazeuse nous pouvons écrire l'équation de transfert de la vapeur d'eau seule dont le flux total est la somme d'un flux diffusif de la vapeur dans la phase gazeuse et d'un flux convectif (loi de Darcy généralisée).

✓ *Diffusion de la vapeur d'eau (Loi de Fick)*

$$\overline{\rho}_v \overline{U}_v = \overline{\rho}_v \overline{U}_g - \overline{\rho}_g D_{eff} \nabla \left(\frac{\overline{\rho}_v}{\overline{\rho}_g} \right)$$

où D_{eff} est le coefficient de diffusion effectif de la vapeur d'eau dans le bois au sein du VER.

✓ *Mouvement de convection de la phase gazeuse (Loi de Darcy généralisée)*

$$\overline{U}_g = \frac{-K_g \cdot k_g}{\mu_g} \cdot \nabla(\overline{p}_g)$$

La phase gazeuse étant assimilée à un mélange de gaz parfait, il est possible d'écrire :

$$\bar{p}_g = \bar{p}_a + \bar{p}_v, \text{ avec } \bar{p}_i = \bar{\rho}_i RT / M_i \quad i = a, v$$

✓ *Migration de l'eau liée (Loi de Fick)*

Elle est définie par une relation fickienne sans tenir compte de la thermodiffusion. En effet, celle-ci a peu d'influence dans un séchage basse température ou haute température car dans cette dernière configuration la surpression interne génère un flux selon la *loi de Darcy* dominant.

$$\bar{\rho}_b \bar{U}_b = -\bar{\rho}_c D_b \nabla \left(\frac{\bar{\rho}_b}{\bar{\rho}_c} \right) - \bar{\rho}_c \bar{D}_{bT} \cdot \nabla \bar{T}$$

où D_b , représente le coefficient de diffusion surfacique de l'eau liée (m²/s).

✓ *Mouvement de convection de la phase liquide (Loi de Darcy généralisée)*

$$\bar{U}_l = \frac{-K_l \cdot k_l}{\mu_l} \cdot \nabla(\bar{p}_l) .$$

La pression liquide est reliée à la pression gazeuse par l'intermédiaire de la pression capillaire moyenne sur le VER (\bar{p}_c), selon $\bar{p}_l = \bar{p}_g - \bar{p}_c$.

\bar{p}_c est une caractéristique du milieu poreux et dépend de la température, de la teneur en eau et de la répartition de la taille des pores.

Ainsi, le bilan massique global, le bilan énergétique développé, et l'expression de la pression totale de la phase gazeuse vont permettre de déterminer l'évolution temporelle de chacune des trois variables indépendantes : température, teneur en eau et pression totale de la phase gazeuse. Les équations résolues par *TransPore* sont les suivantes :

✓ *Bilan énergétique :*

$$\begin{aligned} \bar{\rho} C_p \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \Delta h_v \left(\left\langle \dot{m} \right\rangle + \left\langle \dot{m}_b \right\rangle \right) + \left\langle \dot{m}_b \right\rangle \cdot h_s - \bar{\rho}_b \bar{u}_b \nabla(h_s) + \left[(\bar{\rho}_l \bar{u}_l + \bar{\rho}_b \bar{u}_b) \cdot C_{pl} + \sum_{i=a,v} (\bar{\rho}_i \bar{u}_i \cdot C_{pi}) \right] \cdot \nabla \bar{T} \\ = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla \bar{T}) \end{aligned}$$

✓ *Bilan massique global :*

$$\bar{\rho}_{cell} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\bar{\rho}_l \frac{K_l \cdot k_l}{\mu_l} \cdot \nabla (\bar{p}_g - \bar{p}_c) + \bar{\rho}_v \frac{K_g \cdot k_g}{\mu_g} \cdot \nabla (\bar{p}_g) + \bar{\rho}_g D_{eff} \nabla \left(\frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_g} \right) + \bar{\rho}_{cell} D_b \nabla \left(\frac{\bar{\rho}_b}{\bar{\rho}_{cell}} \right) \right]$$

✓ *Pression totale de la phase gazeuse :*

$$\frac{\partial \bar{p}_g}{\partial t} = \frac{\partial \bar{p}_v}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p}_v}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} - \frac{RT}{M_a} \cdot \frac{1}{\varepsilon_g} \cdot \left(\nabla (\bar{\rho}_a \cdot \bar{u}_a) + \bar{\rho}_a \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} \right) + \frac{p_a}{T} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Avec, $X = \frac{\bar{\rho}_l + \bar{\rho}_v + \bar{\rho}_b}{\bar{\rho}_c}$, l'humidité moyenne du VER.

-*Conditions aux limites :*

Les flux de chaleur, d'humidité et d'air sont supposés nuls, sur le plan de symétrie (cas monodimensionnel : plan parallèle à la surface d'échange et passant par le centre de la planche).

Sur les faces d'échanges extérieurs du milieu poreux, la pression est égale à la pression extérieure, tandis que les flux de chaleur et de vapeur extérieurs sont déterminés par les coefficients d'échange.

Le flux de chaleur à travers la couche limite est de la forme :

$$q_c = h \cdot (\bar{T}_s - T_\infty)$$

Le flux de masse à l'extérieur, donné par le modèle film :

$$q_v = h_m \cdot [c] \cdot M_v \cdot \ln \left(\frac{1 - x_{v,\infty}}{1 - x_v} \right)$$

-*Conditions initiales :*

A l'état initial, la température et l'humidité de la planche sont supposés homogènes dans toute son épaisseur. La pression initiale sera de même supposé constante et égale à la pression atmosphérique.

Nomenclature pour l'Annexe III

C_p	Chaleur massique [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]	T_s	Température sèche de l'air ambiant [°C]
c	Concentration molaire [$mol.m^{-3}$]	U	Vitesse [$m.s^{-1}$]
D	Diffusivité [$m^2.s^{-1}$]	X	Teneur en eau [$Kg_{eau}.(Kg_{matiere.seche})^{-1}$]
h	Enthalpie spécifique [$J.kg^{-1}$] ou coefficient de transfert de chaleur [$W.m^{-2}.°C^{-1}$]	x	Fraction molaire
h_m	coefficient de transfert de masse (m/s)	<u>Symboles grecs :</u>	
Δh_v	Chaleur latente de vaporisation [$J.kg^{-1}$]	\mathcal{E}	Fraction volumique
Δh_s	Chaleur différentielle de sorption [$J.kg^{-1}$]	λ	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.°C^{-1}$]
k	Perméabilité relative	μ	Viscosité dynamique [Pa.s]
K	Perméabilité absolue [m^2]	ρ	Densité [$Kg.m^{-3}$]
M	Masse molaire [$kg.mol^{-1}$]	σ	Tension superficielle de l'interface eau-gaz [$N.m^{-1}$]
$\langle \dot{m} \rangle$	Taux d'évaporation de l'eau libre au sein du matériau poreux [$kg_{eau}.s^{-1}.m^{-3}$]	<u>Indices inférieurs :</u>	
$\langle \dot{m}_b \rangle$	Taux d'évaporation de l'eau liée au sein du matériau poreux [$kg_{eau}.s^{-1}.m^{-3}$]	a	Air sec
p	Pression [Pa]	atm	Atmosphérique
q_c	Flux de chaleur convectif [$W.m^{-2}$]	b	Eau liée
q	Flux massique [$kg.m^{-2}.s^{-1}$]	c	Cellulose
R	Constante des gaz parfaits [$J.mol^{-1}.°C^{-1}$]	eff	Effectif
t	Temps [s]	g	Gaz (air sec + vapeur)
T	Température [°C ou K]	l	Liquide ou eau libre
T_h	Température humide de l'air ambiant [°C]	psf	Point de saturation des fibres
		s	Sorption
		sat	Etat saturé en eau
		v	Vapeur
		vap	Vaporisation
		vs	Vapeur saturante
		∞	Ambiant
		0	dans les Conditions normales
		<u>Indices supérieurs :</u>	
		$\bar{\quad}$	Valeur moyennée sur le VER
		g	Moyenne sur la phase gazeuse
		l	Moyenne sur la phase liquide

ANNEXE III.2 : Paramètres physiques entrés dans le code

Paramètres de transfert pour un échantillon d'épicéa :

Propriétés du matériau	Valeurs
Porosité (--)	0,73
Masse volumique (état anhydre) (kg / m ³)	360
Pression capillaire (Pa)	$P_c = (77,5 - 0,185 \cdot T) \cdot 124 \cdot (X_l / X_{sat} + 10^{-4})^{-0,61}$
Conductivité thermique (W/m ² /°C)	$\lambda_{eff}^R = \left(\lambda_{bois}^R \cdot \epsilon_s + \lambda_{air} \cdot \epsilon_g + \lambda_{eau} \cdot \epsilon_l \right)^4$ avec $\lambda_{eff}^R = 2 \times \lambda_{eff}^T$
Coefficient de diffusion de l'eau liée à 20°C (m ² /s)	$D_b^T = 10^{-10}$ et $D_b^R = 1,2 \cdot 10^{-10}$
Résistance à la diffusion (--)	$f = 0,01$
Perméabilité intrinsèque liquide (m ²)	$K_l^T = 4,5 \cdot 10^{-16}$ et $K_l^R = 1,5 \cdot 10^{-16}$
Perméabilité intrinsèque gazeuse (m ²)	$K_g^T = 1,5 \cdot 10^{-16}$ et $K_g^R = 5 \cdot 10^{-17}$

Le coefficient de diffusion de la vapeur dans le bois est exprimé par : $D_{eff} = D_v \times f \times k_{rg}$

avec, D_v le coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air, $D_v = 2,26 \cdot 10^{-5} \cdot \left((T + 273) / 273 \right)^{1,81}$, et k_{rg}

la perméabilité relative liquide qui est exprimé selon l'état de saturation du bois :

$$k_{rg} = 1 + \left(\frac{X_l}{X_{sat}} \right)^2 \cdot \left(-3 + 2 \cdot \left(\frac{X_l}{X_{sat}} \right) \right)$$

Paramètres mécanique pour un échantillon d'épicéa :

Propriétés du matériau	Valeurs
Coefficient de retrait (% / %)	$R_R = 0,16$; $R_T = 0,36$; $R_L = 0,005$
Modules de Young (MPa)	$E_R = 910$; $E_T = 490$; $E_L = 13800$
Coefficients de Poisson (--)	$\nu_{RT} = 0,56$; $\nu_{LR} = 0,45$; $\nu_{TL} = 0,019$
coefficients mécanosorptifs (Pa ⁻¹)	$m_R = 1,5 \cdot 10^{-7}$; $m_T = 8 \cdot 10^{-8}$; $m_L = 2,3 \cdot 10^{-6}$
Limite mécanosorptive (MPa ⁻¹)	$Ems_R = 9,3$; $Ems_T = 5$; $Ems_L = 140$

Les valeurs intervenant dans les 4 éléments de Kelvin (direction radiale), modélisant le fluage viscoélastique du matériau [Perré et Passard (2004)], sont présentées dans le tableau suivant :

n	Complaisance viscoélastique (Mpa)	Temps de relaxation à 20°C (heures)	Energie d'activation (kJ/mole)
1	354	1,77	44,2
2	125	700,4	120,8
3	53	$4,93 \times 10^{+8}$	270,9
4	19,5	$2,49 \times 10^{+5}$	111,1

IV Du modèle de connaissance à l'outil opérationnel

<u>Introduction</u>	131
<u>1 Évaluation de paramètres de transfert par comparaison des résultats théoriques et expérimentaux</u>	132
1.1 Confrontation de la version actuelle de <i>TransPore</i> avec les résultats expérimentaux	132
1.2 Évaluation d'une nouvelle expression de la perméabilité relative liquide	134
1.3 Validation de cette nouvelle expression	137
<u>2 Confrontation des résultats simulés et mesurés pour deux épaisseurs usuelles</u>	139
2.1 Le matériel végétal et les conditions de séchage	139
2.1.1 Le matériel végétal	139
2.1.2 La conduite du séchage	140
2.2 Confrontation des résultats expérimentaux et simulés	141
2.2.1 Valeurs des paramètres physiques entrés dans le code	141
2.2.2 Comportement du code <i>TransPore</i> vis-à-vis des transferts	143
2.2.3 Comportement du code vis à vis de la mécanique	148
<u>Conclusion</u>	154
ANNEXE IV.1 : La perméabilité relative	156
ANNEXE IV.2 : Débit des planches	157

Introduction

Le modèle de connaissance décrit dans la partie précédente (chapitre III), est d'ores et déjà un outil d'aide pour comprendre les mécanismes complexes et couplés intervenant durant le séchage (paragraphe III.3). Toutefois, ce programme ne pourra acquérir son caractère prédictif qu'après avoir été confronté aux résultats observés et mesurés au niveau expérimental (Chapitre II). À l'issue de cette confrontation, nous serons à même de juger la fiabilité des prédictions de l'outil numérique et nous pourrons envisager alors l'utilisation de cet outil pour comprendre et améliorer le séchage des fortes épaisseurs d'avivés.

Ce chapitre se décompose en deux parties. Dans la première partie, les champs de teneur en eau mesurés au cours du séchage avec le dispositif du LERMaB site ENGREF sont utilisés pour ajuster certains paramètres de transferts nécessaires au modèle. Dans la seconde partie, de nouveaux essais expérimentaux ont été réalisés avec le dispositif du LERMaB site ENSTIB pour être comparés aux prédictions du code *TransPore*. L'objectif recherché ici étant de valider les prédictions du modèle concernant les effets de l'épaisseur, du débit de la planche, des conditions de séchage sur les transferts et sur les contraintes de séchage.

1 Évaluation de paramètres de transfert par comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

Prédire la qualité du séchage, estimer les contraintes internes au cours du processus ne peut pas être réalisé sans une estimation juste de l'évolution du champ de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. Aussi, la première étape de cette étude consiste-t-elle à voir comment le modèle de connaissance, *TransPore*, se comporte face aux champs de teneur en eau mesurés dans le chapitre II.

1.1 Confrontation de la version actuelle de *TransPore* avec les résultats expérimentaux

Les profils de teneur en eau mesurés dans la planche de 35 mm d'épaisseur, débitée sur quartier (chapitre II), ont été comparés à ceux prédits par le code. Bien qu'une portion de la section de cette planche soit de l'aubier, nous avons simulé son séchage à partir des propriétés propres à celles d'une planche de duramen. Aussi, l'humidité initiale de la planche est-elle supposée homogène dans toute la section (typiquement $X_{init} = 85\%$), et la perméabilité liquide (K_L) estimée à 10^{-16} m^2 [Comstock (1968), Agoua (2001)]. Enfin, les conditions de séchage mesurées au cours de l'essai ($T_{sèche}$, $T_{rosée}$) sont entrées dans le code *TransPore*.

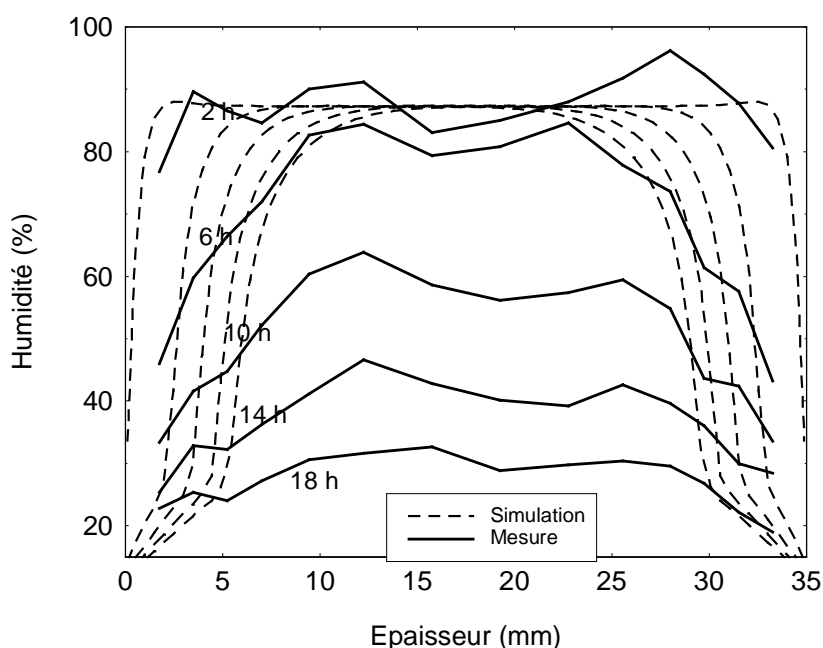


Figure IV.1. Confrontation des profils de teneur en eau simulés et mesurés. $K_L = 10^{-16} \text{ m}^2$, expression de k_{rl} issue de Perré et al. (1993).

Les profils de teneur en eau simulés pour cet essai sont très éloignés de ceux mesurés expérimentalement (Fig.IV.1). La migration liquide du centre de la planche vers la périphérie semble extrêmement lente, et par conséquent les profils d'humidité simulés adoptent la forme d'un séchage à front qui n'est pas observé expérimentalement. La vitesse de migration liquide dépend, entre autres, de la valeur de la perméabilité absolue définie pour les phases liquide et gazeuse (loi de Darcy généralisée Annexe IV.1). Leurs valeurs sont très variables pour une essence donnée [Comstock (1968), Agoua (2001)]. Aussi, cette variabilité importante justifie-t-elle la modification de la valeur de K_l dans la simulation suivante pour approcher les profils théoriques et expérimentaux. Notons que le gradient de pression totale de gaz intervient peu dans les transferts de masse lorsque les conditions restent en dessous du point d'ébullition de l'eau (notre cas). Ainsi, les valeurs de K_g et de k_{rg} n'interviennent pas dans ce travail.

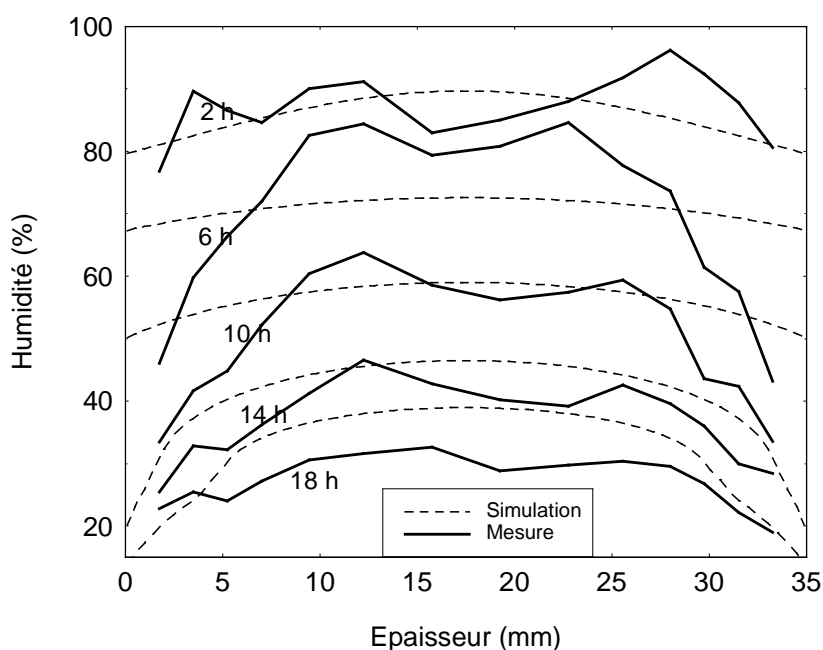


Figure IV.2. Confrontation des profils de teneur en eau simulés et mesurés. $K_L=2.10^{-14} m^2$, et expression de k_{rl} issue de Perré et al. (1993).

La figure IV.2 montre que l'augmentation de la perméabilité liquide à $2.10^{-14} m^2$ permet au code de simuler une cinétique de séchage plus proche de celle mesurée. Toutefois la confrontation est assez médiocre. Le code surévalue tout d'abord la teneur en eau à la surface de la planche, puis celle du cœur à partir du moment où la planche entre en seconde phase de séchage (après 10 heures de séchage). Pour des valeurs de K_l supérieures, les profils de teneur en eau théoriques s'aplatissent et s'éloignent de la forme des profils observés expérimentalement.

Ainsi, la modification de la perméabilité absolue liquide n'est pas suffisante pour simuler correctement le champ évolutif de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. Nous allons modifier l'expression de la perméabilité relative liquide (k_{rl}) (annexe IV.1), entrée dans le code *TransPore*, dont l'expression actuelle est celle de Perré *et al.* (1993) estimée à partir des travaux de Tesoro *et al.* (1972).

1.2 Évaluation d'une nouvelle expression de la perméabilité relative liquide

Devant l'infinité des expressions mathématiques possibles pour k_{rl} , une ligne directrice a été adoptée pour choisir une expression. Les conditions à satisfaire sont au nombre de cinq :

- ✓ (c₁) l'expression de k_{rl} est supposée être une fonction de l'état de saturation du bois [Perré *et al.* (1993)], c'est à dire $k_{rl} = fonction\left(\frac{X_l}{X_{lSat}}\right)$, avec avec X_l la teneur en eau libre telle que $X = X_l + X_b$, et X_{lSat} la teneur en eau libre lorsque les lumens des cellules sont saturés en eau ;
- ✓ (c₂) la fonction doit être continue et continûment dérivable sur l'ensemble du domaine de teneur en eau libre (conditions imposées par l'algorithme de Newton Raphson utilisé dans *TransPore*) ;
- ✓ (c₃) la valeur de K_l est fixée à une valeur de 5.10^{-16} m² [Comstock (1968), Agoua (2001)] ;
- ✓ (c₄) l'expression de k_{rl} entrée dans *TransPore* doit permettre au code de simuler la forme et l'évolution du profil de teneur en eau les plus proches possible de celles observées expérimentalement ;
- ✓ (c₅) les valeurs de k_{rl} devront être voisines de celles estimées par Perré *et al.* (1993) en dehors de l'intervalle de teneur en eau libre [0 - 0,7], car l'échantillon sur lequel est effectué ce travail a une humidité initiale faible, voisine de 90 %.

Notons que d'après la figure IV.1 la condition (c₃) ne peut être satisfaite qu'avec des valeurs de k_{rl} supérieures à celles de Perré *et al.* (1993) sur l'intervalle de teneur en eau libre [0 – 0,7].

Nous avons donc choisi d'utiliser une expression mathématique très flexible de la forme :

$$k_{rl} = k_1 \cdot \text{ArcTan} \left[a \cdot \left(\left(\frac{X_l}{X_{l\text{sat}}} \right) - b \right) \right] + k_2 \quad (-1)$$

où k_1 et k_2 sont des constantes fixées pour permettre à k_{rl} de varier entre 0 et 1 ($k_1 = -\text{ArcTan}(a \cdot b)$ et $k_2 = (\text{ArcTan}(a + a \cdot b) - \text{ArcTan}(a \cdot b))^{-1}$), a et b sont les valeurs à ajuster pour obtenir les conditions (c₄) et (c₅). b désigne le point d'inflexion de la courbe (Fig.IV.3-(a)) et a la pente (Fig.IV.3-(b)). Enfin, cette expression vérifie naturellement les conditions (c₁) et (c₂).

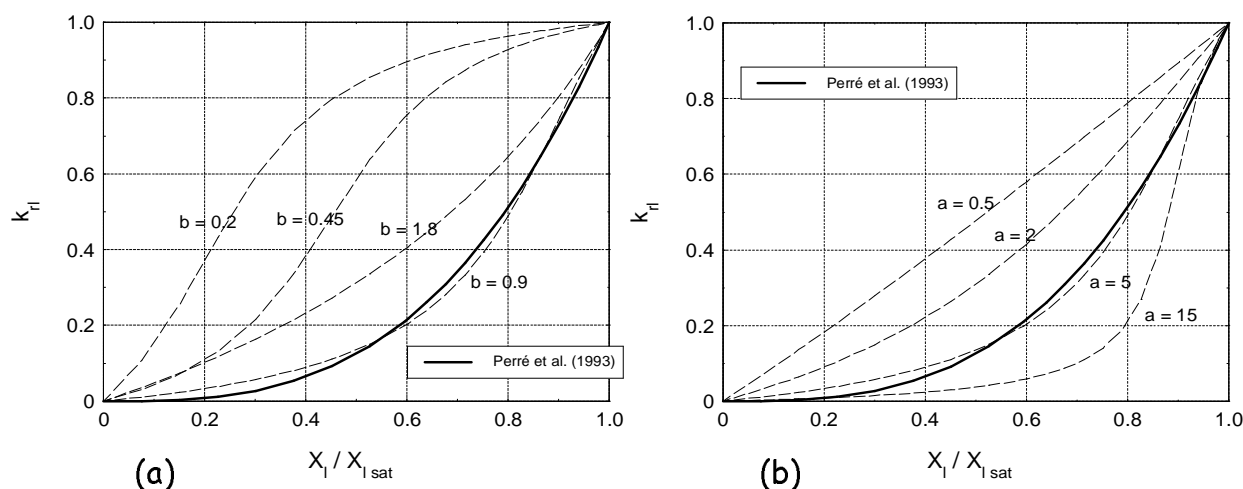


Figure IV.3. Représentation de l'expression 1 pour différentes valeurs de a et b . Sur la figure (a), $a=5$ et b est variable. Sur la figure (b), a est variable et $b=0.9$. L'expression de Perré et al. (1993) est également représentée.

Lorsque $a=5$ et $b=0.9$, les profils de teneurs en eau simulés sont proches de ceux obtenus expérimentalement (condition (c₄)) à la fois dans le domaine de l'eau libre (Fig. IV.4-(a)) et dans le domaine de l'eau liée (Fig. IV.4-(b)).

La largeur variable de la zone aubieuse suivant l'épaisseur de l'avivé (Fig.II.11) (non prise en compte dans la présente simulation) intervient certainement dans l'écart observé dans la partie centrale de la planche sur la figure IV.4-(a).

La pente du profil simulé au voisinage des surfaces d'échanges diminue lorsque la teneur en eau s'approche du point de saturation des fibres, ou encore lorsque k_{rl} tend vers 0 (Fig.IV.4-(a)). Malheureusement, nous n'avons pas de mesures au voisinage de la surface d'échange qui puissent confirmer ce comportement. Néanmoins, l'apparition très tardive de la seconde phase de séchage pour cette planche laisse présumer que les valeurs de k_{rl} sont surestimées dans les très basses

teneurs en eau libre (Fig.IV.5). Toutefois, il est possible que la partie aubieuse de cette planche, non prise en compte dans le code, soit l'origine de cette non concordance entre la théorie et la l'expérience.

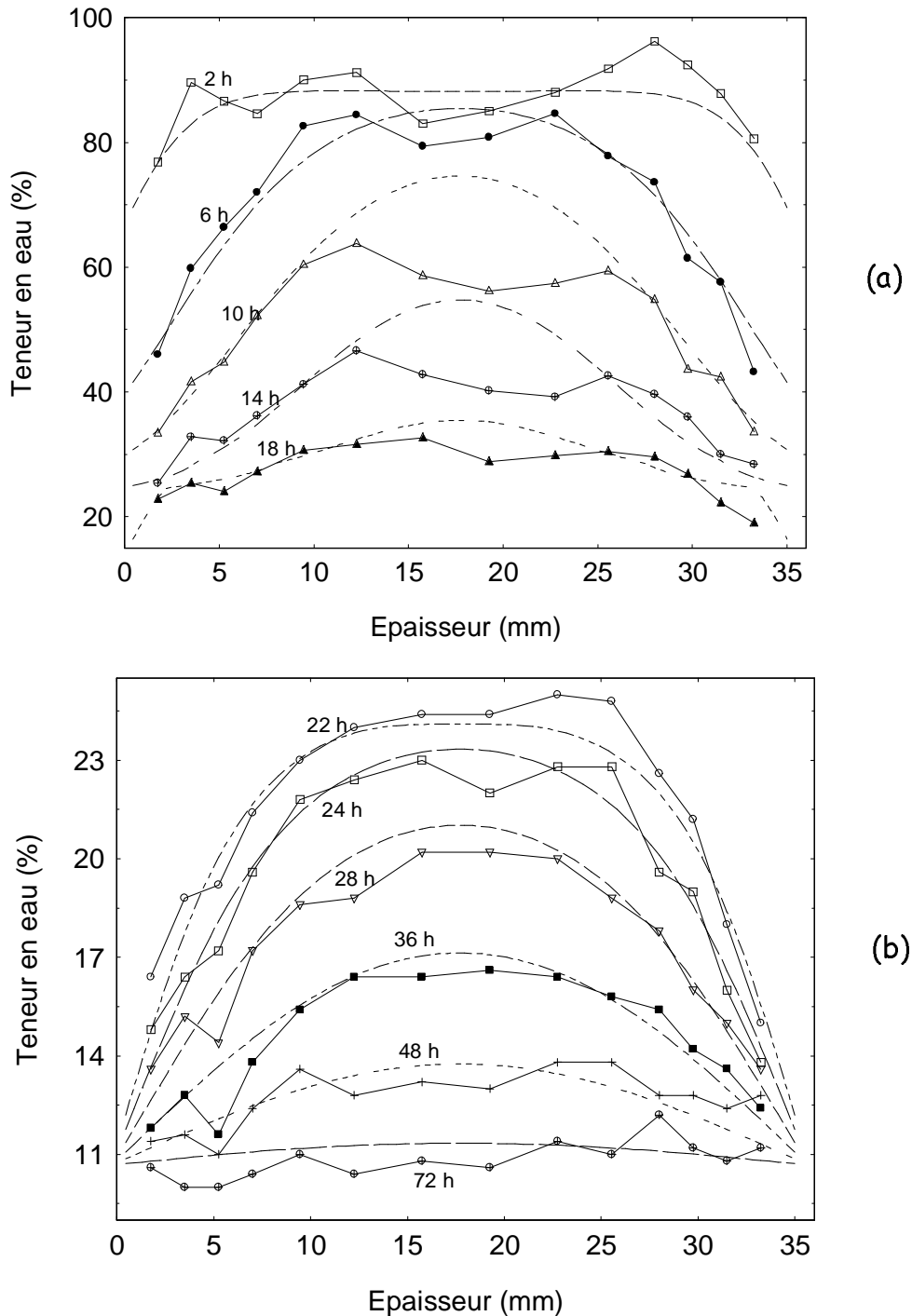


Figure IV.4.: Profils de teneur en eau simulés (traits en pointillés) et obtenus expérimentalement (traits continus). Les 20 premières heures de séchage (a), et les suivantes (b) .

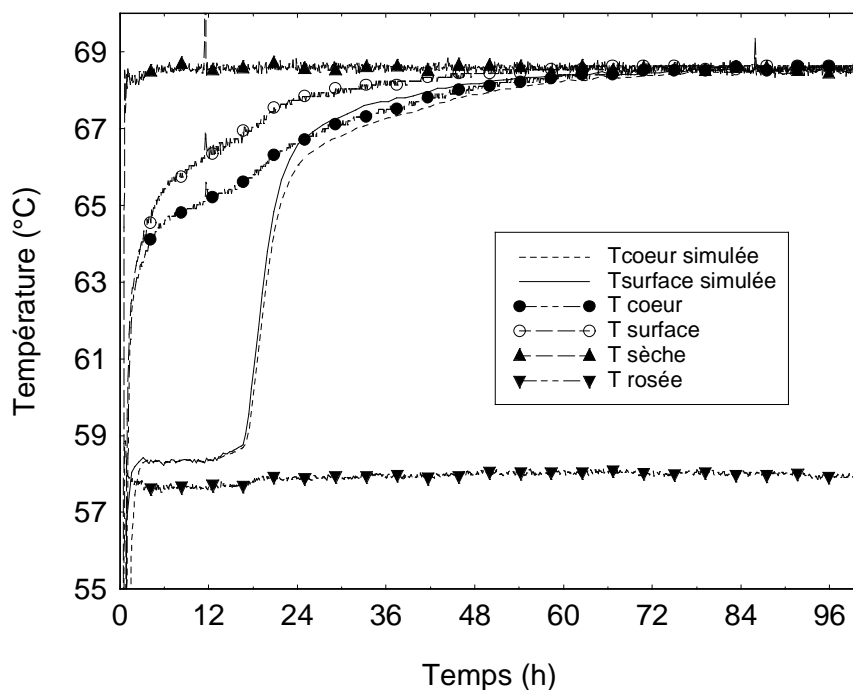


Figure IV.5. Évolution temporelle des températures simulée et expérimentale.

1.3 Validation de cette nouvelle expression

Dans le but de valider cette nouvelle expression de k_{r1} , les prédictions du code sont confrontées avec les résultats de l'essai décrit dans le paragraphe II.1.3.2.b (planche débitée sur dosse). L'absence d'interaction, constatée au niveau expérimental, entre l'aubier et le duramen nous permet de simuler le séchage de cette planche en considérant séparément le séchage de la partie composée d'aubier, et le séchage de la partie composée de duramen, d'épaisseur respective 16 mm et 19 mm. Chacune de ces parties de planche est simulée avec une face d'échange étanche aux transferts de masse pour tenir compte de la frontière aubier/duramen observée sur les profils mesurés. Notons que sans cette hypothèse, le code simule une migration importante d'eau libre entre la partie aubieuse et le duramen de la planche, malgré la prise en compte des propriétés de transfert propres à chacune de ces deux zones (K_I , $X_{initiale}$).

Le code *TransPore*, munit de sa nouvelle expression de k_{r1} , simule des champs de teneur en eau théoriques proches de ceux mesurés pour la partie de la planche dans le duramen (Fig.IV.6-(a)). La similitude se situe autant sur la forme que sur l'évolution temporelle des profils. En revanche, la confrontation des profils d'humidité dans l'aubier est très mauvaise (Fig.IV.6-(b)). Cette différence suscite deux explications possibles. La première est la perturbation apportée par la zone de

transition aubier/duramen, épaisse de 4 mm, (cercle en trait gras sur la figure IV.6-(b)) sur les transferts de masse. La seconde explication pourrait être une expression inadaptée de k_{r1} dans la gamme des fortes teneurs en eau libre.

Toutefois, faute de pouvoir s'approcher d'avantage du comportement observé, l'expression évaluée de k_{r1} a été utilisée dans la suite de ce travail.

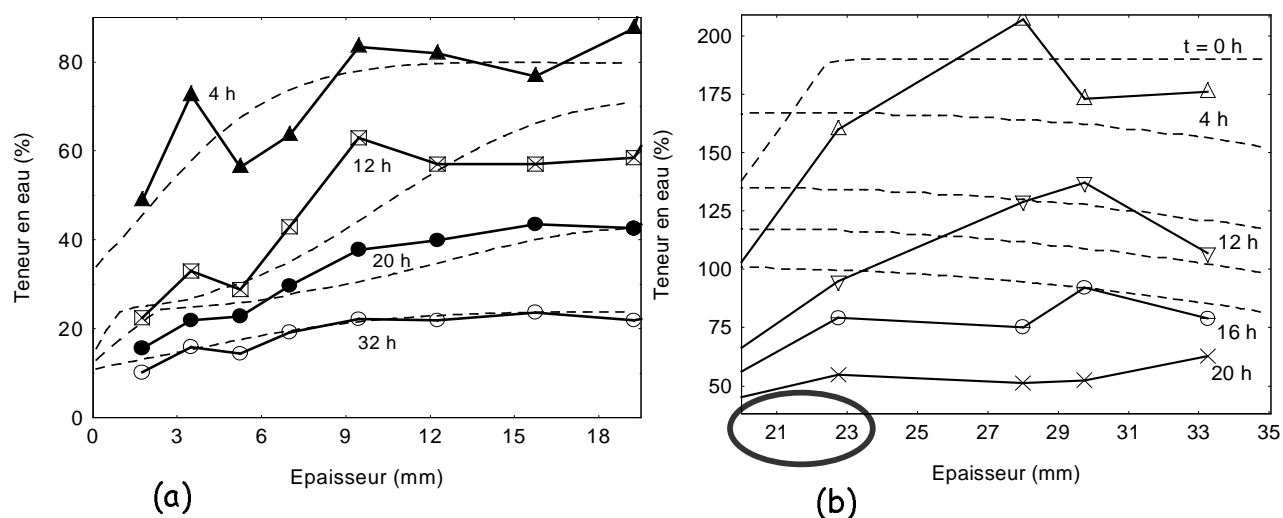


Figure IV.6. Profils d'humidité simulés (traits pointillés) et expérimentaux (traits continus) dans la partie de la planche composée de duramen (a), et dans la partie composée d'aubier (b). Le cercle en trait gras situe la zone de transition aubier/duramen.

2 Confrontation des résultats simulés et mesurés pour deux épaisseurs usuelles

Avant de pouvoir utiliser le code *TransPore* pour répondre aux objectifs de ce travail, son aspect prédictif doit être étudié. Aussi, de nouveaux essais ont-ils été réalisés, à l'aide du dispositif expérimental du site ENSTIB (partie II.2) afin de confronter les résultats théoriques et expérimentaux.

2.1 Le matériel végétal et les conditions de séchage

2.1.1 Le matériel végétal

Dans le but de limiter la perturbation introduite par la variabilité du bois sur les résultats, un plan de découpe rigoureux a été effectué (Fig.IV.7). Tous les échantillons sont issus du même épicéa (*Picea abies*) de 600 mm de diamètre, prélevé dans une futaie jardinée en Alsace à 500 m d'altitude. Quatre planches sont prélevées dans un plot, suivant la même génératrice afin que les propriétés soient similaires. Nous noterons cependant que les planches prélevées dans la partie basse de la grume présentaient une humidité beaucoup plus importante.

Les planches sont débitées sur dosse ou sur quartier (Annexe IV.2), puis corroyées aux dimensions de 41 x 170 x 700 mm³ ou 20 x 170 x 700 mm³. L'utilisation de pièces de faible épaisseur nous a permis, d'une part de limiter à quelques jours la durée des essais et, d'autre part, de travailler sur des débits parfaitement orientés (dosse, quartier, aubier, etc.). Enfin, il existe des données quantitatives et qualitatives abondantes sur le séchage industriel de ces sections de bois. Leur largeur est importante par rapport à leur épaisseur pour être conforme aux hypothèses du modèle 1-D (transferts monodimensionnels, contraintes de cisaillements négligeables). Enfin, pour approcher le comportement de planches de grande longueur, les extrémités des pièces ont été recouvertes d'une colle polyuréthane pour empêcher les transferts longitudinaux.

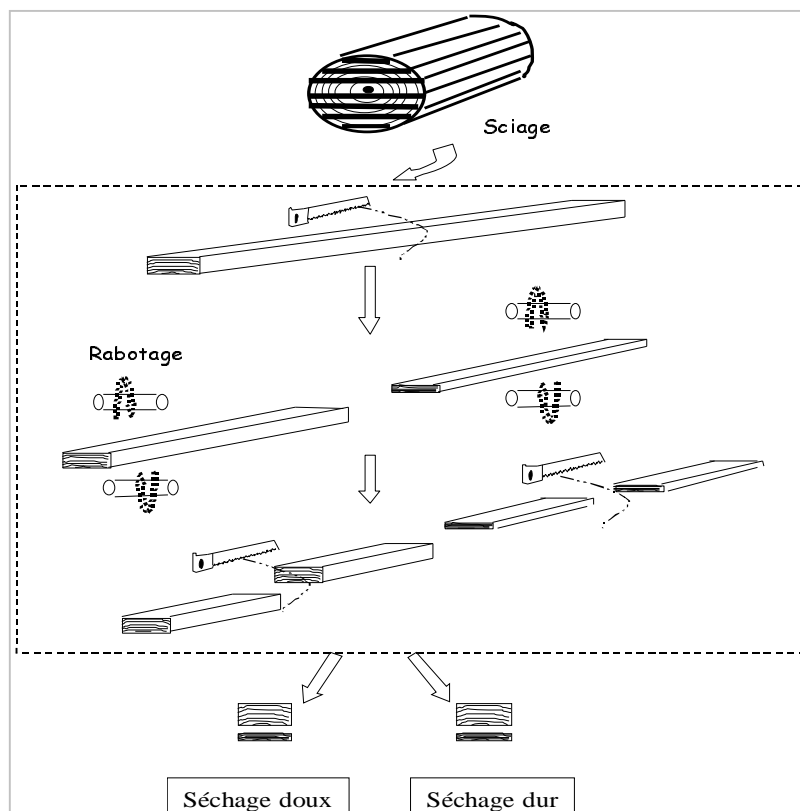


Figure IV.7. Plan de découpe de la grume.

2.1.2 La conduite du séchage

Après une montée en température d'une durée d'environ 1 heure, les planches ont été soumises à différentes conduites (Tableau IV.1&2) déroulées par rapport au temps. Le cycle est arrêté lorsque l'humidité moyenne de la planche épaisse atteint 11 %. La phase d'équilibrage est absente à la fin du cycle afin de conserver l'histoire des contraintes dues au séchage. Ces contraintes sont quantifiées par la méthode du *Slicing test* présentée dans la partie II.2.2 et l'annexe II.3. La vitesse de l'air a été maintenue constante à 1,2 m/s durant tout le processus.

Tableau IV-1. Séchage sévère

Temps de séchage (h)	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Température humide (°C)	Humidité d'équilibre (%)
24	65.5	65	56.3	9.4
$X_{\text{coeur}} = 11 \%$	70.5	55	58.2	7.4

Tableau IV-2. Séchage doux

Temps de séchage (h)	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Température humide (°C)	Humidité d'équilibre (%)
48	65.5	80	60.9	13.2
72	70.5	77	64.9	11.7
96	70.5	70	63.2	10
$X_{\text{coeur}} = 11 \%$	70.5	55	58.2	7.4

2.2 Confrontation des résultats expérimentaux et simulés

L'essai présenté dans la partie II.2.3, au cours duquel une fente de surface a été observée, est utilisé pour cette confrontation. Cet essai est qualifié, par la suite, de conduite *très sévère*.

2.2.1 Valeurs des paramètres physiques entrés dans le code

Les conditions de séchage réellement « vues » par la planche au niveau expérimental (la température sèche (T_s) et l'humidité relative (HR) mesurées) sont entrées dans le code. La vitesse de l'air détermine la valeur des coefficients de transferts externes de chaleur et de masse ($h = 15 \text{ W/m}^2/\text{°C}$, $h_m = 0,015 \text{ m/s}$ pour $V_{\text{air}}=1,2 \text{ m/s}$; et $h = 30 \text{ W/m}^2/\text{°C}$, $h_m = 0,030 \text{ m/s}$ pour $V_{\text{air}}=2,5 \text{ m/s}$).

La plupart des grandeurs introduites dans les équations du modèle ont une valeur variable d'un arbre à un autre et également au sein d'un même arbre. Certaines ont été mesurées sur nos échantillons (Tableau IV.3), d'autres sont approchées par une valeur moyenne propre à l'essence (modules de Young, coefficients de Poisson, complaisance viscoélastique, porosité, etc.), d'autres encore (la perméabilité intrinsèque liquide et la résistance à la diffusion) sont ajustées pour chacune des planches de manière à ce que les évolutions des humidités moyennes expérimentales et simulées soient proches. Ces dernières valeurs se situent dans la gamme des mesures de Agoua (2001) obtenues avec des échantillons d'épicéa sec à l'air. Elles sont présentées dans le tableau IV.4.

Tableau IV-3. Teneurs en eau initiale et finale, retrait et infra-densité des planches d'épicéa débitées sur quartier (Q) et sur dosse (D) de 41 mm et de 20 mm d'épaisseur.

Conditions de séchage	Douce				sévères				très sévères	
	D41	D20	Q41	Q20	D41	D20	Q41	Q20	D41	D20
Planches										
$X_{\text{initiale}} (\%)$	93.1	100.1	71.3	152.3	50.4	83	66.6	93.2	56.5	44.6
$X_{\text{Finale}} (\%)$	10.7	8.2	10.8	8.8	8.9	8.1	9.8	8.1	10.5	4.9
Infradensité (kg/m^3)	331	356.2	328	319.4	342	357.4	335	367	309	--
$R_R (\%)$	4.2	--	3.6	--	4.2	--	3.7	--	3.4	--
$R_T (\%)$	11	--	8	--	12.4	--	9.5	--	9.3	--

Tableau IV-4. Valeurs de paramètres retenues pour simuler les transferts de masse dans chacune des planches étudiées.

Conditions de séchage	Douce				sévères				très sévères	
	D41	D20	Q41	Q20	D41	D20	Q41	Q20	D41	D20
Planches										
$K_l (\text{m}^2) (\times 10^{-16})$	0.3	0.4	0.65	0.32	0.6	0.2	1.3	0.45	1.5	1.5
Diffusivité réduite (*)	0.018	0.018	0.004	0.003	0.01	0.01	0.006	0.003	0.01	0.008

(*) La diffusivité réduite compare la résistance qu'oppose le bois à la diffusion de la vapeur, par rapport à celle d'une lame d'air de même épaisseur ($f = D_{V\text{Bois}}/D_{V\text{Air}}$).

Rappelons que les conditions des séchages mesurées et entrées dans le code *TransPore*, sont supposées être identiques sur les deux surfaces d'échange de la planche. Le séchage de la planche est alors symétrique et la simulation peut-être effectuée en ne considérant que le séchage d'une demi-épaisseur de planche. Les conditions aux limites sont modifiées de telle sorte que les transferts externes sur l'une des faces d'échange soient inexistantes et que la courbure de la planche soit bloquée.

Enfin, pour simuler la libération des contraintes apparaissant après la coupe de la section de planche en deux (méthode du *Slicing Test*), les conditions aux limites entrées dans le code sont modifiées :

- ✓ la courbure de la demi-section est libérée afin qu'elle puisse intervenir dans l'équilibre mécanique ;
- ✓ les transferts externes de chaleur sont maintenus très faibles sur les deux faces de l'échantillon ;

- ✓ les transferts externes de masse sont supprimés pour approcher le comportement de l'échantillon lorsqu'il est placé dans le récipient étanche ;
- ✓ la température externe est maintenue à une valeur basse (20 °C).

À partir du rayon de courbure simulée, il est possible de déduire la flèche que l'on devrait obtenir. Le coefficient mécanosorptif (m) et la limite mécanosorptive (Ems) tangentielle ont été ajustés de manière à réduire l'écart entre la flèche simulée et celle obtenue dans l'essai aux conditions très sévères (Partie II.2.3). Les valeurs retenues de m et Ems , pour les simulations futures, sont respectivement de $8 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ et de $5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ (direction tangentielle).

Nous noterons que la valeur de m choisie conduit à obtenir un niveau de contraintes résiduelles maximales pour Ems fixé à $5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$. En effet, une valeur de m inférieure réduit les déformations mécanosorptives, amenant les contraintes à être plus grandes au début du séchage, mais plus faibles à la fin. En revanche, lorsque la valeur de m est supérieure à celle retenue, la déformation mécanosorptive du cœur évolue en sens inverse très rapidement après l'inversion des contraintes, afin d'approcher la déformation mécanosorptive figée de la couche périphérique. Le champ de la déformation mémoire dans l'épaisseur est ainsi plus homogène, et les contraintes résiduelles très faibles.

2.2.2 Comportement du code *TransPore* vis-à-vis des transferts

- Évolution de la température

Les planches étudiées dans cette confrontation ont une épaisseur de 41 mm, elles sont débitées sur dosse (Fig.IV.8-(a)) ou sur quartier (Fig.IV.8-(b)), et soumises aux conditions douces. Seules ces deux confrontations sont présentées car elles sont représentatives des résultats obtenus pour les autres tests.

Pour le débit sur dosse, la température de surface simulée est très proche de celle mesurée (écart moyen $< 0,5 \text{ °C}$), durant l'ensemble du séchage (Fig.IV.8-(a)). Ce résultat est plutôt encourageant quant à la justesse de l'expression de k_{rl} , évaluée dans la partie IV.1.

Il n'en est pas de même pour la planche débitée sur quartier (Fig.IV.8-(b)), pour laquelle *TransPore* semble surestimer le flux interne de vapeur au début du séchage (couplage des transferts de masse et de chaleur). L'origine de cet écart peut provenir d'une erreur dans l'estimation des paramètres de

transfert de cette planche (perméabilité liquide K_l , résistance à la diffusion) (Tab.IV.4). En effet, le séchage de la planche par ses faces latérales accélère la cinétique du séchage, et nous amène à surestimer les valeurs de K_l et de la résistance à la diffusion pour approcher, par la version monodimensionnelle de *TransPore*, l'évolution de la teneur en eau théorique de celle mesurée. Il est également possible qu'une fine couche sèche se soit formée, au début du séchage, à la périphérie de la planche, ralentissant les transferts de masse, diminuant la chaleur concédée à l'évaporation et augmentant la chaleur sensible du bois. Celle-ci n'est actuellement pas accessible par la formulation macroscopique entrée dans *TransPore*, malgré nos tentatives avec un maillage extrêmement fin au niveau de l'interface. L'existence de cette couche sèche échappe donc à la formulation macroscopique [Rémond *et al.* (2005)].

La température des couches plus profondes est surestimée par le code numérique dans l'ensemble des essais. Nous pensons que cet écart pourrait provenir d'une sous-estimation du flux continu de vapeur à l'échelle cellulaire. En effet, le coefficient de diffusion efficace mesurée par Agoua (2001) ou Kouhadé (2004) à l'échelle macroscopique est une mesure globale qui intègre :

- ✓ la diffusion de la vapeur d'eau qui suit un chemin continu dans les lumens interconnectés du bois depuis le lieu de vaporisation jusqu'à la surface de la planche ;
- ✓ la diffusion de l'eau liée qui progresse dans la paroi cellulaire, s'évapore, migre sous forme vapeur dans le lumen, puis se condense sur la paroi suivante, et ainsi de suite.

L'importance relative de ces deux flux, dans les transferts de masse du bois, est difficilement mesurable. Dans le premier cas, les sites d'évaporation (transformation endothermique) ne sont pas répartis de façon homogène dans l'épaisseur de la planche. Ils interviennent alors dans les équilibres énergétiques locaux et modifient le gradient de température. Ainsi, plus le matériau est perméable à la vapeur d'eau (résistance à la diffusion faible), plus le gradient de température dans l'épaisseur est important. Au contraire, dans le deuxième cas, chaque paroi cellulaire est le siège d'une évaporation sur l'une de ses faces et d'une condensation sur l'autre. Les effets énergétiques de ces transformations se compensent.

Une autre explication possible de cet écart de température à cœur, pourrait être une différence de conditions de séchage sur les deux surfaces d'échange de l'échantillon (séchage dissymétrique). Le gradient de température dans chacune des deux parties symétriques de la planche serait alors

différent, et la température à cœur sera modifiée par rapport à celle d'un séchage symétrique (hypothèse du code).

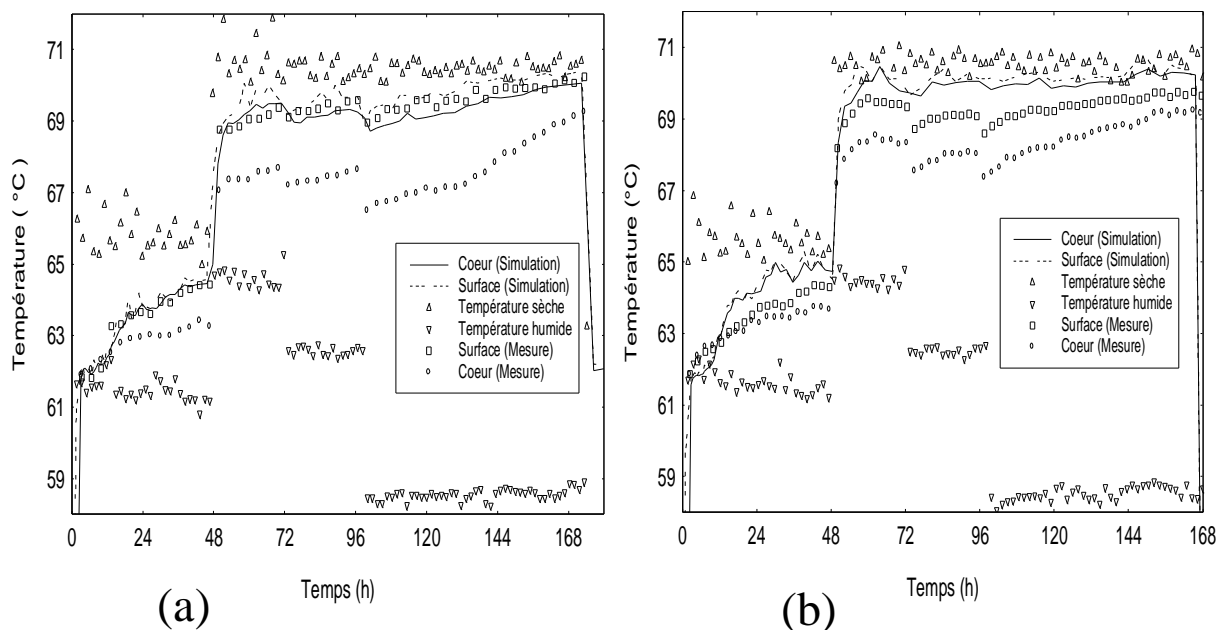


Figure IV.8. Évolution des températures simulée et expérimentale pour une planche de 41 mm d'épaisseur, soumise à un séchage doux et débitée sur dosse (a), sur quartier (b).

- Évolution de l'épaisseur de la planche

Dans l'ensemble des essais, le capteur de déplacement détecte un retrait significatif dès le début du séchage (exemples sur la figure IV.9), et cela même si l'échantillon a une humidité initiale très élevée. A l'heure actuelle, ce comportement initial, non restitué par *TransPore*, suscite plusieurs explications possibles :

- ✓ la dilatation thermique du montage est mesurée par le capteur comme une réduction de l'épaisseur de la planche ;
- ✓ la température de la planche augmente et active le comportement viscoélastique du matériau qui pourrait conduire la tige du capteur à pénétrer dans le bois ;
- ✓ une fine couche sèche se forme à la périphérie du matériau sur quelques dixièmes de millimètres.

Toutefois, sans ce décalage initial, les valeurs prédites sont en très bon accord avec l'expérience.

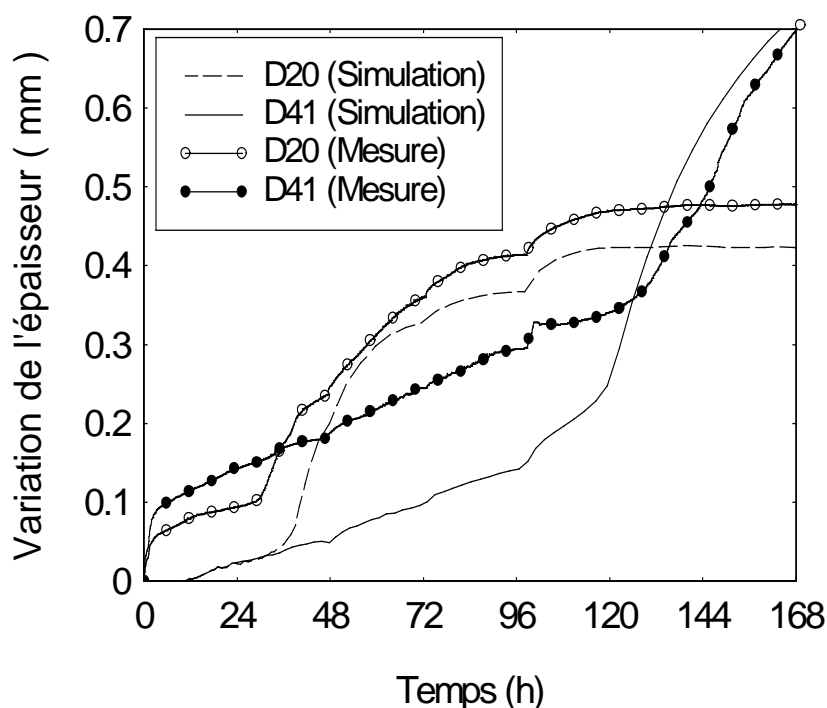


Figure IV.9. Variation des épaisseurs simulée et expérimentale pour les planches de 41 mm et 20 mm d'épaisseur débitées sur dosse. Les planches sont soumises à un séchage doux.

- Gradient final d'humidité dans l'épaisseur

Le gradient d'humidité final varie selon les conditions appliquées, le temps de séchage, le débit et l'épaisseur de la planche. Malgré ces paramètres d'influence, le gradient d'humidité simulé est très proche de celui mesuré (Fig.IV.10). L'écart d'humidité moyenne observée entre la théorie et l'expérience, notamment pour les débits sur quartier, provient vraisemblablement d'une erreur d'estimation des valeurs de la perméabilité liquide (K_l) et de la diffusivité réduite (problème déjà évoqué au niveau de l'évolution de la température théorique). Les différences qui subsistent peuvent avoir d'autres origines (liste non exhaustive) :

- ✓ l'hypothèse de conditions identiques de part et d'autre de la planche conduit le gradient d'humidité théorique à être symétrique ;
- ✓ un gradient d'humidité suivant la largeur de la planche existe sur les échantillons mesurés, ce qui nous éloigne de l'hypothèse des transferts monodimensionnels du code ;
- ✓ le frottement de la lame de scie à ruban chauffe les lamelles et provoque un séchage local, donc une erreur sur l'évaluation du profil d'humidité.

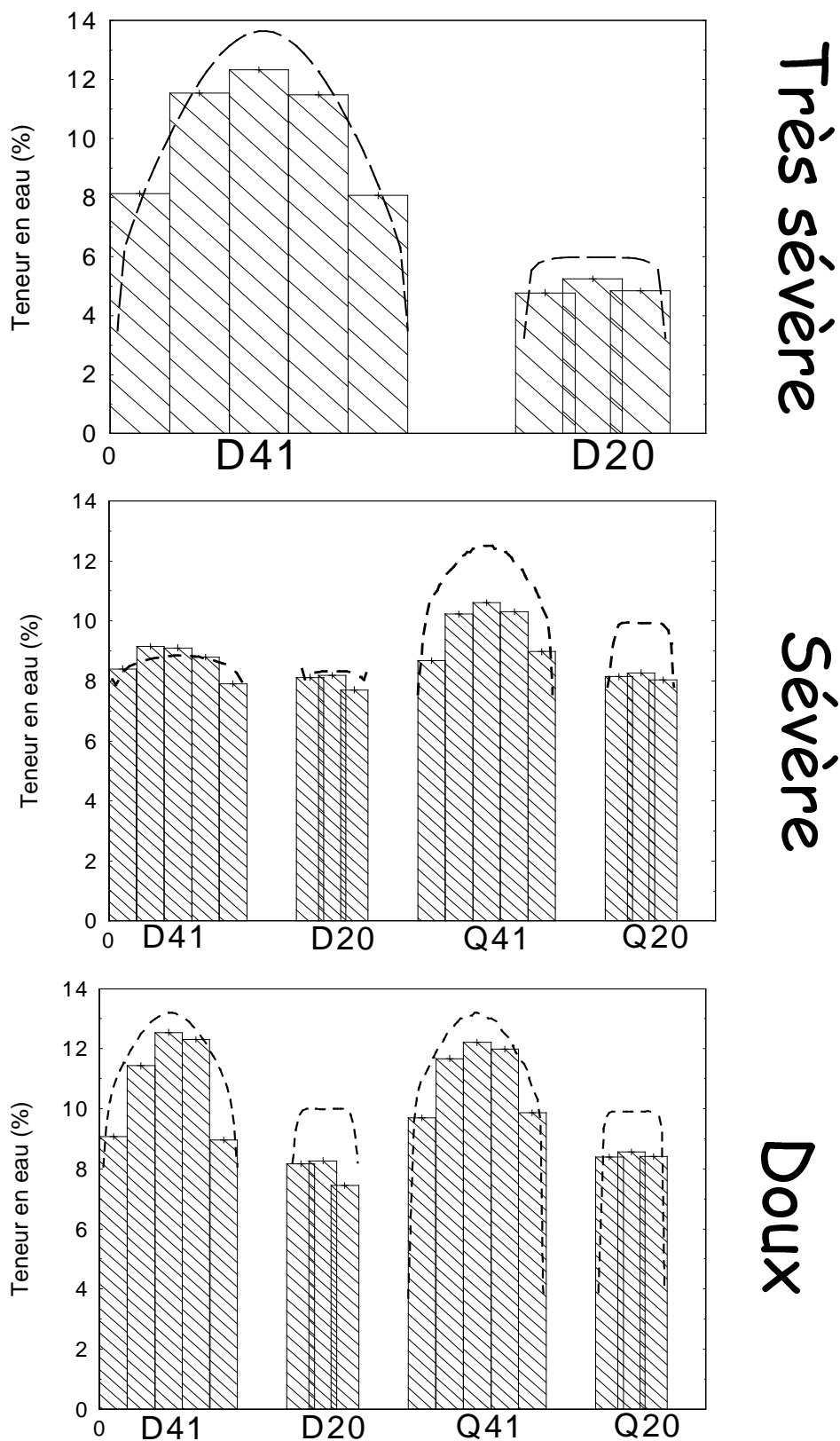


Figure IV.10. Gradient d'humidité final, expérimental (histogramme) et simulé (trait pointillé).

2.2.3 Comportement du code vis à vis de la mécanique

- Évolution des contraintes internes

La figure IV.11 présente les profils simulés de contraintes et de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche sur laquelle a été observée la fente de surface (paragraphe II.2.2).

Entre 3 heures et 12 heures de séchage, les points se situant entre la surface et 1 mm de profondeur atteignent successivement leur traction maximale (Fig.IV.12-(a)). Durant cette période aucune fente n'a été observée au niveau expérimental (Fig.IV.12-(b)). Toutefois, après 5 heures de séchage, la fluctuation des conditions externes amène la surface à être temporairement en compression (Fig.IV.12-(a)). Aussi, une fente de largeur plus faible que la résolution de nos images, a-t-elle pu s'initier à la surface de la planche, s'être refermée après 5 heures et s'ouvrir à nouveau après 12 heures de séchage. Il est également possible que cette fente se soit initiée plutôt à l'une des extrémités de la planche, et n'apparaisse que plus tard sous l'objectif de notre dispositif. À 12 heures de séchage, la couche périphérique de la planche est en traction sur les cinq premiers millimètres de son épaisseur, et la contrainte est maximale à 1 mm de profondeur. À cet instant, une fente apparaît brusquement au niveau expérimental (Fig.IV.12-(b)). Durant les 24 premières heures de séchage, la couche périphérique est en traction (Fig.IV.11&12-(a)) et la fente s'élargit (Fig.IV.12-(b)). Puis, l'inversion des contraintes conduit la surface à être en compression, et la fente commence à se refermer (Fig.IV.12-(b)). Elle disparaît visuellement après 50 heures de séchage (Fig.IV.12-(b)), au moment où toutes les couches relaxées par la fente (ici, les 5 premiers millimètres) sont comprimées (Fig.IV.12-(a)).

Il est également fort intéressant de noter que la contrainte théorique au niveau de la surface reste au voisinage de zéro à partir de 8 heures de séchage (Fig.IV.12-(a)). En effet, la fluctuation des conditions extérieures s'accompagne d'une fluctuation de la teneur en eau à la surface de la planche (Fig.IV.13) qui active la mécanosorption, et relaxe les contraintes résiduelles de séchage à la surface (Fig.IV.12-(a)).

Par conséquent, il existe une très bonne adéquation entre les contraintes internes simulées et leur manifestation externe observée avec notre dispositif expérimental.

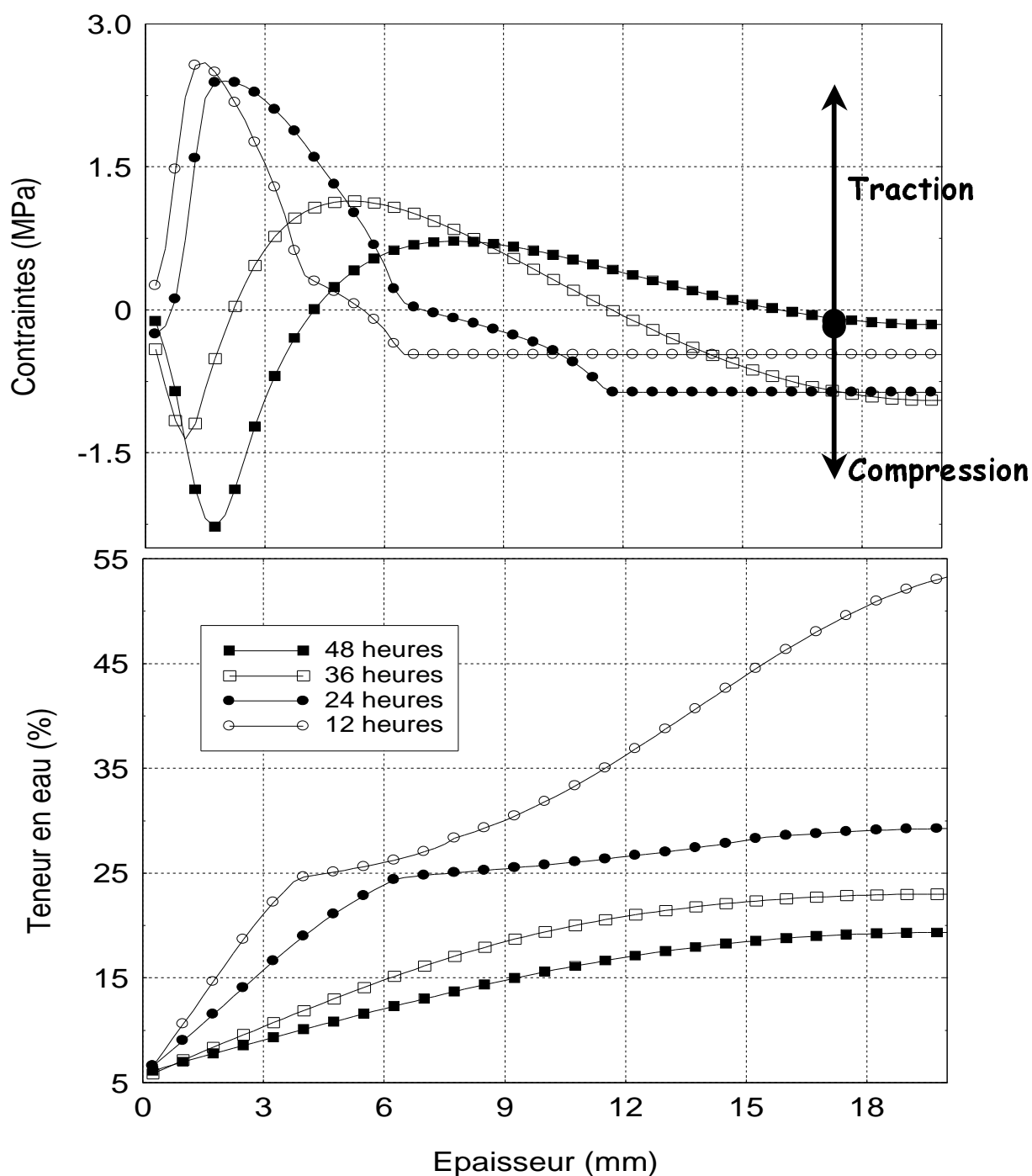


Figure IV.11. Profil des contraintes (au-dessus) et de la teneur en eau (en dessous) simulés par le code dans la demi-épaisseur de la planche. Séchage très sévère.

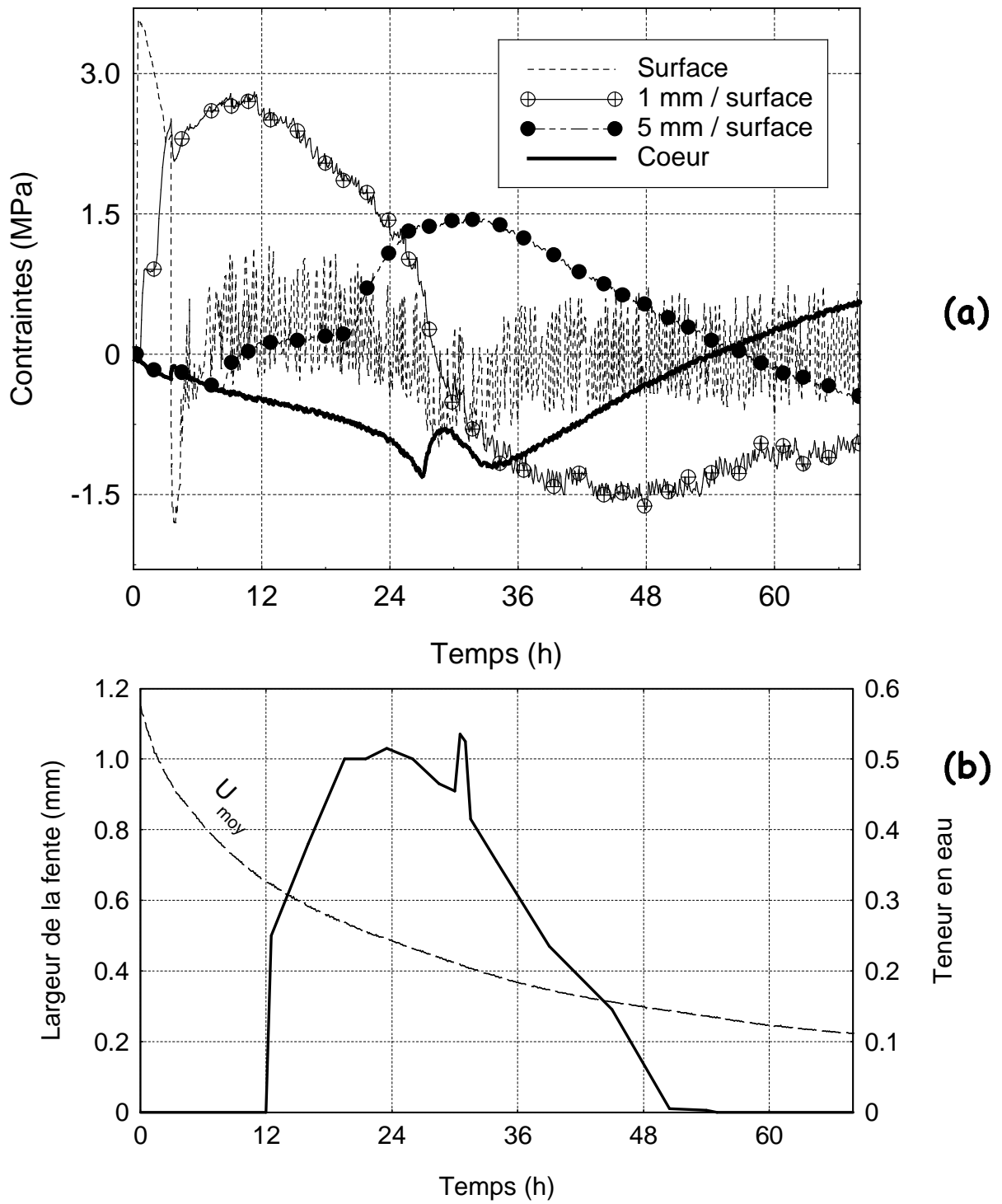


Figure IV.12. (a) Évolution temporelle des contraintes de séchage calculées par le code ; (b) évolution de la largeur de la fente observé sur la planche au niveau expérimental.

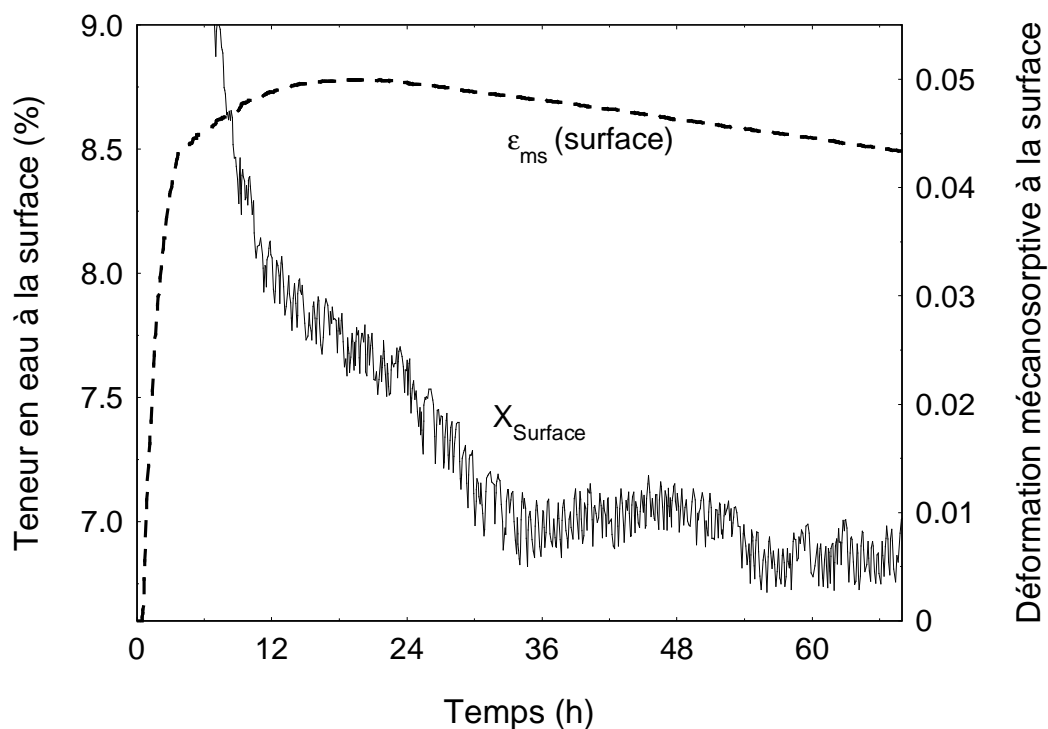


Figure IV.13. Teneur en eau simulée à la surface de la planche variant avec la fluctuation des conditions externes expérimentales entrées dans le code. Également représentée, l'évolution de la déformation mécanosorptive simulée.

- Histoire des contraintes vues par la planche

La figure IV.14 montre les sections des planches, de teneur en eau homogène, coupées selon la méthode du « Slicing test». La déformation observée est une libération des contraintes résiduelles subsistant dans la planche à la fin du séchage. Aussi, la flèche mesurée quantifie-t-elle de façon relative l'histoire des contraintes vue par la planche. La figure IV.15 montre que le code *TransPore* est capable de prédire l'histoire des contraintes vue par le matériau lorsque :

- ✓ l'épaisseur de la planche varie. Les flèches simulée et expérimentale sont en effet plus grandes lorsque l'épaisseur de la planche augmente ;
- ✓ les conditions de séchage sont différentes. Les courbures de la demi-section théorique et mesurée augmentent avec la sévérité des conditions ;
- ✓ le mode de débit varie. A épaisseur égale, les planches débitées sur dosse présentent des flèches plus importantes que celles débitées sur quartier ;

- ✓ l'humidité initiale de la planche est différente. Malgré un séchage doux, la planche débitée sur dosse *D41* présente une flèche plus importante que sa planche « jumelle » séchée avec une table plus sévère.

En revanche, dans l'ensemble des essais, la flèche théorique est très inférieure à celle qui est mesurée. De plus, leurs écarts relatifs pour deux épaisseurs de planche, ou deux types de conduite de séchage, diffèrent. Plusieurs explications sont possibles :

- ✓ les valeurs moyennes des grandeurs phénoménologiques alimentant le modèle mécanique peuvent-être inadaptées à nos échantillons en raison de la variabilité inter et intra-arbre ;
- ✓ l'existence d'un couplage entre les propriétés viscoélastiques et mécanosorptives du bois, actuellement non pris en compte par le code, empêcherait la recouvrance de la déformation viscoélastique à la fin du séchage. Les déformations mémoires seraient alors très hétérogènes dans la section et des contraintes importantes persisteraient après le séchage. Ces dernières se manifesteraient par une flèche du *slicing test* plus élevée que dans la cas présenté ;
- ✓ les débits des planches ne sont pas parfaitement sur dosse ou sur quartier (Fig.IV.14) comme le supposent les paramètres entrés dans le modèle. L'anisotropie du retrait dans la section de la planche modifie la courbure des demi-sections et la valeur de la flèche expérimentale ;
- ✓ la surestimation de la teneur en eau libre théorique au voisinage des surfaces d'échange (expression de k_{rl} , paragraphe IV.1) conduit le gradient d'humidité dans la planche à être plus faible, et il en est de même pour les contraintes internes. L'histoire des contraintes théoriques sera par conséquent inférieure à la réalité, lorsque la teneur en eau initiale de la planche est élevée.

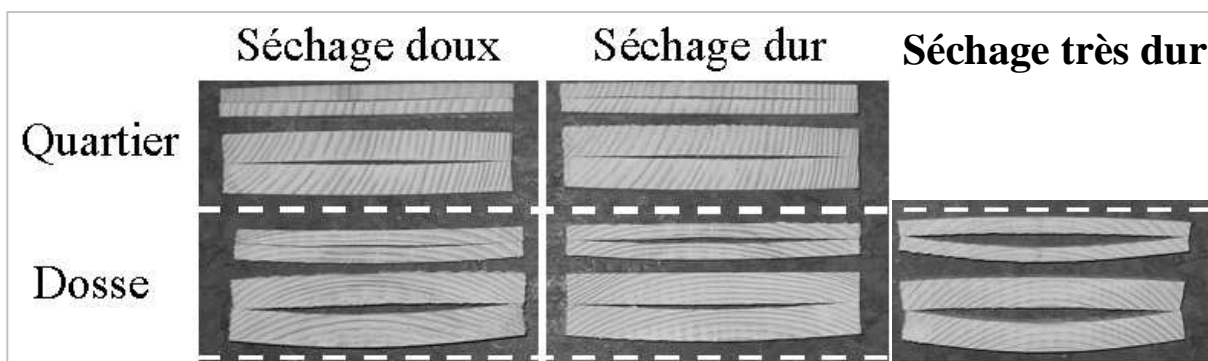


Figure IV.14. Sections des planches coupées selon la méthode du « Slicing test »

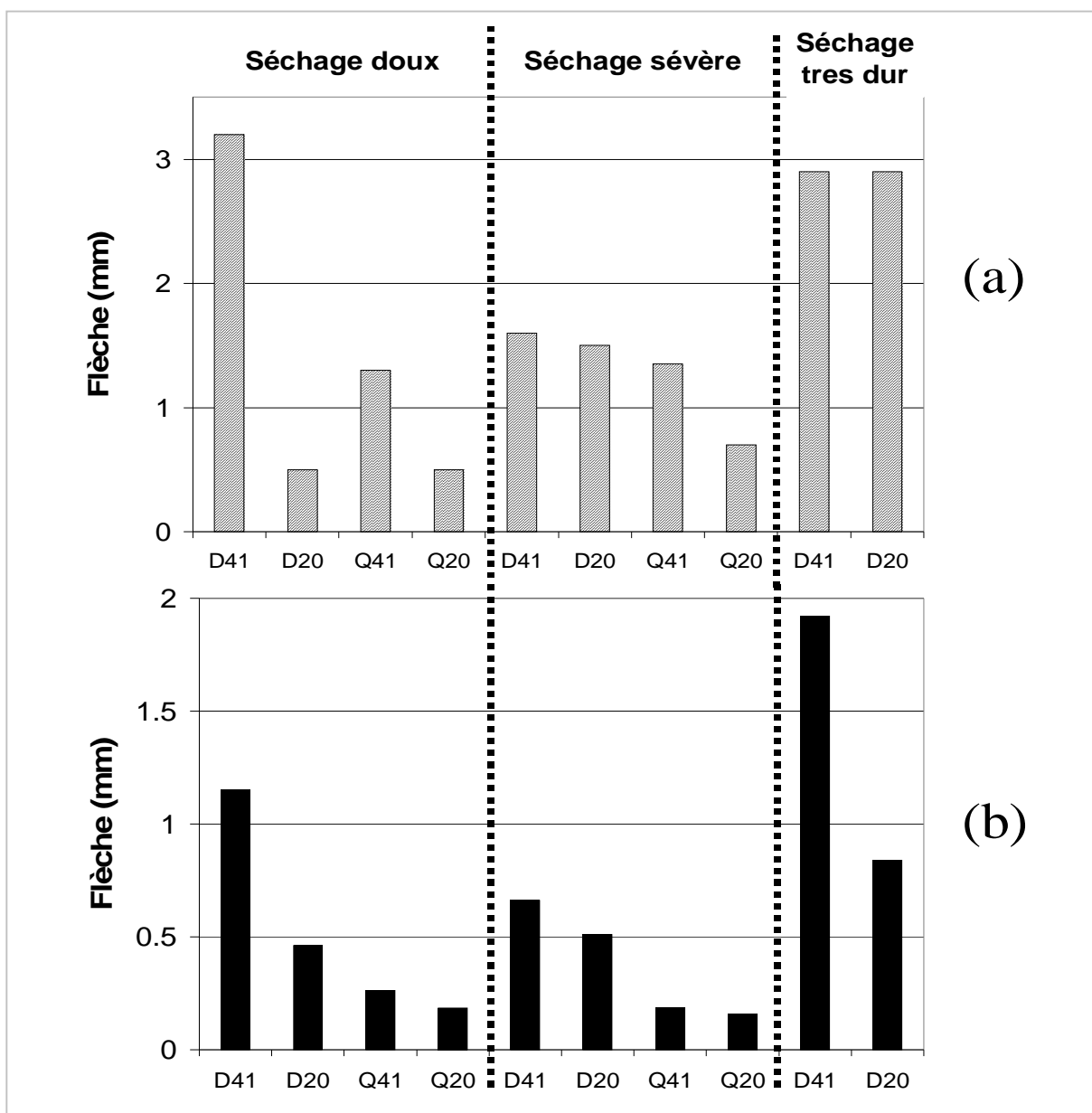


Figure IV.15. Flèches mesurées (a) et simulées par le code (b) 8 jours après la coupe réalisée à la fin du séchage selon une méthode classique présentée dans l'annexe II.2.

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, la comparaison des champs d'humidité mesurés (paragraphe II.1, dispositif du site ENGREF) et théoriques s'est avéré médiocre. C'est pourquoi, le code *TransPore 1 D* a été utilisé pour évaluer une nouvelle expression de la perméabilité relative liquide, à partir des champs de teneur en eau mesurés sur un avivé. Fort de cette expression, le code a été confronté et validé sur un autre essai expérimental dans la gamme des faibles teneur en eau libre (typiquement une planche de duramen). Il a été constaté que la simulation s'écarte du comportement observé dans les très faibles teneurs en eau libre, ce qui conduit le code à prolonger la première phase de séchage de la planche. Cette nouvelle expression de k_{rl} , apporte une amélioration dans les prédictions du code et a été utilisée dans la suite de ce travail.

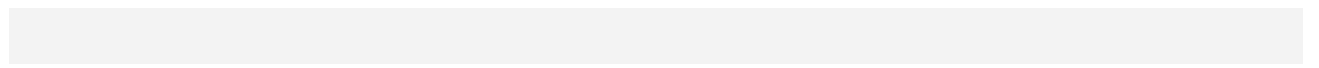
Dans la seconde partie de ce chapitre, les simulations du code ont été confrontées aux mesures obtenues par le dispositif décrit dans la partie II.2 (dispositif du site ENSTIB). Deux épaisseurs usuelles de planches ont été utilisées dans ces essais et ont été soumises à des conditions de séchage plus ou moins sévères. Les conditions de séchage réelles subies par chacune des planches ont été entrées dans le code de simulation. Sur le plan qualitatif, la comparaison théorie et expérience est souvent très bonne :

- le gradient d'humidité final dans l'épaisseur de la planche selon son type de débit, son épaisseur, les conditions de séchage est correctement décrit par la formulation ;
- l'observation et l'évolution de la largeur d'une fente de surface au niveau expérimental a pu être parfaitement décrite à travers l'évaluation des contraintes simulées dans la planche ;
- l'histoire des contraintes « vue » par la planche selon son épaisseur, son débit, sa teneur en eau initiale ou même suivant la sévérité des conditions de séchage a été prédit par le code.

Néanmoins, plusieurs phénomènes échappant à la formulation macroscopique et monodimensionnelle du code ont été évoqués pour expliquer certains écarts entre les simulations et le comportement observé : la formation d'une fine couche sèche à la périphérie de la planche, des transferts de masse très faibles de part et d'autre de la frontière aubier/duramen, l'existence d'un

couplage entre les propriétés mécanosorptives et viscoélastiques, l'intervention d'une seconde dimension dans les transferts ou dans l'équilibre mécanique.

Aussi, les aspects concluants, cités précédemment, vont-ils permettre d'extrapoler le séchage d'épaisseurs beaucoup plus importantes dans le chapitre suivant.



ANNEXE IV.1 : La perméabilité relative

La perméabilité intrinsèque d'un matériau poreux en présence d'une phase fluide unique est définie par la *Loi de Darcy*. $K = \frac{Q \cdot L \cdot \mu}{S \cdot \Delta P}$, avec Q le débit volumique de fluide ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), L la longueur traversée (m), μ la viscosité du fluide (Pa.s), ΔP la différence de pression de part et d'autre du matériau (Pa), S l'aire de la section perpendiculaire à la direction du flux (m^2).

Cette grandeur traduit la conductance que le matériau présente à l'avancé du fluide et dépend de la direction considérée. Nous noterons que la fermeture des ponctuations aréolées au cours du séchage, dans le cas des résineux, modifie la conductance du matériau. Cette modification est prise en compte en considérant une perméabilité « *intrinsèque* » pour la phase liquide K_l , et une autre pour la phase gazeuse K_g .

Lorsque deux phases fluides coexistent, une expression généralisée de la *Loi de Darcy* est utilisée. La vitesse de chacune des phases est supposée proportionnelle au gradient de pression de la phase considérée. Le coefficient phénoménologique est le produit de la perméabilité intrinsèque K par la *perméabilité relative* de la phase considérée, divisé par sa viscosité.

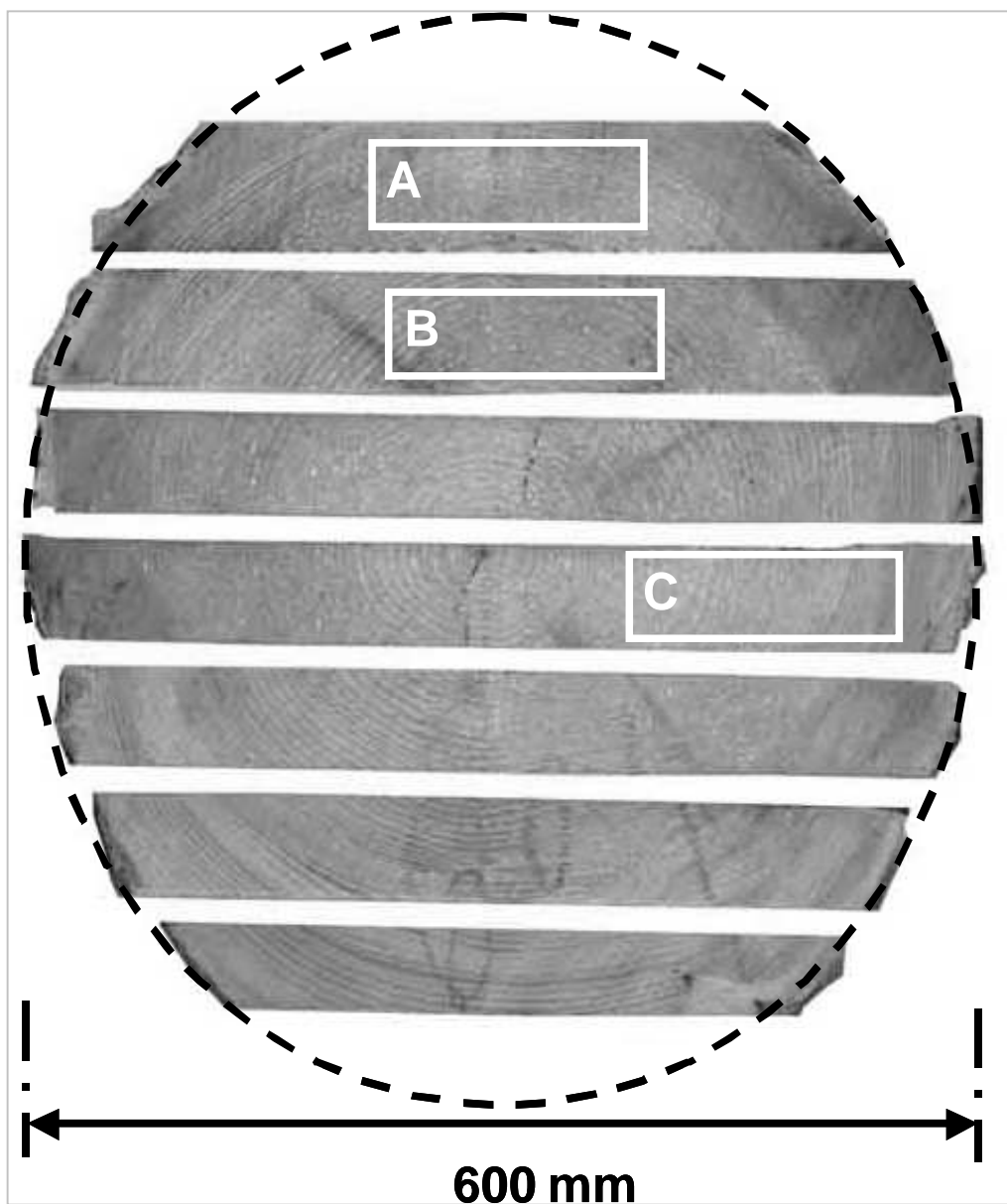
$$\text{Phase gazeuse : } V_g = \frac{K \cdot K_{rg}}{\mu_g} \cdot \nabla P_g \quad ; \quad \text{Phase liquide : } V_l = \frac{K \cdot K_{rl}}{\mu_l} \cdot \nabla P_l$$

La perméabilité relative liquide et la perméabilité relative gazeuse pondèrent la perméabilité intrinsèque, en fonction de l'état de saturation du bois (S). Ces fonctions doivent vérifier les conditions suivantes, aux frontières de leur intervalle de définition :

<u>Phase liquide seule</u>	<u>Phase gazeuse seule</u>
$k_{rl}(S=0) = 0$	$k_{rg}(S=1) = 1$
$k_{rg}(S=0) = 1$	$k_{rl}(S=1) = 0$

avec $S = X_l / X_{lSat}$ et X_{lSat} teneur en eau liquide de saturation (dans notre application $X_{lSat} = 1.33$).

ANNEXE IV.2 : Débit des planches



A : Avivé débité sur **dosse** dans lequel sont prélevés les échantillons D41 et D20 soumis aux **conditions douces et sévères**.

B : Avivé débité sur **dosse** dans lequel sont prélevés les échantillons D41 et D20 soumis aux **conditions très sévères**.

C : Avivé débité sur **quartier** dans lequel sont prélevés les échantillons Q41 et Q20 soumis aux **conditions douces et sévères**.

V Développement de tables de séchage adaptées aux fortes épaisseurs

<u>Introduction</u>	161
<u>1 <i>TransPore</i> outil d'aide à la compréhension du séchage des avivés de fortes épaisseurs</u>	162
1.1 Du champ d'humidité aux contraintes internes pour 2 épaisseurs différentes	162
1.2 Conséquences de l'arrêt du séchage à une humidité moyenne encore élevée	167
<u>2 <i>TransPore</i> outil de prédiction et d'aide à la décision</u>	171
2.1 Choix d'une table de séchage	171
2.2 Développement de nouvelles conduites de séchage	178
2.2.1 Améliorations de conduites existantes	178
2.2.2 Séchage avec des conditions oscillantes	180
<u>Conclusion</u>	184

Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, le code *TransPore* a été employé comme un outil d'aide à la compréhension pour montrer pourquoi il est plus difficile, d'un point de vue qualitatif, de sécher les avivés lorsque leur épaisseur est plus importante. Puis, nous nous sommes intéressés aux conditions de séchage auxquelles sont soumis les avivés de fortes épaisseurs depuis le moment où ils sont placés dans le séchoir jusqu'à leur mise en œuvre. Le code est utilisé pour suivre l'état des contraintes internes durant « l'ensemble » du séchage.

Plusieurs ouvrages sur la pratique du séchage, proposent des conduites différentes pour sécher des avivés d'épicéa de forte épaisseur avec des séchoirs industriels classiques. Laquelle choisir ? L'une est-elle meilleure que l'autre ? Aussi, dans une dernière partie, le code *TransPore* est-il employé comme un outil d'aide à la décision, pour choisir parmi deux conduites de séchage celle qui semble la mieux adaptée pour sécher des fortes épaisseurs. Toutefois, malgré l'utilisation de cette conduite, les conducteurs de séchoir éprouvent des difficultés à obtenir des avivés secs de forte épaisseur avec une qualité satisfaisante. Aussi, le modèle de connaissance *TransPore* est-il utilisé pour nous guider dans l'amélioration de cette table de séchage. Enfin, *TransPore* est utilisé pour prédire l'effet des fluctuations des conditions de séchage dans l'enceinte sur la qualité du produit fini et sur la cinétique du séchage.

1 *TransPore* outil d'aide à la compréhension du séchage des avivés de fortes épaisseurs

1.1 Du champ d'humidité aux contraintes internes pour 2 épaisseurs différentes

Le séchage de deux planches de 90 mm et de 30 mm d'épaisseur a été simulé. Ces planches sont débitées sur dosse et sont supposées posséder des propriétés physiques identiques. Les conditions de séchage appliquées sont constantes et assez douces ($T_s : 65\text{ °C}$, $T_r : 59\text{ °C}$, $h : 20\text{ W/m}^2/\text{°C}$; $h_m = 0,02\text{ m/s}$). À l'état initial, les planches ont une humidité homogène de 70 %. La température initiale utilisée dans la simulation est égale à la température humide de l'air (60 °C). Ceci permet d'éviter la perturbation transitoire due à la différence d'inertie thermique.

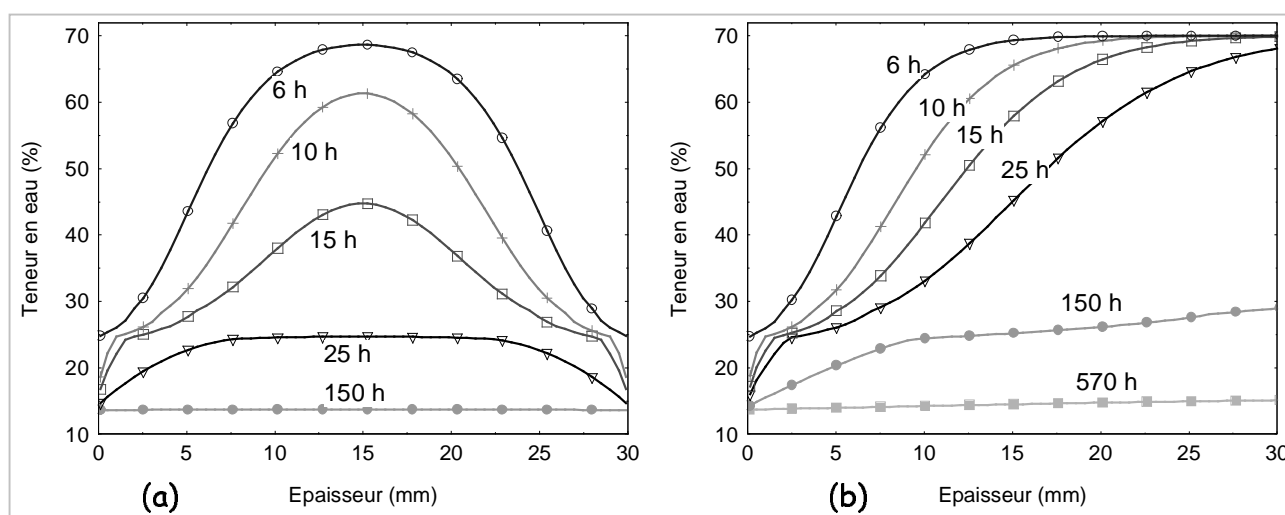


Figure V.1. Profils de teneur en eau simulés dans la planche de 30 mm d'épaisseur (a) et de 90 mm d'épaisseur (b). Sur la figure (b) seul les 30 premiers millimètres par rapport à la surface sont représentés.

Durant la première phase de séchage (5 premières heures), les profils de teneur en eau des deux planches se superposent pour l'ensemble des points à égale distance par rapport à la surface (Fig.V.1). La migration capillaire sollicite peu à peu des couches du matériau plus profondes afin d'alimenter en eau le front d'évaporation. À partir de l'instant où la couche centrale de la planche fine intervient dans ce flux de masse (vers 3 heures dans cet exemple), les profils de teneur en eau des deux planches s'écartent progressivement l'un de l'autre (Fig.V.1). Nous rappelons que cette diminution du gradient d'humidité pour la planche moins épaisse a également été constatée au niveau expérimental (Paragraphe II.1.3.2).

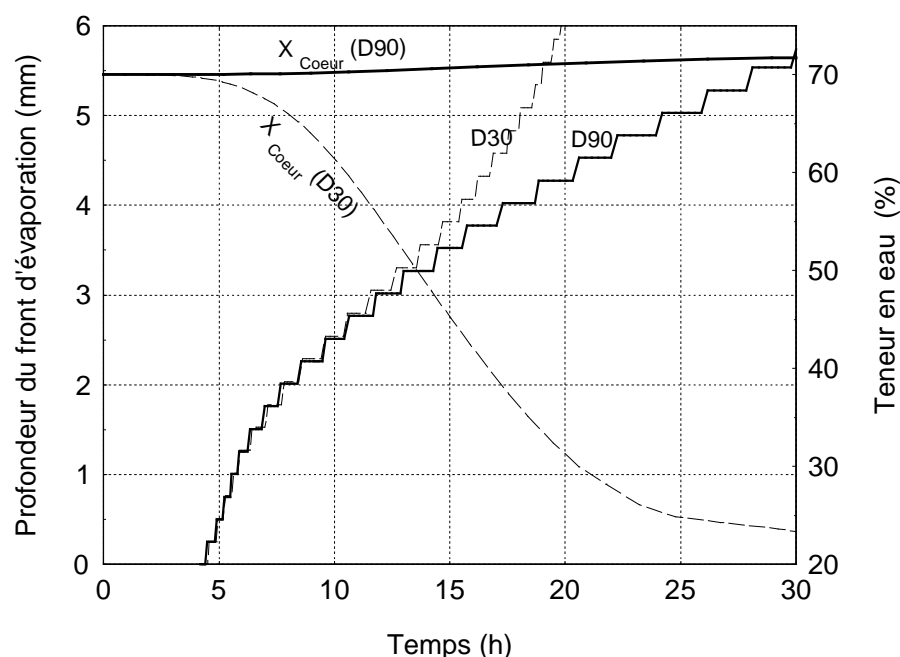


Figure V.2. Évolution temporelle de la position du front d'évaporation (D90 et D30), et évolution de la teneur en eau au niveau du centre.

Le front d'évaporation est défini comme la zone de transition délimitant la partie de la planche dans le domaine de l'eau liée et la partie dans le domaine de l'eau libre. Lorsque le front d'évaporation pénètre dans la planche (fin de la 1^{ère} phase de séchage) (Fig.V.2), le retrait met la périphérie en traction et, pour maintenir l'équilibre mécanique, la partie centrale entre en compression (Fig.V.3). Cette dernière contrainte est plus faible pour la planche épaisse car elle se répartit sur une section plus importante. De plus, la partie centrale de cette planche reste plus longtemps sous compression (8 fois plus longtemps, dans le cas présenté), son fluage, thermohydroactivé, est par conséquent plus important et diminue le niveau des contraintes (Fig.V.4 (b)).

Durant les 12 premières heures, le front évolue indépendamment de l'épaisseur et chacun des avivés se comporte alors comme un **milieu semi-infini**, pour lequel la présence du plan de symétrie ne se manifeste pas sur la tension périphérique. Ainsi les avivés atteignent-ils, en surface, une traction maximale pratiquement identique (Fig.V.3 & 5 et Fig.V.6).

Ensuite, l'humidité des couches plus profondes de D30 devient insuffisante pour alimenter le front d'évaporation en eau libre. Son gradient d'humidité diminue (Fig.V.1), et le front d'évaporation pénètre alors plus rapidement dans cette planche (Fig.V.2). Le retrait des couches plus profondes de D30 relaxe la traction à la surface (Fig.V.5). L'effet de l'épaisseur de la planche apparaît donc après 12 heures de séchage sur les contraintes et le **concept de milieu semi-infini n'est plus valide**. Une

relaxation en « cascade » des différentes couches de la planche fine apparaît avec l'avancée du front (via le retrait) (Fig.IV.5). Parallèlement, les contraintes à la périphérie de la planche épaisse (D90) continuent à croître, et atteignent des valeurs maximales plus importante que celles de la planche fine (D30) (Fig.V.5&6).

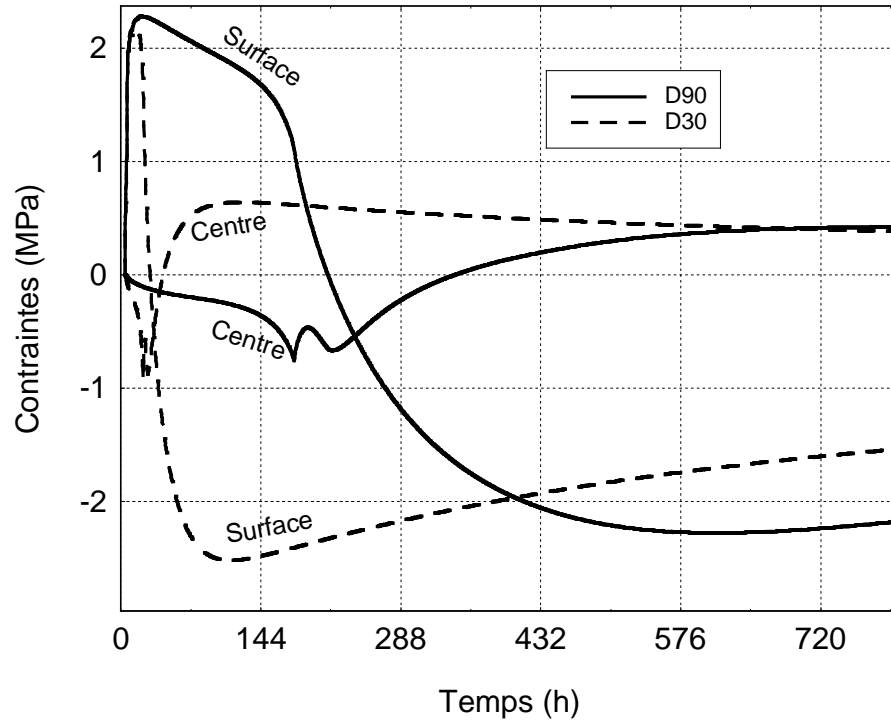


Figure V.3. Évolution temporelle des contraintes dans les planches D90 et D30.

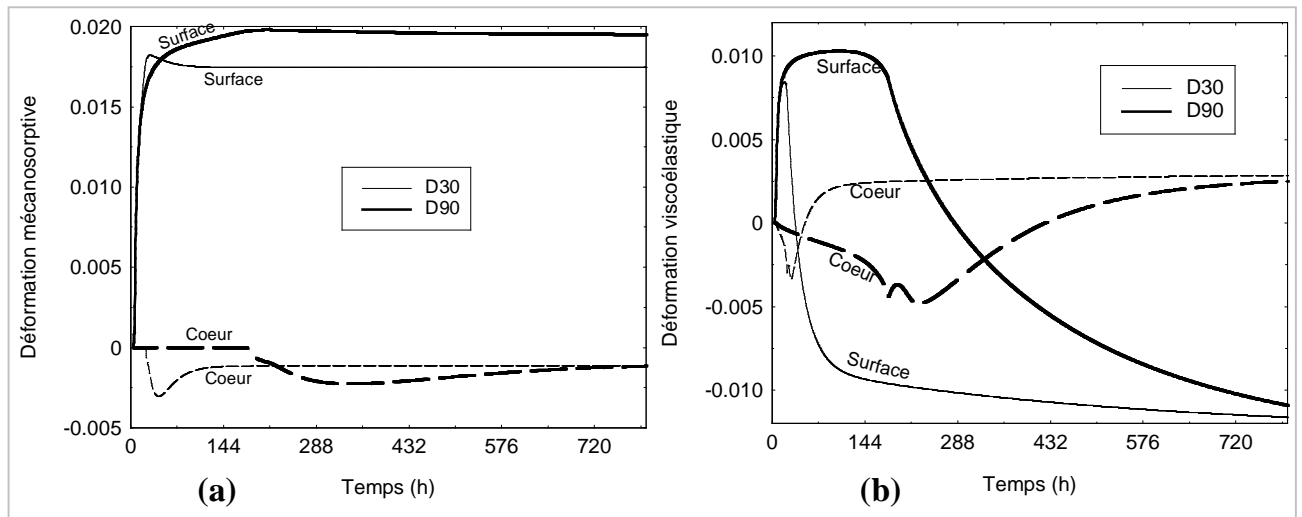


Figure V.4. Évolution temporelle de la déformation mécanosorptive (a), et viscoélastique (b) dans la planche de 30 mm (D30) et de 90 mm (D90) d'épaisseur.

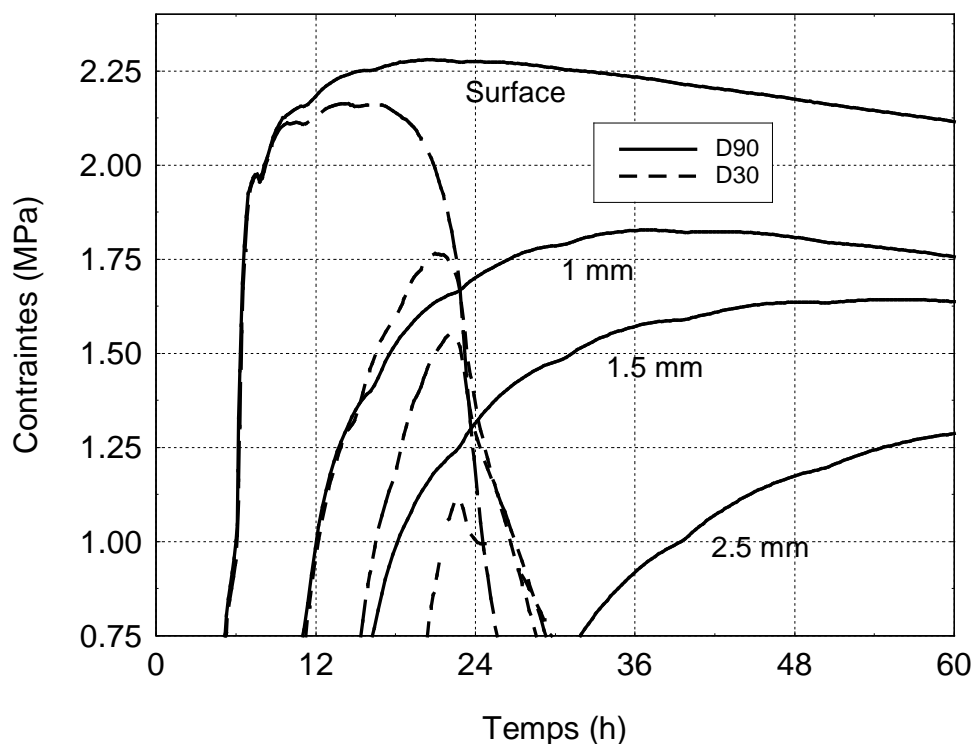


Figure V.5. Zoom sur l'évolution temporelle des contraintes à différentes profondeurs par rapport à la surface (surface ; 1 mm ; 1,5 mm ; 2,5 mm).

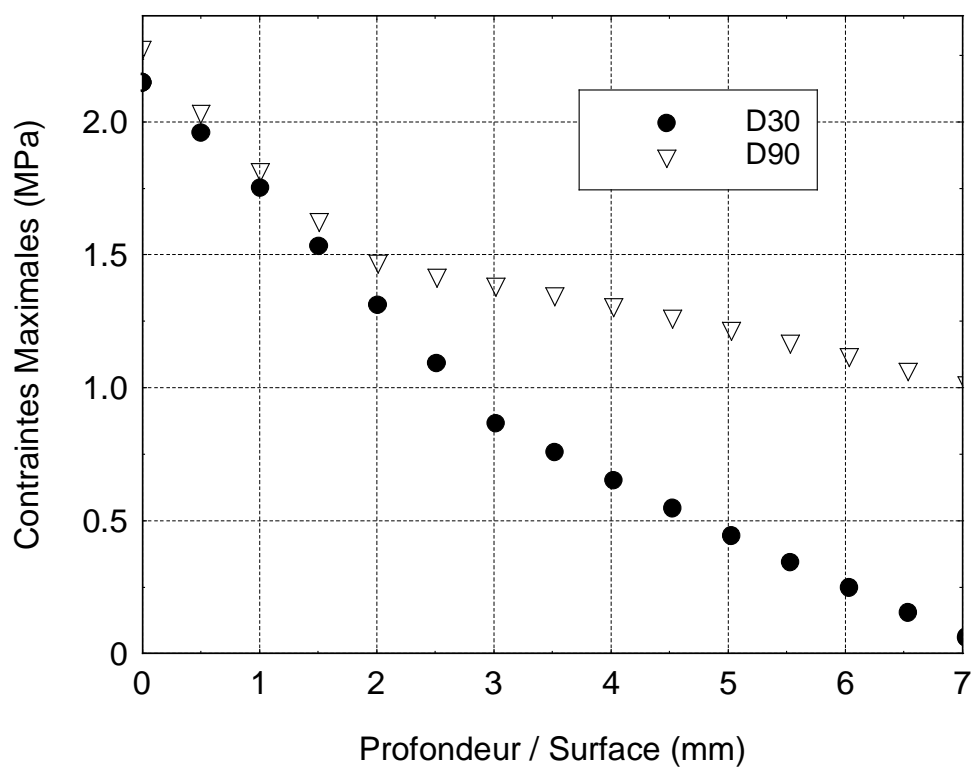


Figure V.6. Tractions maximales atteintes à différentes profondeurs de la planche (15 premiers millimètres) de 90 et 30 mm d'épaisseur, durant l'intervalle de temps où la surface est en traction.

La couche périphérique sous tension atteint une profondeur plus grande pour la planche épaisse (20 mm pour D90 contre 7 mm pour D30) (Fig.7-(a)&(b)), et le risque qu'une fente, initiée en surface s'ouvre, est donc plus important pour la planche épaisse. Nous rappelons, en effet, que la fissuration n'était apparue dans l'essai présenté dans le chapitre IV qu'à partir du moment où une zone périphérique suffisamment « large » était sous tension.

Notons qu'après l'inversion des contraintes, les déformations différées (mécanosorptives + viscoélastiques) de la planche fine amène sa partie centrale à atteindre un niveau de tension légèrement plus important (Fig.7-(b)).

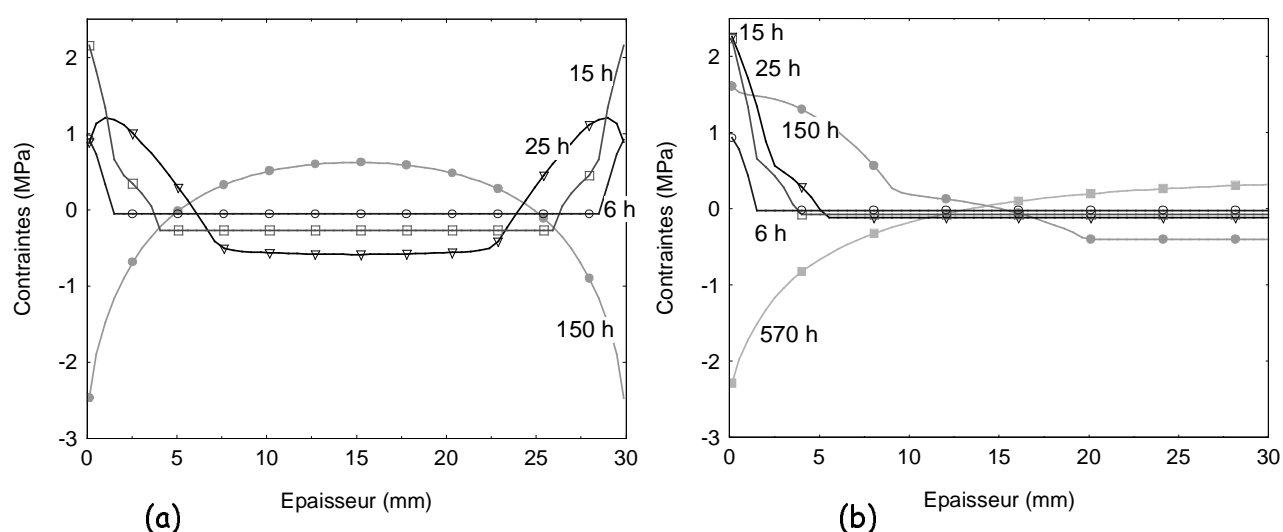


Figure V.7. Les profils des contraintes dans l'épaisseur des deux planches sont présentés aux mêmes instants que les profils d'humidité de la figure V.1. (a) planche de 30 mm, (b) planche de 90 mm. Sur la figure (b) seul les 30 premiers millimètres par rapport à la surface sont représentés.

1.2 Conséquences de l'arrêt du séchage à une humidité moyenne encore élevée

Nous avons simulé le séchage d'une planche de 90 mm d'épaisseur, débitée sur dosse dans le duramen, et ayant une humidité initiale de 60 %. Les conditions appliquées sont celles de la table du CTBA (Tab.V.1). Les avivés épais destinés à être utilisés dans le secteur de la charpente traditionnelle présentent la particularité d'être séchés jusqu'à une humidité moyenne encore haute, autour de 20 %. Pour être proche d'un cycle classique, nous avons ajouté un équilibrage de 20 heures (T_s : 70 °C, U_{eq} : 15 %), et une phase de refroidissement de 9 heures, durant laquelle l'air passe de 70 °C à 40 °C avec 3 paliers de température, chacun durant 3 heures : (T_s : 60 °C, U_{eq} : 15 %), (T_s : 50 °C, U_{eq} : 15 %), (T_s : 40 °C, U_{eq} : 15 %)). À la sortie du séchoir, les avivés peuvent finir leur séchage sur leur lieu de pose jusqu'à une humidité d'équilibre fluctuant avec la saison et la situation géographique (elle peut varier entre l'été et l'hiver de 12 % à 20 % dans le Nord-Est de la France). Nous supposons ici que l'avivé est placé dans une ambiance à 20 °C, et 64 % d'humidité relative (équilibre du bois à 12 %).

Tableau V-1. Table de séchage du CTBA pour l'épicéa [Aléon et al. (1990)].

Humidité moyenne du bois (%)	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Humidité d'équilibre (%)
Vert	70	85	14.5
< 35	70	83	13.7
< 32	70	72	10.8
< 30	75	65	8.7
< 28	75	60	7.8
< 25	75	50	6.5
< 20	80	40	5
< 15	80	28	3.8

Les instants où les conditions se durcissent apparaissent sur la figure V.8-(a)&(b) avec l'augmentation brutale des contraintes à la surface. La phase d'équilibrage permet d'augmenter l'humidité de la périphérie, et de diminuer le gradient de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche (Fig.V.9). Aussi, le gonflement (Fig.V.8-(c)) de la périphérie, permet-il de rendre plus homogène le champ de déformation dû au retrait, et abaisse les contraintes internes (Fig.V.8-(b)). Durant cette période, les propriétés viscoélastiques à la périphérie du matériau sont à nouveau hydroactivées. La déformation viscoélastique qui s'était développée lorsque la périphérie était sous tension diminue rapidement. D'autre part, cette variation d'humidité permet d'activer à nouveau le

fluage mécanosorptif en surface, qui diminue la déformation mécanosorptive périphérique restée figée. Ainsi, la phase d'équilibrage diminue les déformations différées à la périphérie du matériau, relaxe les contraintes internes, et rend plus homogène le champ de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche.

Puis, au cours de la descente en température (Fig.V.8-(a) vers 175 h), le courant d'air circulant sur la planche est plus froid que l'avivé, il se réchauffe donc à son contact et impose des conditions hygrothermiques très sévères. Un retrait brutal de la surface apparaît à chaque palier de la descente en température (Fig.V.8-(c)), provoquant une augmentation de la traction périphérique (Fig.V.8 (b)), et éventuellement des fentes de surface.

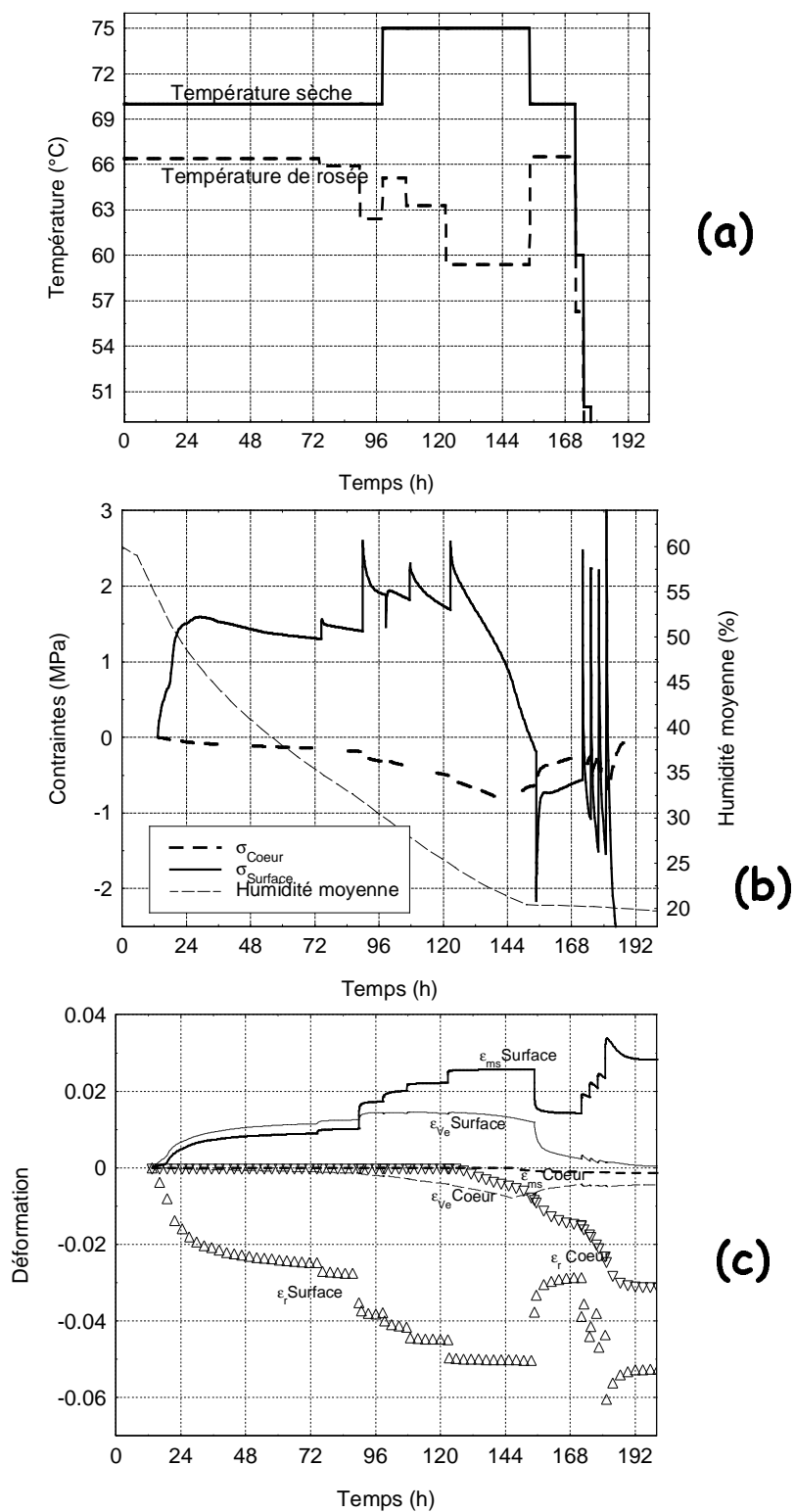


Figure V.8 Simulation des contraintes de séchage (b), des déformations (c) durant le cycle de séchage (a).

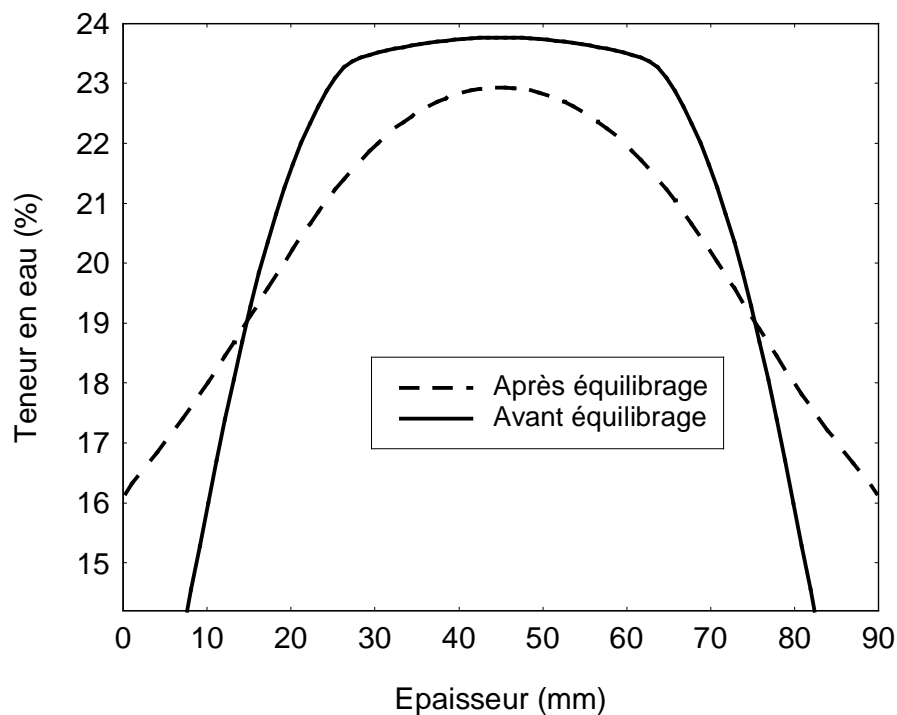


Figure V.9. Champs de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche avant et après l'équilibrage.

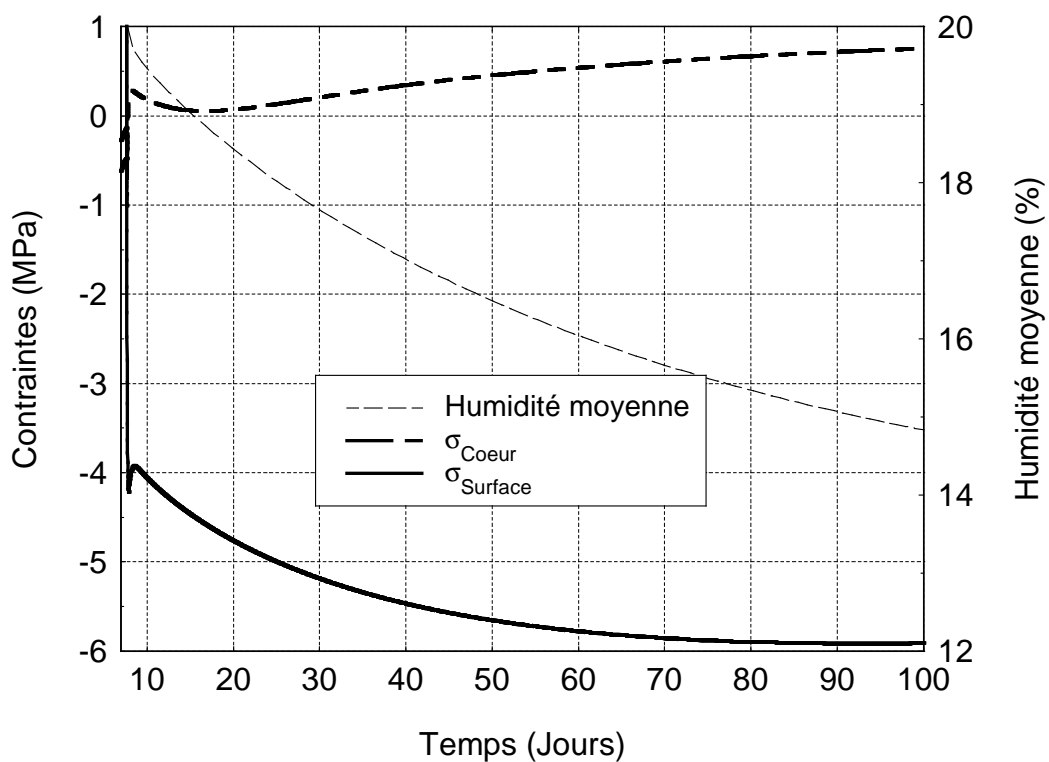


Figure V.10. Évolution des contraintes après la sortie de l'avivé du séchoir. Le temps est ici en jours.

Nous constatons sur la figure V.10 que les contraintes résiduelles continuent d'augmenter lorsque l'avivé est stocké sur son lieu de pose, à température ambiante. En effet, lorsque le processus de séchage est arrêté à une humidité moyenne encore élevée (20 %), l'inversion des contraintes vient tout juste d'avoir lieu à la périphérie du matériau (Fig.V.8-(b)). Sur le lieu de pose, le retrait du cœur continue sans activation thermique du fluage viscoélastique et révèle l'hétérogénéité des déformations différées dans l'épaisseur de la planche.

Ainsi, les dégradations à cœur observées habituellement sur les fortes épaisseurs peuvent apparaître après le séchage. Plus la teneur en eau moyenne de l'avivé à sa sortie du séchoir est élevée et plus le séchage *post-séchoir*, à température ambiante, nuira à la qualité du produit. Malheureusement pour les conducteurs de séchoir, le temps de séchage, pour amener l'humidité de l'avivé de 20% à 12%, est très long.

2 *TransPore* outil de prédiction et d'aide à la décision

2.1 Choix d'une table de séchage

Dans ce paragraphe, la conduite de séchage issue de l'ouvrage de Aléon *et al.* (1990), (tableau V.1), et une autre issue de l'ouvrage de Joly et More-Chevalier (1980) (Tableau V.2), sont comparées.

Tableau V-2. Table de séchage pour des avivés d'épicéa de 55 mm et plus (Joly & More-Chevalier [1980]).

Humidité moyenne du bois (%)	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Humidité d'équilibre (%)
Vert	60	75	12
< 50	60	72	11
< 40	60	68	10
< 30	70	64	9
< 27	70	61	8
< 24	70	53	7
< 21	70	45	6
< 18	75	35	5
< 15	75	29	4

Le type de débit des planches ayant une influence très importante sur la rapidité du séchage et sur la qualité finale du produit, les résultats quantitatifs et qualitatifs des deux conduites de séchage ont

été étudiés à partir de trois planches de débits différents (Fig.V.11) : deux planches nommées D90_Aub et D90_Dura sont débitées sur dosse respectivement dans l'aubier et dans le duramen, une planche nommée Q90_Dura est débité sur quartier dans le duramen. Toutes les planches ont une épaisseur de 90 mm. Leurs paramètres de transferts respectifs sont précisés sur la figure V.11.

Les deux conduites de séchage se sont déroulées selon l'humidité moyenne de la planche débitée sur dosse D90_Dura.

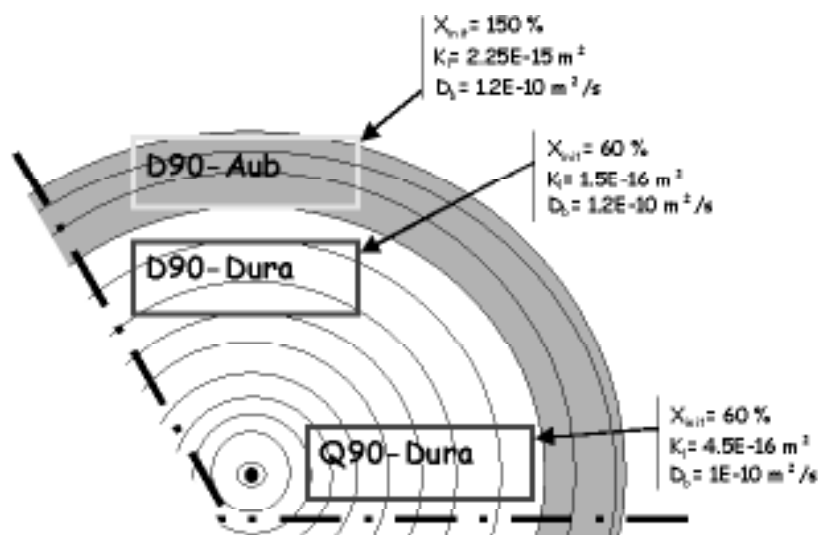


Figure V.11. Mode de débit des planches étudiées dans cette partie. Également précisés, la teneur en eau initiale (X_{mi}), la perméabilité liquide (K_l), le coefficient de diffusion de l'eau liée (D_b).

Avant de comparer les deux tables de séchage, nous avons jugé bon de commenter les traits caractéristiques du séchage des différents débits étudiés.

- effet du débit des avivés sur la rapidité du séchage et la qualité du produit obtenu

La perméabilité liquide dans la direction tangentielle (débit sur quartier), entrée dans *TransPore*, est supérieure à celle dans la direction radiale (débit sur dosse). Des mesures de perméabilité gazeuse sur des échantillons d'épicéa sec à l'air ont montré en effet que $K_g^T \approx 3 \cdot K_g^R$ [Agoua 2001]. Pang (2002) a expliqué cette différence par la présence au niveau microscopique de ponctuations aréolées intervasculaires, situées essentiellement sur le plan radial (R,L) des trachéides. Ces ouvertures favorisent le flux convectif d'eau libre et de gaz dans la direction tangentielle (épaisseur du débit sur quartier). Ainsi, au début du séchage, une planche débitée sur quartier sèche plus rapidement qu'une planche débitée sur dosse (Fig.V.12 et Fig.V.13).

Dans le domaine hygroscopique, la planche débitée sur dosse sèche plus rapidement que la planche débitée sur quartier car les rayons ligneux offrent à l'eau liée et l'eau vapeur une voie d'accès privilégiée vers la surface, en diminuant l'épaisseur totale de parois à traverser. Dans le cas présenté, le séchage de la planche débitée sur quartier est dans l'ensemble plus rapide (Fig.V.12 et Fig.V.13), car le coefficient de diffusion pour l'épicéa, dont les rayons ligneux sont très fins, est assez peu différent entre les directions radiale et tangentielle (Agoua (2001), Kouchadé (2004)) (Fig.V.13).

Parmi les planches débitées sur dosse, la planche d'aubier (D90_Aub) sèche plus rapidement que celle constituée uniquement de bois parfait (D90_Dura). En effet, la très forte perméabilité liquide de la partie aubieuse permet de retarder la formation d'une couche sèche à la périphérie de la planche. Cette couche sèche apparaît plutôt pour D90_Dura et ralentit fortement la cinétique du séchage en raison de la lenteur de la migration diffusible dans cette partie. La migration liquide se réalise donc plus aisément au début du séchage dans D90_Aub et, malgré son humidité initiale très élevée, son humidité moyenne rejoint celle de D90_Dura après 130 heures pour la table V.1 et 95 heures de séchage pour la table V.2.

Concernant la qualité du séchage, les planches débitées sur quartier présentent un niveau de contraintes très inférieur à celui du débit sur dosse (Fig.V.12 et Fig.V.13). En effet, le champ parabolique d'humidité dans l'épaisseur engendre des retraits locaux suivant la largeur de la planche. Pour une planche débitée sur quartier, elle correspond à la direction radiale dont le retrait est inférieur à celui de la direction tangentielle. D'autre part, les paramètres viscoélastiques et mécanosorptifs sont environ deux fois plus élevés dans la direction radiale (largeur d'une planche débitée sur quartier) que dans la direction tangentielle (largeur d'une planche débitée sur dosse) (respect des ratios d'anisotropie mesurés dans le comportement élastique du bois). Ainsi, la relaxation apportée au début du séchage par la déformation différée du bois sera, de façon relative, plus importante pour une planche débitée sur quartier.

La première phase de séchage est très longue pour la planche d'aubier (D90_Aub) et, ainsi, les contraintes internes apparaissent plus tardivement pour cette planche (120 heures pour la table V.1 et 90 heures pour la table V.2) que pour les planches issues du duramen (D90_Dura et Q90_Dura). Aux instants où les planches entrent en seconde phase de séchage (apparition des contraintes), la périphérie de D90_Aub est soumise à des conditions beaucoup plus dures que les planches débitées dans le duramen (D90_Dura et Q90_Dura). Par conséquent, la traction de la surface de D90_Aub augmente très rapidement (Fig.V.12 et Fig.V.13) et, malgré les conditions très sévères, cette

contrainte atteint une valeur maximale voisine de celle de D90_Dura (environ + 6 % pour la table V.1, et - 5 % pour la table V.2). En effet, la température sèche de l'air étant plus importante à cet instant du séchage (+5 °C pour la table V.1, et +10 °C pour la table V.2), elle thermoactive plus fortement les propriétés viscoélastiques de la périphérie de D90_Aub, et le fluage engendré relaxe plus ses contraintes internes.

Conduite V.1 (Aleon *et al.* (1990))

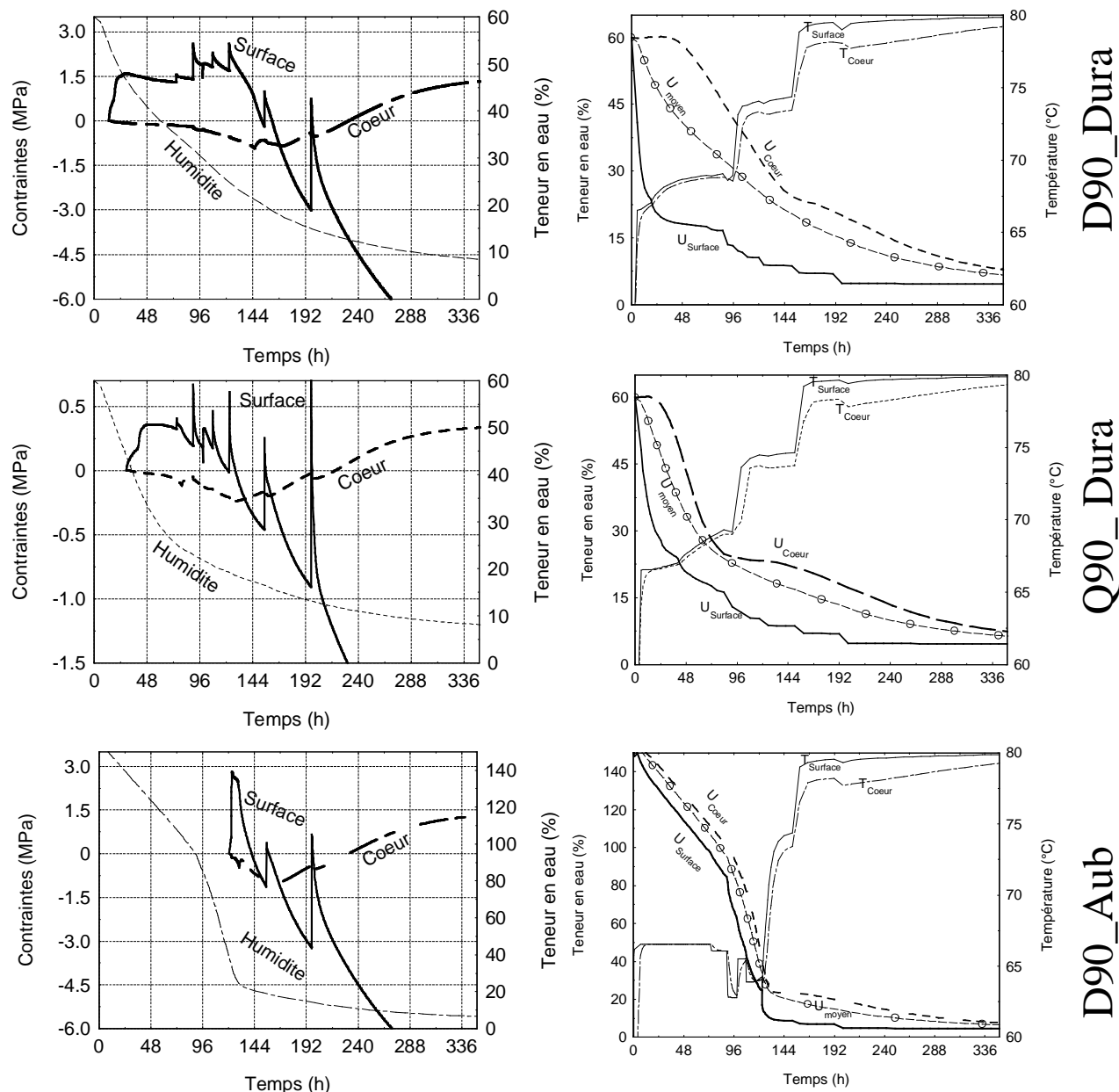


Figure V.12. Évolution des contraintes, de la teneur en eau et de la température dans les planches débitées sur dosse (D90_Aub et D90_Dura) et sur quartier (Q90_Dura). Ces planches sont soumises à la table de séchage V.1 de Aleon *et al.*(1990).

Conduite V.2 (Joly et More-Chevalier (1980))

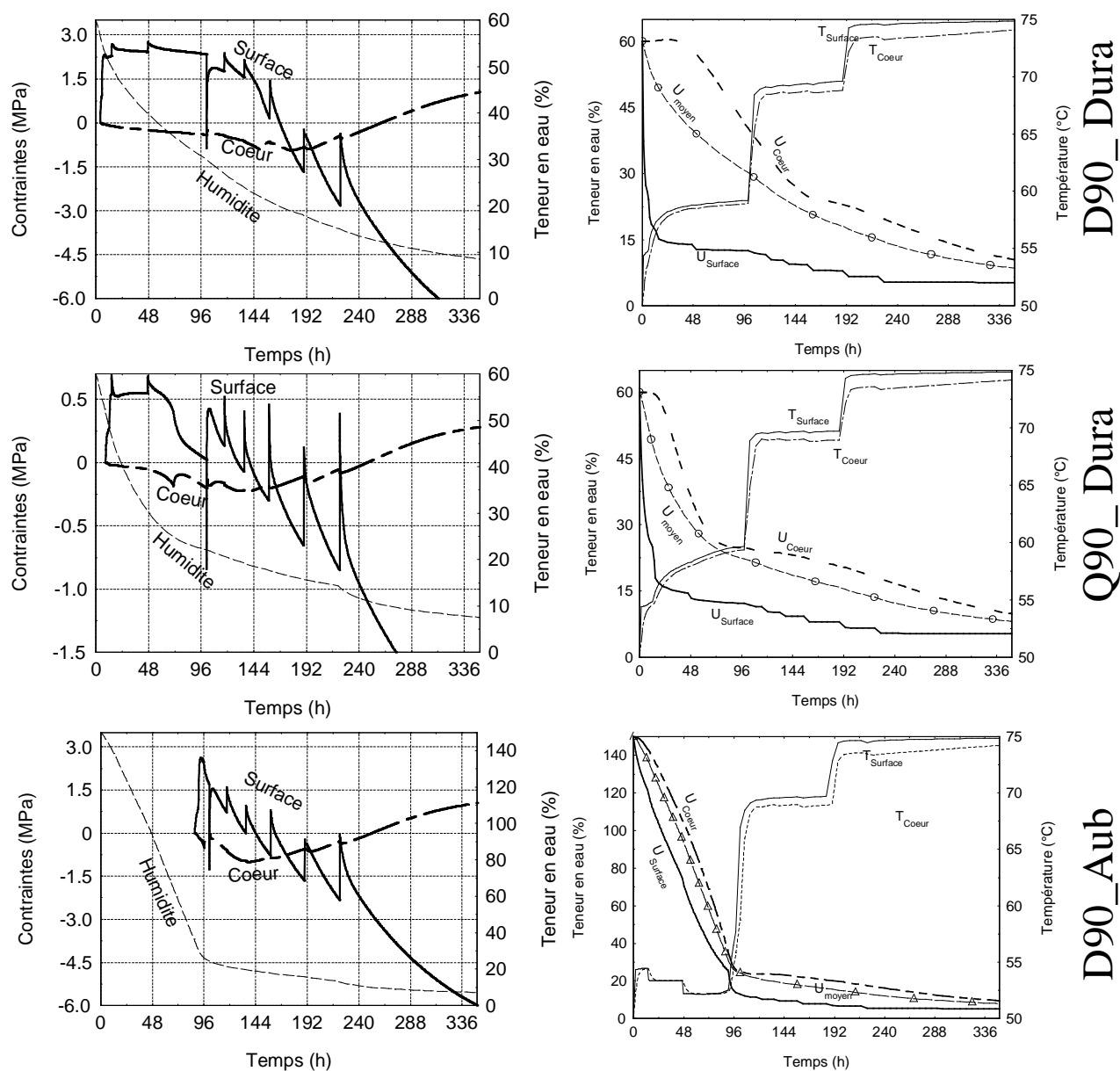


Figure V.13.Évolution des contraintes, de la teneur en eau et de la température dans les planches débitées sur dosse (D90_Aub et D90_Dura) et sur quartier (Q90_Dura). Ces planches sont soumises à la table de séchage V.2 de Joly & More-Chevalier [1980].

- résultats quantitatifs et qualitatifs des deux conduites de séchage

Au début du séchage, les conditions sont légèrement plus douces pour la table V.1 au niveau des transferts de masse par rapport à celle de la conduite de Joly et More-Chevalier (1980) (table V.2). En conséquence, la première phase de séchage dure plus longtemps, et les contraintes internes apparaissent plus tard pour la table V.1. Aussi, la température sèche étant plus élevée (+ 10 °C), l'activation thermique des propriétés viscoélastiques permet-elle de diminuer le niveau des contraintes internes.

Les conditions se durcissent ensuite à partir de la troisième ligne de la table V.1 (après 90 heures de séchage). Ce changement semble trop précoce, et la traction de la périphérie augmente fortement (environ 40 % d'augmentation) pour les planches débitées sur dosse et sur quartier dans le bois parfait (D90_Dura et Q90_Dura).

A la fin du séchage, pour l'ensemble des avivés, les contraintes résiduelles sont légèrement plus importantes pour la table V.2, le séchage est plus long (+15 % pour D90_Dura et Q90_Dura, et +8 % pour D90_Aub) (Tableau V.3). Les deux conduites produisent une différence d'humidité entre le cœur et la surface assez voisine.

Tableau V-3. Temps de séchage et différence de teneur en eau entre le cœur et la surface, lorsque l'humidité moyenne de la planche a atteint 15 %.

		Conduite V.1	Conduite V.2
D90_Dura	Durée (h)	193	224
	$X_{\text{Coeur}} - X_{\text{Surface}}$ (%)	13	13.6
Q90_Dura	Durée (h)	169	195
	$X_{\text{Coeur}} - X_{\text{Surface}}$ (%)	13.1	13.3
D90_Aub	Durée (h)	186	201
	$X_{\text{Coeur}} - X_{\text{Surface}}$ (%)	14	13

Ainsi, les conducteurs de séchoir devront plutôt choisir la conduite de Aléon *et al.* (1990), pour sécher des avivés de fortes épaisseurs. Les meilleurs résultats de cette conduite sont dus principalement à :

- ✓ une température sèche de l'air plus importante dès le début du séchage. Elle thermoactive les propriétés viscoélastiques, et accélère la migration diffusive ;

- ✓ un écart psychrométrique plus faible au début du séchage. Il prolonge la première phase de séchage, durant laquelle la migration d'eau du cœur vers la surface de la planche se réalise facilement (pas de migration diffusive). La teneur en eau à la surface est plus élevée, les profils d'humidité dans l'épaisseur sont plus plats, et lorsque la périphérie se rétracte, les contraintes sont moins élevées et sont relaxées plus fortement par le fluage viscoélastique, qui se trouve hygroactivé.

2.2 Développement de nouvelles conduites de séchage

2.2.1 Améliorations de conduites existantes

Dans l'esprit général des remarques précédentes, nous avons modifié la table de Aléon *et al.* (1990). La température sèche de l'air a été augmentée dès la 3^{ème} ligne de la table, et parallèlement les conditions de séchage ont été adoucies, afin de diminuer le gradient de teneur en eau dans la planche et les contraintes de séchage (TableV.4).

Tableau V-4. Table de séchage inspirée de celle de Aléon *et al.* (1990).

Humidité moyenne du bois (%)	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Humidité d'équilibre (%)
Vert	70	85	14.5
< 35	70	83	13.7
< 32	70 75	72 78	10.8 11.4
< 30	75 78	65 71.4	8.7 9.7
< 28	75 80	60 69	7.8 9
< 25 ... <23	75 80	50 63	6.5 8
< 20	80	40 53	5 6.5
< 15	80	28	3.8

Les résultats obtenus sont convaincants (Fig.V.14 et Tab.V.5), la tension maximale atteinte en surface est plus faible pour l'ensemble des débits (environ - 20 %), les contraintes résiduelles sont plus faibles, et le gradient d'humidité finale également. La durée totale du séchage a légèrement été augmentée, mais les avivés séchés avec cette conduite pourront subir une phase d'équilibrage moins longue.

Tableau V-5. Temps de séchage et différence de teneur en eau entre le cœur et la surface, lorsque l'humidité moyenne de la planche atteint 15 %.

		Conduite V.4
D90_Dura	Durée (h)	202
	$X_{\text{Coeur}} - X_{\text{Surface}}$ (%)	10.4
Q90_Dura	Durée (h)	178
	$X_{\text{Coeur}} - X_{\text{Surface}}$ (%)	10.2
D90_Aub	Durée (h)	202
	$X_{\text{Coeur}} - X_{\text{Surface}}$ (%)	10.5

Conduite V.1 modifiée

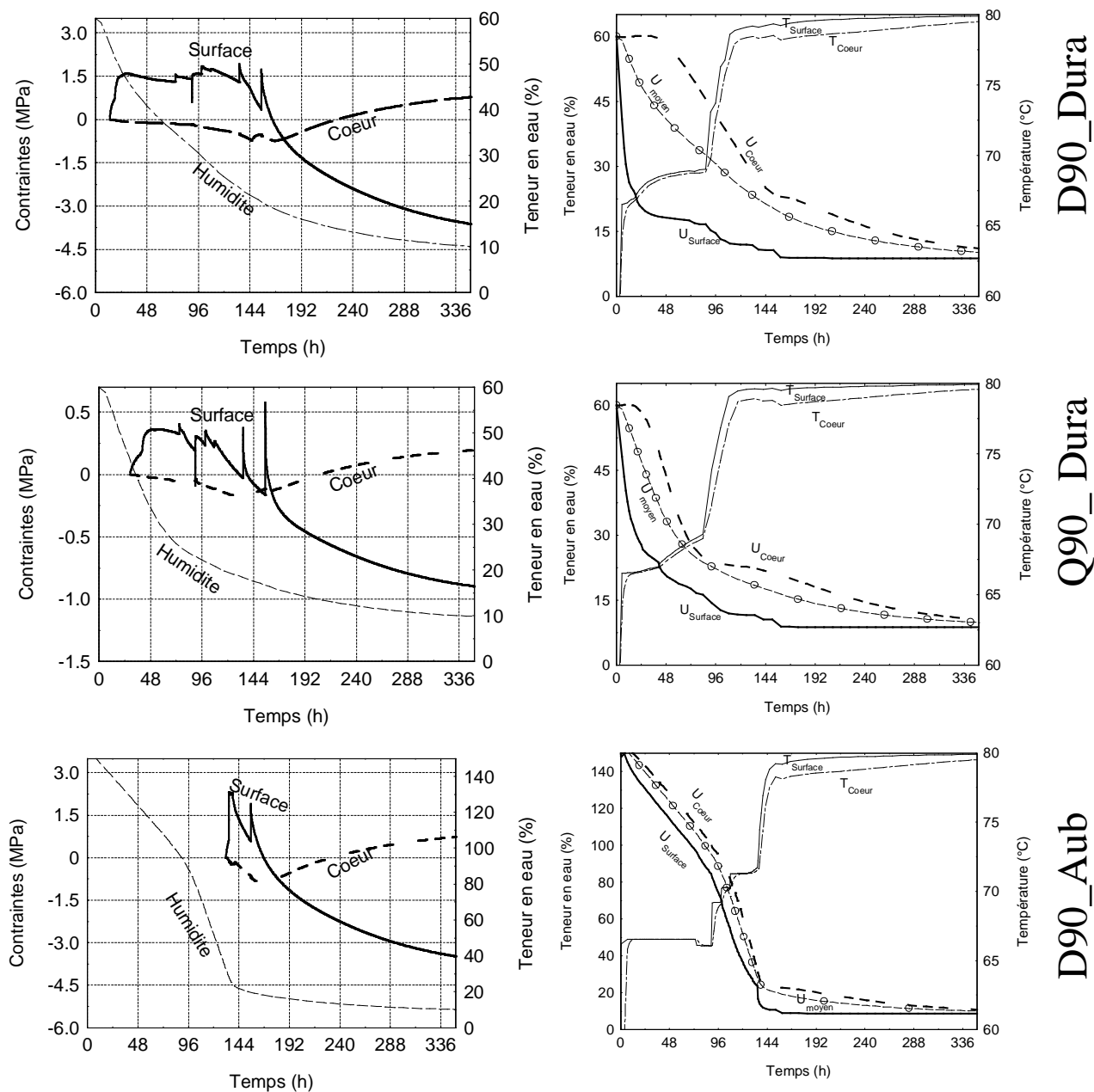


Figure V.14. Évolution des contraintes, de la teneur en eau et de la température dans les planches débitées sur dosse (D90_Aub et D90_Dura) et sur quartier (Q90_Dura). Ces planches sont soumises à la table V.4.

2.2.2 Séchage avec des conditions oscillantes

Nous avons vu dans le paragraphe IV.2.2.3 que les fluctuations, involontaires, des conditions de l'air dans l'enceinte du séchoir de l'ENSTIB conduisait à relaxer une partie des contraintes à la périphérie de la planche. Cette constatation a été également observée par quelques auteurs et est sujette à des discussions scientifiques [Terziev *et al.* (2002), Salin (2002), Riehl et Wehling (2003)]. Ces conditions de séchage oscillantes permettraient peut-être d'améliorer la qualité du séchage des fortes épaisseurs. Ainsi, nous avons souhaité étudier plus en détail cette technique avec l'aide de *TransPore*. La configuration du séchage décrite dans le paragraphe V.1.1.1 a été reprise dans ce paragraphe. Toutefois, la température de rosée de l'air oscille désormais autour de la valeur de consigne, avec une période de 5 minutes (*cas A*), ou une période de 45 minutes (*cas B*). Dans les deux cas l'amplitude des oscillations est de ± 1 °C par rapport à la température de consigne.

La teneur en eau à la périphérie de la planche tend rapidement vers son humidité d'équilibre pour l'ensemble des configurations (Fig.V.15). Lorsque celle-ci fluctue avec l'oscillation de la température de rosée de l'air, la périphérie alors sous tension voit sa déformation mécanosorptive augmenter par rapport à la configuration sans oscillation (Fig.V.15). Aussi, la traction est-elle diminuée par cette déformation complémentaire (Fig.V.16). Le risque de fentes de surface est donc réduit dans ces deux configurations. Notons que la cinétique globale du séchage n'est pas affectée par cette oscillation (Fig.V.15).

La période de l'oscillation étant très courte devant les temps engagés dans les transferts de masse dans la planche, la fluctuation des conditions externes s'amortit dans l'épaisseur de l'échantillon et n'a plus d'effet au delà d'une certaine profondeur. Dans le cas *A* elle se situe autour de 2.5 mm de profondeur, et dans le cas *B*, période d'oscillation plus longue, elle est d'environ 5 mm de profondeur (Fig.V.15). Par conséquent, la déformation mécanosorptive n'est augmentée par rapport à la configuration sans oscillation, seulement dans ces parties de la planche (Fig.V.15).

Après l'inversion des contraintes (à partir de 250 heures), la fluctuation des conditions externes continue d'activer le fluage mécanosorptif à la périphérie de la planche (Fig.V.15). La déformation mécanosorptive diminue seulement dans la couche où la teneur en eau oscille. Les couches plus profondes ayant atteint leur humidité d'équilibre voient leurs déformations mécanosorptives figées dans le temps. Ainsi, les contraintes résiduelles diminuent seulement dans les 3 premiers millimètres dans le cas *A* et jusqu'à 5 millimètres dans le cas *B*.

En somme, en agissant sur la fréquence de l'oscillation, il est possible de maîtriser l'épaisseur de la couche relaxée. La « largeur » de la zone sous tension, en partie responsable de la difficulté rencontrée pour sécher des avivés de fortes épaisseurs, peut alors être contrôlée. Les conditions de séchage oscillantes offrent donc une voie prometteuse pour améliorer la qualité du séchage des fortes épaisseurs sans affecter la durée de leur séchage. Cette technique semble également prometteuse pour améliorer la qualité du séchage obtenue dans les séchoirs dont le système de chauffe ne permet pas d'atteindre des températures élevées (typiquement les pompes à chaleur). En effet, ce type de séchoir ne peut pas bénéficier de l'activation thermique du fluage viscoélastique, pour relaxer les contraintes dans la planche. Enfin, pour les épaisseurs plus faibles, cette technique devrait permettre d'imposer des conditions de séchage plus dures pour sécher plus rapidement.

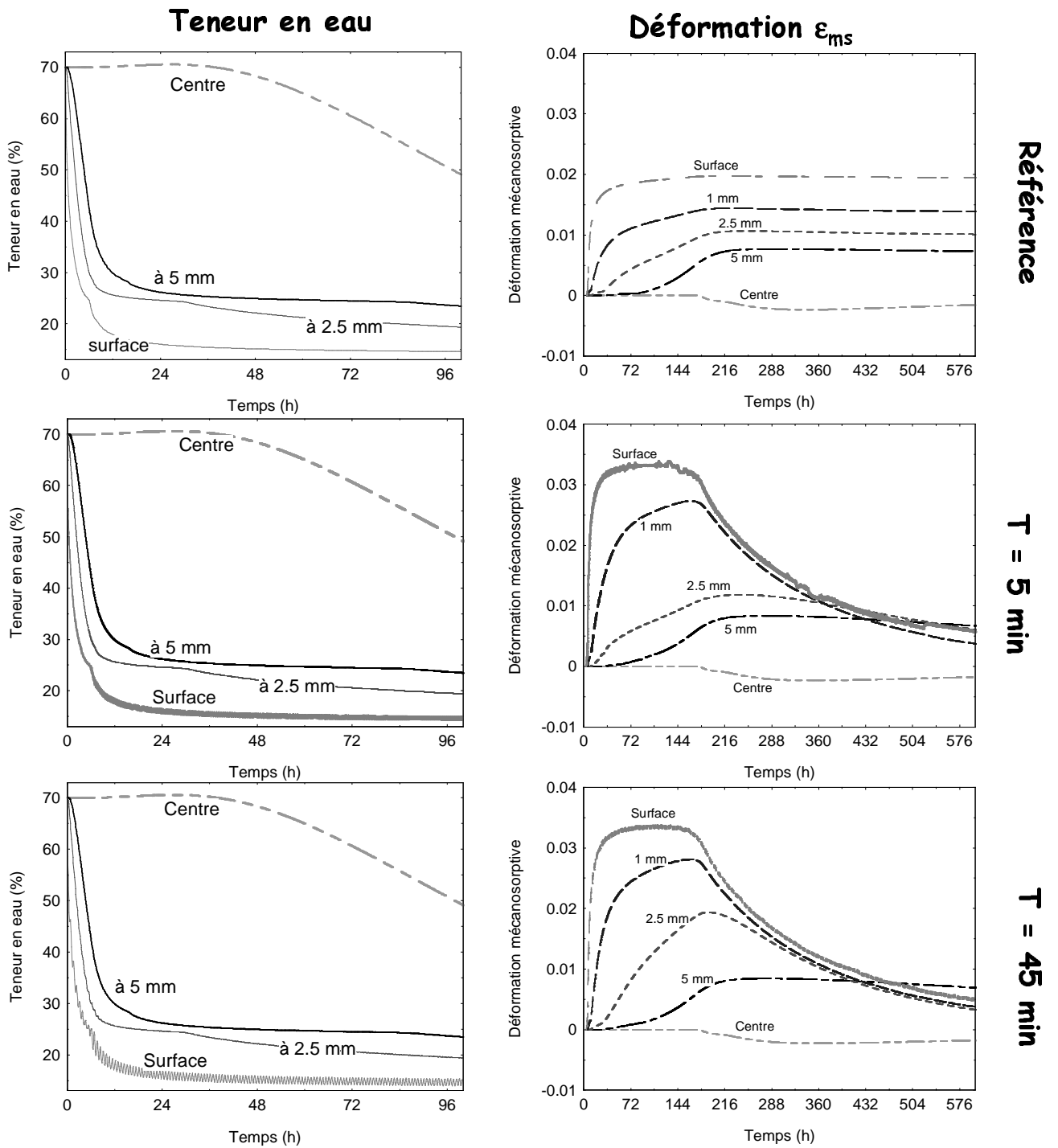


Figure V.15. Représentation de l'évolution de la teneur en eau dans la planche (colonne de gauche) et de l'évolution de la déformation mécanosorptive (colonne de droite), à différentes profondeurs par rapport à la surface d'échange, selon la période d'oscillation des conditions hygrothermiques extérieures. T désigne la période des oscillations. Les courbes de « référence » sont obtenues avec les conditions de séchage constantes.

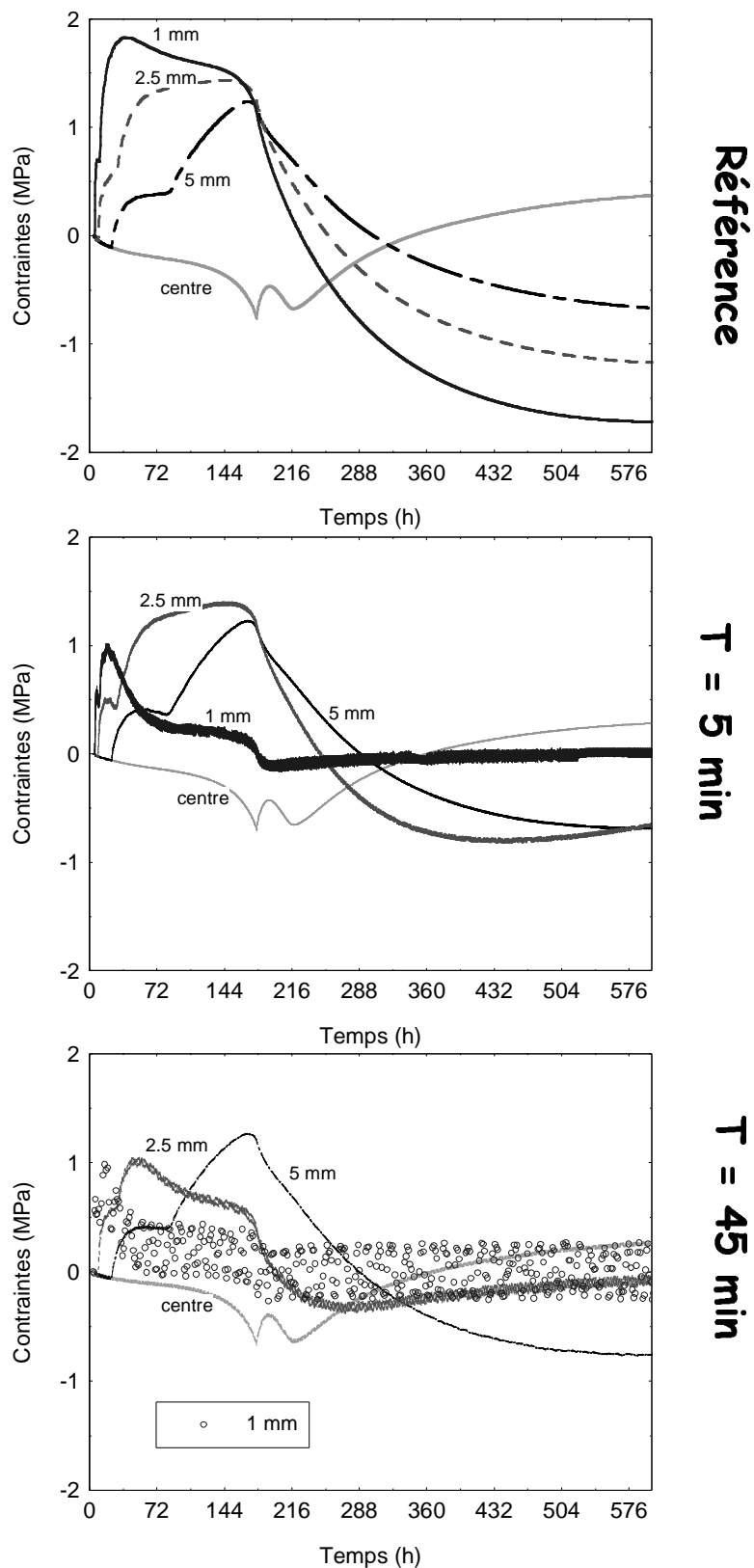


Figure V.16. Évolution des contraintes dans la planche, à différentes profondeurs par rapport à la surface, selon la période d'oscillation des conditions hygrothermiques extérieures. T désigne la période des oscillations.

Conclusion

Dans une première partie, le code numérique a été utilisé pour comprendre les raisons qui rendent le séchage des fortes épaisseurs plus difficile. Il a montré qu'au début du séchage, pendant une période plus ou moins longue dépendant sans doute de la sévérité des conditions, l'épaisseur de la planche ne se manifeste pas sur la tension périphérique (milieu semi-infini). Ensuite, un gradient d'humidité plus faible apparaît dans les planches moins épaisses, gradient qui relaxe, via le retrait, la zone périphérique sous tension. La fissuration à la surface des avivés de fortes épaisseurs provient certainement de la « largeur » de la zone périphérique sous tension, qui est plus importante lorsque l'épaisseur de l'avivé augmente.

D'autre part, les fentes internes observées habituellement sur les fortes épaisseurs pourraient provenir de l'arrêt du processus à une humidité moyenne des planches encore élevée. En effet, à ce niveau d'humidité, l'inversion des contraintes vient tout juste d'avoir lieu. Sur le lieu de pose, le retrait du cœur continue sans activation thermique du fluage viscoélastique et révèle l'hétérogénéité des déformations différées dans l'épaisseur de la planche.

Dans une dernière partie, le code a été utilisé pour choisir parmi deux tables de séchage celle qui semble la mieux adaptée pour sécher des avivés de fortes épaisseurs. Le code a montré également sa capacité à guider ses utilisateurs dans le développement de nouvelles conduites de séchage. Cette dernière application ouvre une voie prometteuse vers l'amélioration des tables de séchage et vers la possibilité d'aide offerte par le code *TransPore* aux conducteurs de séchoir. Enfin, nous avons terminé ce chapitre en présentant une nouvelle technique de séchage qui semble bien adaptée aux avivés de fortes épaisseurs puisqu'elle permet de réduire la « largeur » de la zone sous tension en partie responsable de la difficulté de leur séchage. Cette technique cherche à maintenir un effet mécanosorptif dans la zone périphérique de la planche au moyen de conditions oscillantes.

Conclusion générale

Il y a encore quelques années, prédire le comportement d'un matériau aussi complexe que le bois (variabilité, anisotropie, polymère composite, modification de ses propriétés avec la température ou sa teneur en eau, etc.) durant son séchage n'était envisagé que dans un lointain futur.

Au sein de notre laboratoire cette approche déterministe du séchage a commencé il y a un peu plus de 15 ans avec la « naissance » de *TransPore* [Perré (1987)]. Depuis, de nombreux travaux ont été réalisés pour améliorer ses prédictions. Nous citerons notamment (liste non exhaustive) les travaux de caractérisations du bois qui fournissent des modèles et des paramètres fiables à l'entrée du code [Agoua (2001), Kouchadé (2004), Perré et Passard (2004)], les travaux sur la formulation des transferts de chaleur et de masse, ainsi que sur la mécanique du séchage [Perré et Passard (1995), Mauget (1996)]. Nous pouvons également mentionner les travaux sur la résolution numérique des équations de transferts non linéaire et fortement couplées pour diminuer le temps de calcul de l'ordinateur [Perré et Turner (1996)].

Le LERMaB dispose également d'outils expérimentaux, tel que le séchoir prototype de l'ENGREF et celui de l'ENSTIB, pour réaliser des approches descriptives du séchage.

En somme, ce travail de thèse s'est situé dans un cadre avantageux et s'appuie sur une somme considérable de travaux antérieurs. L'objectif de notre étude était de comprendre les raisons qui rendent plus difficiles le séchage des fortes épaisseurs et, de proposer des conduites de séchage mieux adaptées à ce type d'avivé. Dans ce but le code numérique *TransPore* a été placé au cœur de notre approche, ce qui a nécessité la mise en place de nouveaux outils :

- ✓ **deux dispositifs expérimentaux** ont été développés pour obtenir des informations précieuses sur les transferts de masse et sur les contraintes mécaniques dans une planche de bois au cours de son séchage. Le premier dispositif (ENGREF) utilise un rayonnement X polychromatique pour déterminer de façon non-destructive et sans contact le profil de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. Le second dispositif (ENSTIB) permet d'acquérir simultanément plusieurs mesures permettant de dresser *une fiche d'identité* sur le séchage de la planche, notamment la variation de son épaisseur, et l'évolution de la largeur des fentes en surface.
- ✓ **une unité de calcul des contraintes** de séchage a été développée et greffée à *TransPore* 1D pour aborder l'aspect qualitatif du séchage. Ce modèle mécanique est capable d'estimer le comportement mécanique du bois en rapport avec les champs évolutifs d'humidité dans la planche. Le modèle de comportement utilisée intègre, entre autres, les propriétés viscoélastiques

thermohydroactivées et les propriétés mécanosorptives du bois. L'hypothèse des déplacements plans a permis d'obtenir une modélisation monodimensionnelle cohérente de la mécanique du séchage. La courbure éventuelle de la planche autour de son axe longitudinal a été intégrée dans la formulation, par exemple, pour simuler la flèche du *Slicing Test*, un séchage dissymétrique, etc. Ainsi réalisé, *TransPore* 1 D et cette unité de calcul des contraintes simulent le séchage complet d'une planche en quelques secondes (transferts internes + contraintes mécaniques).

Les résultats expérimentaux ont ensuite été confrontés aux résultats théoriques pour affiner et **valider les résultats prédits par la simulation numérique**. Une première approche de l'expression de la perméabilité relative liquide a pu être effectuée grâce à la comparaison entre le champ de teneur en eau expérimental et théorique. Les comparaisons, qui ont suivi cette évaluation, se sont avérées souvent très bonnes d'un point de vue qualitatif, tant au niveau des transferts couplés de chaleur et de masse que sur l'évaluation des contraintes de séchage. L'aspect quantitatif est plus difficile à obtenir en raison de la grande variabilité du matériau bois. De plus, certains mécanismes échappent à la formulation macroscopique, notamment la formation d'une fine couche sèche périphérique dès le début du séchage, ou encore les transferts de masse entre l'aubier et le duramen d'une planche.

Ce travail se termine avec **l'utilisation de *TransPore*** pour mieux comprendre les mécanismes complexes et couplés qui rendent le séchage des fortes épaisseurs difficile. Il a permis de montrer que :

- ✓ la fissuration à la surface des avivés de fortes épaisseurs provient certainement de la « largeur » de la zone périphérique sous tension, qui est plus importante lorsque l'épaisseur de l'avivé augmente ;
- ✓ les fentes internes observées habituellement sur les fortes épaisseurs pourraient provenir de leur séchage sur le lieu de pose lorsque le retrait du cœur continue, sans activation thermique du fluage viscoélastique.

Dans une dernière partie, le code a été utilisé pour choisir parmi deux tables de séchage celle qui semble le mieux adaptée pour sécher des avivés de fortes épaisseurs. Il a montré également sa capacité à guider ses utilisateurs dans le **développement de nouvelles conduites** de séchage pour *sécher vite et bien*. *TransPore* a mis en évidence une voie prometteuse pour améliorer le séchage

des avivés de fortes épaisseurs avec l'utilisation de conditions de séchage oscillantes pour relaxer les contraintes à la périphérie de la planche.

Nous allons décrire ci-après des perspectives à ce travail concernant, en amont, l'aspect caractérisation du matériau et, en aval, l'aspect utilisation des connaissances et l'approche déterministe du processus de séchage.

Les perspectives de ce travail

Caractérisation

À plusieurs reprises dans ce travail, la perturbation apportée par le retrait sur la mesure du champ de teneur en eau, a été citée. Aussi, un dispositif visant à **suivre quelques points matériels** de l'épaisseur de la planche avec le rayonnement X (déplacements des platines en description lagrangiennes) a-t-il été conçu et réalisé dans notre laboratoire. Il sera prochainement mis en place. Nous pourrions alors espérer diminuer l'erreur de mesure, et pouvoir obtenir des profils d'humidité beaucoup moins perturbés pour les planches débitées sur dosse, etc.

La formation d'une **fine couche sèche périphérique** dès le début du séchage a été fréquemment mise en avant pour expliquer le ralentissement des transferts de masse observés, ou encore l'absence de première phase de séchage, etc. Son existence a, semble-t-il, été prouvée de façon indirecte avec un modèle analytique et les résultats expérimentaux de ce travail [Rémond *et al.* (2005)], mais son explication est sujette à de nombreuses discussions [Salin (2002) et (2003), Wiberg *et al.* (2000)]. Notons que l'existence de cette couche sèche échappe à la formulation macroscopique du modèle de connaissance *TransPore*. Le champ de teneur eau mesuré par notre dispositif de rayonnement X, pourrait être couplé avec une mesure de température de surface (pyromètre) ou de l'épaisseur de la planche sans contact. Les informations recueillies permettraient alors de suivre l'apparition de cette couche sèche et son développement selon les conditions externes, et peut-être pourrions-nous élaborer une explication physique de ce phénomène.

La **perméabilité relative liquide** k_{rl} pourra être évaluée par la méthode inverse et avec l'utilisation de la version bidimensionnelle de *TransPore* pour affiner l'évaluation et s'affranchir de l'effet de la seconde dimension. Une évaluation fine de cette expression permettra peut-être à *TransPore* de simuler la formation de la fine couche sèche décrite précédemment.

Il sera également nécessaire d'étudier l'existence ou non du **retrait partiel** du bois lors de la variation du point de saturation des fibres avec la température, car ce retrait partiel modifie légèrement le niveau des contraintes atteintes durant le séchage.

Dans le but de mieux prédire l'évolution des contraintes avec des conditions de séchage oscillantes, il est nécessaire d'**améliorer la modélisation du fluage mécanosorptif**, notamment son activation avec la température, de modéliser la non-recouvrance de sa déformation, ou encore de vérifier l'existence du couplage des propriétés mécanosorptives et viscoélastiques du matériau.

Approche déterministe

Nous avons vu qu'une conduite de séchage a des effets (qualité et durée) très différents selon le type de débit des avivés, de sorte que le développement de tables de séchage ne peut être réalisé qu'à condition de considérer différents types de débits (paragraphe V.2). Au niveau industriel, les planches sont séchées empilées, et chacune d'elle subit des conditions externes très différentes selon sa position dans la pile. Ainsi, afin d'améliorer encore les possibilités du code, il sera nécessaire de développer une « **approche pile** », capable de traiter le séchage de chacune des planches ainsi que son interaction avec l'ensemble de la pile (évolution de la température et de l'humidité relative de l'air au cours de son passage à travers le lit de planche, etc.).

Les possibilités d'applications de l'outil numérique *TransPore* n'ont été évoquées dans ce travail qu'au travers de quelques exemples, et l'étendue réelle de ses possibilités est beaucoup plus vaste. Il permet d'ores et déjà d'apporter certaines réponses à de nombreuses questions que peuvent se poser les conducteurs de séchoir. Aussi, une version du code avec une interface plus « conviviale » pourrait-elle être envisagée et utilisée dans un **rôle éducatif**.

Références bibliographiques

.A.

Agoua, E. (2001). -Diffusivité et perméabilité du bois: Validation de methodologies experimentales et prise en compte de paramètres morphologiques simples pour la modelisation physique. Thèse, ENGREF, Nancy, 173 p.

Aléon, D., Chanrion, P., Négrié, G., Perez, J., Snieg, O. (1990). -Séchage du bois (Guide Pratique), CTBA, Paris.

Allegretti, O., Rémond, R. and Perré, P. (2003). -A New Experimental Device for Non-Symmetrical Drying Tests – Experimental and Numerical Results for Free and Constrained Samples. 8 th IUFRO Wood Drying, Brasov, Romania, 24 - 29 August.

Ananias, R.A.; Haluk, J.P.; Mougel, E.; Zoulalian, A. (2001).- Discoloration du hêtre *Fagus sylvatica* lors d'un séchage convectif basse température. Les Cahiers Scientifiques du Bois 2: pp15-30.

Awadalla, H.S.F., El-Dib, A.F., Mohamad, M.A., Reuss, M., Hussein, H.M.S. (2004). - Mathematical modelling and experimental verification of wood drying process, Energy Conservation and Management, Vol.45, pp 197-207.

.B.

Badel, E. (1999). -Détermination des propriétés élastiques et du retrait d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse: Description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation. Thèse, Spécialité: Sciences forestières et du bois, Nancy. 163 p

Bardet, S. (2001). -Comportement thermoviscoélastique transverse du bois humide. Thèse, Département Forêt, Montpellier, 226 p

Bary-Lenger, A., Nebout J.P., (1993). -Le chêne .Ed.Perron

Beall, F.C (2002). -Ultrasonic methods to monitor and control lumber drying. 4th COST E15, Santiago de Compostela, Espana

Beall, F. C., Breiner, T. A., Wang, J. (2003) -Control Of Lumber Drying Using Ultrasonic Methods. 8th International IUFRO Wood Drying Conference - Brasov, Romania.

Bengtsson, C. (1997). -Creep in sawn spruce exposed to varying humidity. Influence of raw material parameters. Thesis, Chalmers University of Technology, Division of Steel and Timber Structures, Goteborg.

Bentz, D.P. and Hansen, K.K. (2000). -Preliminary observations of water movement in cement pastes during curing using X-ray absorption, Cement and Concrete Research, Vol.30(7), pp 1157-1168.

Booker.J.D (1994) Acoustic emission and surface checking in Eucalyptus Regnans boards during drying. Holz als Roh und Werstoff, 52, pp 383-388.

Brandao, A. and Perré, P. (1996). -The "Flying Wood" - A quick test to characterise the drying behaviour of tropical woods. 5th International IUFRO Wood Drying Conference- Quebec city, Canada.

Brooke, A.S. and Langrish, T.A.G (1997). -The simulation of stresses and strains in the drying of Pinus radiata sapwood: the effect of board, Computers.Chem.Engng-Pergamon, Vol.21(11), pp 1271-1281.

Bucki, M., Thiercelin, F., Perré, P., 2001 - Un séchoir expérimental qui associe vide, hautes fréquences et convection forcée, Les Cahiers Scientifiques du Bois, volume 2, pp 43-53, ARBOLOR.

Bucki, M. (2004)-Étude expérimentale et simulation numérique d'un procédé de séchage couplé vide et hautes fréquences: Application au bois de chêne- Thèse, ENGREF, Département Sciences Forestières et du Bois, Nancy.

.C.

Canteri, L. (1996). -Transferts et déformations en surface au cours du séchage - estimation de la qualité du matériau bois. Thèse, INPL, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), Nancy.

Carlsson, P. and Tinnsten, M. (2002). -Optimization of drying schedules adapted for a mixture of boards with distribution of sapwood and heartwood, Drying Technology, Vol.20(2), pp 403-418.

Chanrion, P. (1995). -Marché et séchage des sciages feuillus de fortes épaisseurs. Département Bois et Sciage, du Centre et Technique du Bois et de l'Ameublement. Edité par le CTBA.

Comstock, G. L. and Côté W. E. (1968). -Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood, *Wood Science & Technology* 2, pp 279-29.

.D-G.

Demagnet, A. et Morlier, P. (2000). -Mécanismes du collapse du chêne séché sous vide en vapeur d'eau surchauffée, *Annals of Forest Science*, Vol.57, pp 165-179.

Elustondo, D. and Avramidis, S. (2002). -Stochastic numerical model for radio frequency vacuum drying of timbers, *Drying Technology*, Vol.20(N°9), pp 1827-1842.

Gril, J. (1988). -Une modelisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure. Thèse, Université Paris 6, Sciences Physiques, Paris, 268 p

Grossman, P.U.A. (1976). -Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour, *Wood Science and Technology*, Vol.10, pp 163-168.

Guitard, D. (1987). -Mécanique du matériau bois et composites. -Cepadues éditions.

.H.

Hanhijärvi, A. and Hunt, D. (1998). -Experimental indication of interaction between viscoelastic and mechano-sorptive creep, *Wood science and technology*, Vol.32, pp 57-70.

Hanhijärvi, A. (1999). -Deformation properties of finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part II. Experimental results under constant conditions (Viscoelastic creep), *Holz als Roh-und Werstoff*, Vol.57, pp 365-372.

Hanhijärvi, A. (2000). -Deformation properties of finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part IV. Modelling, *Holz als Roh-und Werstoff*, Vol.58, pp 211-216.

Hanhijärvi, A., Helnwein, P. and Ranta-Maunus, A. (2001). -Two-dimensional material model for structural analysis of drying wood as viscoelastic-mechanosorptive-plastic material. 3rd European COST E15 Workshop on wood drying, Helsinki, Finland.

Hanhijärvi, A., Wahl, P., Räsänen, J. and Silvennoinen, R. (2003). -Observation of Development of Microcracks on Wood Surface Caused by Drying Stresses, *Holzforschung*, Vol.57, pp 561-565.

Haque, M.N., Langrish, T.A.G., Keep, L.B. and Keey, R.B. (2000). -Model fitting for viscoelastic creep of *Pinus radiata* during kiln drying, *Wood Science and Technology*, Vol.34(5), pp 447-457.

Hu, J. and Stroeven, P. (2003). -X-ray absorption study of drying cement paste and mortar, *Cement and Concrete Research*, Vol.33(3), pp 397-403.

Hukka, A. (1996). -A simulation program for optimisation of medium temperature drying on an industrial scale. 5th International IUFRO Wood Drying Conference, Quebec City, Canada.

Hunt, D.G. (1997). -Dimensional changes and creep of spruce, and consequent model requirements, *Wood Science and Technology*, Vol.31, pp 3-16.

Hyung-Woo, L., Byung-Nam, K. and Kwang-Nam, K. (2001). -Monitoring the drying characteristics of lumber with image processing technique. 7th International IUFRO Wood Drying Conference, Japan.

I-L.

Irvine, G.M. (1984). -The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis, *Tappi Journal*, Vol.67(5), pp 118-121.

Jensen, S.K., Damkilde, L. and Krabbenhoft, K. (2001). -Non-destructive assessment and FEM simulations of moisture profiles in sitka spruce (*Picea Sitchensis*) during drying. 3rd European COST E15 Workshop on wood drying, Helsinki, Finland.

Joly, P. et F. More-Chevalier (1980). -Théorie, pratique & économie du Séchage des Bois, Editions H.Vial.

Keller, R. (1994). - La constitution du bois (Ch.I). Le bois matériau d'ingénierie. Édité par ARBOLOR. pp14-52.

Kollmann, F. (1968). -Principles of wood science and technology. Berlin, Springer-Verlag, Germany.

Kouchadé, A.C. (2004) - Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par la

méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire. Thèse, ENGREF, Nancy.

Lehmann, E., Vontobel, P., Niemz, P. and Haller, P. (2000). -The method of neutron radiography and its use for wood properties analysis. International Conference on Wood and Wood Fiber Composites, Stuttgart, S. pp 313-323.

.M.

Martensson, A. (1992). -Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations. Thesis, Lund Institute of Technology (THL), Departement of Structural Engineering, Lund, 175 p

Martensson, A. and S. Svensson (1997 a). -Stress-Strain Relationship of Drying Wood. Part 1: developpment of a constitutive Model, *Holzforschung*, Vol.51, pp 472-478.

Martensson, A. and S. Svensson (1997 b). -Stress-Strain Relationship of Drying Wood. Part 2: Verification of a One-Dimensional Model and development of a two-Dimensional model, *Holzforschung*, Vol.51, pp 565-570.

Mauget, B. (1996). -Simulation en grands déplacements du comportement mécanique du bois- Application au séchage dissymétrique et séchage sous charge. Thèse, INPL, Mécanique et Energétique, Nancy, 154 p.

Mauget, B. and Perré, P. (1999). -A large displacement formulation for anisotropic constitutive laws, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol.18, pp 859-877.

Mauritz, R. (1995). -Trocknungsverfahren für starkes Bauholz, *Holz-Zentralblatt*, Vol.121(N°22), pp.362-363.

Min Li, S.A., Luiz Oliveira, Ian D.Hartley (1997). -The Effect of Vertical Air Gaps, Air Velocities and Fan Revolutions on the Drying Characteristics of Thick Pacific Coast Hemlock Lumber, *Holzforschung*, Vol.51, pp 381-387.

Muszynski, L. and Olejniczak, P. (1996). -A Simple Experimental Method to Detrmine Some Basic Parameters for Mechano-Sorptive Creep Model for Wood. 5 th International IUFRO Wood Drying Conference. - Quebec city, Canada.

.N-O.

Navi, p., Pittet, V. and Plummer, C.J.G. (2002). -Transient moisture effects on wood creep, *Wood Science and Technology*, Vol.36, pp 447-462.

Nepveu, G. (1994).- *La Variabilité (Ch.IV). Le bois matériau d'ingénierie*. Édité par ARBOLOR, Nancy, pp128-182.

Nijdam, J.J., Langrish, T.A.G. , Keey, R.B. (2000). -A high-temperature drying model for softwood timber, *Chemical Engineering Science*, Vol.55, pp 3585-3598.

Numerical Recipes in Fortran. The Art of Scientific Computing. (1992) -Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. Cambridge University Press.

Olsson, A. M. and Salmén, L. (1997). -Humidity and temperature affecting hemicellulose softening in wood. Cost Action E8, *Wood Mechanics*, Copenhagen, Denmark.

.P.

Pang, S. and Wiberg, P. (1998). -Model predicted and CT scanned moisture distributed in a *Pinus radiata* board during drying, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol.56(1), pp 9-14.

Pang, S. (2000). -Modelling of stress development during drying and relief during steaming in *Pinus radiata* lumber, *Drying Technology*, Vol.18(8), pp 1677-1696.

Pang, S. (2002). -Effects of sawing pattern on lumber drying: Model simulation and experimental investigation, *Drying Technology*, Vol.20(9), pp 1769-1787.

Passard, J. and Perré, P. (2001). -Creep tests under water-saturated conditions: do the anisotropy ratios of wood change with the temperature and time dependency. 7th International IUFRO Wood Drying Conference. - Tokyo, Japan.

Patankar, S.V. (1980). -*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science. 197 p.

Perré, P. (1987). -*Le séchage convectif de bois de résineux; Choix, Validation et Utilisation d'un Modèle*. Thèse, Université Denis Diderot Paris VII (U.F.R de physique), Paris.

Perré, P. et Degiovanni, A. (1990). -Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température, *J.Heat Mass Transfer*, Vol.33(11), pp 2463-2478.

Perré,P; Moser, M; Martin, M. (1993). -Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air. Pergamon Press Ltd, pp 2725-2746.

Perré, P. and Passard, J. (1995). -A control-volume procedure compared with the finite-element method for calculating stress and strain during wood drying, *Drying Technology*, Vol.13(3), pp 635-660.

Perré, P. and I. W. Turner (1996). -" Using a set of macroscopic equations to simulate heat and mass transfer in porous media: some possibilities illustrated by a wide range of configurations that emphasize the role of internal pressure". *Numerical methods and mathematical modelling of the drying process*, edited by I.W. Turner, A.Mujumdar and Marcel Dekker, pp 83-156.

Perré,P., Thiercelin,F. (1997). -Détermination de l'humidité du bois par détection directe de rayons-X: Validation de la méthode. *Les cahiers scientifiques du bois- Volume 1: Instrumentation*, pp 149-158. Edité par ARBOLOR

Perré, P. and Aguiar, O. (1999). -Fluage du bois "vert " à haute température (120°C): expérimentation et modélisation à l'aide d'éléments de Kelvin thermoactivés, *Ann.Forest.Science*, Vol.56, pp 403-416.

Perré, P. (1999). -How to get a good material model for wood drying simulation ? COST Action E15 Wood Drying Workshop, Edinburgh, Scotland, 13-14 October.

Perré, P. and Turner, I. W. (1999). -A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.42, pp 4501-4521.

Perré, P.; Thiercelin, F.; Osmar, A. (2000). -Prototype high temperature/high pressure kiln for the evaluation of wood drying schedules, *Drying Technology*, Vol.18(8), 1849-1863.

Perré, P. (2001). -The drying of wood: the benefit of fundamental research to shift from improvement to innovation ? 7th International IUFRO Wood Drying Conference, Tsukuba, Japan, 9-13 July.

Perré, P. (2002). -The numerical simulation of drying: A Mature tool available to the wood industry. 4th COST E15 Santiago de Compostela, Espana.

Perré, P. (2003). -The role of wood anatomy in the drying of wood: " great oaks from little acorns grow ". 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania.

Perré, P. and Passard, J. (2004). -A physical and mechanical model able to predict the stress field in wood over a wide range of drying conditions, *Drying Technology Journal*, Vol.22, 1&2, pp 27-44.

Perré, P. (2004) -« Fluid Migration in Wood » in fundamentals aspects of wood drying, 32 p, COST E15 and ARBOLOR, in press.

Perré, P. and Thiercelin, F. (2005) -Evidence of dual scale porous mechanisms during fluid migration in hardwood species: Part I: Using the attenuation of polychromatic x-rays beam to determine the evolution of moisture content during imbibition of beech, *CJChE*, Vol. Submitted.

Plumb, O.A. (1997). -Modelling the effect of heterogeneity on wood drying. In *Mathematical modelling and numerical techniques in drying technology*, edited by I. Turner and A. S. Mujumdar, Marcel Dekker, INC: pp 221-256.

R.

Ranta-Maunus, A. (1975). -The viscoelasticity of wood at varying moisture content, *Wood Science and Technology*, Vol.9, pp 189-205.

Rémond, R. (2001). -Mise au point d'un dispositif expérimental - Etude de la cémentation. DEA Sciences du Bois, Université Henri Poincaré, Nancy.

Rémond, R. Mougel, E. and Perré, P. (2005). - The existence of a thin dry layer during convective drying as possible explanation of the evolution of thickness, temperature and moisture content of Norway Spruce boards, *Drying Technology*, in press.

Resch, H. and Gautsch, E. (2001). -Drying of Lumber in Vacuum Using Dielectric Heating. 3rd European COST E15 Workshop on wood drying, Helsinki, Finland.

Riehl, T. and Welling, J. (2003). -Taking advantage from oscillating climate conditions in industrial timber drying processes. 8th International, IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania.

Rosenberg, E., Schatvet, J. and Høydal, K. (2001). -In-kiln measurements of moisture content in timber at Moelven Våler AS. 3rd European COST E15 Workshop on wood drying, Helsinki, Finland.

Rosenkilde, A. (2002). -Moisture content profiles and surface phenomena during drying of wood. Thesis, KTH, Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering, Stockholm.

.S.

Sales, C. (1984). -Contribution à l'analyse des contraintes de séchage dans le bois. Thèse, INPL, Nancy.

Salin, J.G. (1992). -Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model, *Holz als Roh-und Werkstoff*, Vol.50, pp 195-200

Salin, J.G. (1999). -Simulation Models; From a Scientific Challenge to a Kiln Operator Tool. 6 th International IUFRO Wood Drying Conference, Stellenbosch, South Africa, January. pp 25-28.

Salin, J.G. (2001 a). -Global modelling of kiln drying, taking local variations in the timber stack into consideration. 7th International IUFRO Wood Drying Conference, Tsukuba, Japan.

Salin, J.G. (2001 b). -Information transfer to kiln operators in the form of drying simulation models. 3rd European COST E15 Workshop on wood drying, Helsinki, Finland.

Salin, J.G. (2001 c). -Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwood drying. 3rd European COST E15 Workshop on wood drying, Helsinki, Finland.

Salin, J.G. (2002). -Theoretical Analysis of Mass Transfer From Wooden Surfaces. *In Drying of wood*, 13th International Drying Symposium (IDS), Beijing, China, Vol.C, pp 1834-1826.

Salin, J.G. (2003). -External Heat and Mass Transfer. In *Heat and Mass Transfer*, 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, pp 343-347.

Salin, J.G. (2003). -A theoretical analysis of timber drying in oscillating climates, *Holzforschung*, Vol.57(4), pp 427-732.

Siau, J.F. (1984). -Transport Process in Wood. Berlin, Springer-Verlag.

Sidney Boone, R., Kozlik, C.J., Bois, P.J., Wengert, E.M. (1988). -Dry Kiln Schedules for Commercial Woods. Temperate and Tropical, United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory.

Simpson, W.T. (1991). -Dry Kiln Operator's Manual, U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory.

Svensson, S. (1996). -Experimental Study on the Hygro-Mechanical Behaviour of Drying Wood. 5th International IUFRO Wood Drying Conference, Quebec city, Canada.

Svensson, S. and T. Toratti (2002). -Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity, Wood Science and Technology, Vol.36(2), pp 145-156.

.T.

Terziev, N., Salin, J.G., Söderström, O., Rosenkilde, A. and Temnerud, E. (2002). -Oscillation drying of Scots pine timber. 4th COST E15 Workshop "Methods for Improving Drying Quality of Wood", Santiago de Compostela, Spain, 30-31 May.

Tesoro, F. O, Kimbler, O. K., Choong, E. T. (1972) -Determination of the relative permeability of wood to oil and water. Wood science.5(1), pp 21-26.

Thibaut, B ; Chanson, B. (1992)- Matériau de toujours, technologie d'aujourd'hui : Un nouvel âge du bois. Le travail du bois, Technologie idéologie pratiques. V.11,n. 1-2, pp 113-128.

Timoshenko, S.P. (1968). - Résistance des matériaux, Dunod, Paris, Tome 1.

Toratti, T. and S. Svensson (2000). -Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads, Wood Science and Technology, Vol.34(4), pp 317-326.

Turner, I. W. (1996). -A two dimensional orthotropic model for simulating wood drying processes, Applied Mathematical Modelling, Vol.20.

Turner, I.W. and Mujumdar, A.S. (1997). -Mathematical Modelling and Numerical Techniques in Drying Technology. New York, USA, Marcel Decker, Inc.

.W.

Wilberg, P. and Moren, T. (1999). -Moisture flux determination in wood during drying above saturation point using CT-scanning and digital image processing, Holz als Roh und Werkstoff, Vol.57, pp 137-144.

Wiberg, P. ; Sehlstedt, S.M.B. ; Morén.T.J. (2000). -Heat and Mass Transfer during Sapwood Drying Above the Fibre Saturation Point. Drying Technology, 18(8), pp 1647-1664.

APPROCHE DÉTERMINISTE DU SÉCHAGE DES AVIVÉS DE RÉSINEUX DE FORTES ÉPAISSEURS POUR PROPOSER DES CONDUITES INDUSTRIELLES ADAPTÉES

Résumé

Les sécheurs connaissent des difficultés pour sécher les avivés d'épicéa de fortes épaisseurs avec les séchoirs industriels classiques. Notre étude a pour ambition d'améliorer les connaissances sur le séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs par une approche déterministe. Le code numérique *TransPore*, développé par Patrick Perré, de par sa capacité à simuler les transferts couplés de chaleur et de masse dans une planche de bois, est placé au cœur de notre approche. Notre démarche scientifique a nécessité la mise en place de deux outils :

- ❖ un **dispositif expérimental** a été mis en place pour obtenir des informations descriptives sur les transferts de masse s'effectuant dans la planche au cours de son séchage, et sur les contraintes mécaniques engendrées par le séchage. Ce dispositif mesure en continu l'épaisseur des avivés, les fentes de surface, et le champ de teneur en eau dans la planche par atténuation de rayons X ;
- ❖ une unité de **calcul des contraintes de séchage** a été développée et greffée à *TransPore* (version 1D) pour aborder l'aspect qualitatif du séchage. La formulation mécanique adoptée est monodimensionnelle, et elle prend en compte la courbure éventuelle de la planche pour, par exemple, simuler un séchage dissymétrique.

Les résultats expérimentaux ont ensuite été confrontés aux résultats théoriques pour confirmer et **valider les résultats prédits par la simulation numérique**. La comparaison s'est avérée souvent très probante, tant au niveau des transferts couplés de chaleur et de masse qu'au niveau de l'évaluation des contraintes de séchage.

Ce travail se termine par **l'utilisation du code *TransPore*** comme outil d'aide à la compréhension des mécanismes couplés qui rendent le séchage des fortes épaisseurs particulièrement difficile. Cet outil a montré également sa capacité à guider ses utilisateurs dans le développement de nouvelles conduites de séchage. Cette dernière application ouvre une voie prometteuse vers l'optimisation des tables de séchage.

Mots clefs : *Séchage, avivés de forte épaisseur, résineux, table de séchage, modélisation des contraintes, transferts couplés de chaleur et de masse, profil de teneur en eau, rayons X.*

DETERMINIST APPROACH FOR THICK SOFTWOOD BOARD DRYING TO SUGGEST BETTER DRYING SCHEDULES

Abstract

Wood workers experienced some difficulties when drying thick spruce boards with classical kiln dryer. The aim of our study is to understand drying of thick board thanks to a determinist approach. Computational code *TransPore*, developed by P. Perré and simulating heat and mass transfer in wood board, is the core of our approach. Two new tools have been implemented:

- ❖ an experimental device was built to monitor mass transfer and mechanical stress fields in a board during its drying. This device measures surface checks with a digital camera, and moisture content profile in the thickness of board through X-ray transmission measurements;
- ❖ a numerical module has been realised and added to *TransPore* 1-D to simulate stress field in the board during its drying and therefore able to simulate its quality at the end of the process.

Experimental results have been compared with theoretical results to validate our physical model. Quality of comparisons are quite convincing.

At the end of this work, we have used this model to understand why thick boards are difficult to dry. Moreover, this tool showed its capacity to help its users to develop new drying schedules.

Key words: *Drying, thick wood board, softwood, drying schedules, stress modelling, coupled heat and mass transfers, moisture content profile, X-rays.*