

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR
FRANCE THIBEAULT

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BOIS LORS DU PROCÉDÉ DE
SÉCHAGE CONVENTIONNEL

DÉCEMBRE 2008



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Résumé

La production de bois d'oeuvre passe nécessairement par l'étape de séchage du bois afin d'assurer la stabilité de la teneur en humidité et des dimensions, d'améliorer les propriétés mécaniques et de répondre aux programmes de traitement à la chaleur selon les exigences du marché d'exportation. Cette étape de production entraînant une perte de qualité du produit due à la présence de courbure, des études sont envisagées dans le but d'analyser les phénomènes qui s'y rattachent dans l'optique d'en optimiser le procédé.

À ce jour, les travaux réalisés ont permis de décrire les phénomènes thermo-hydriques du procédé, les lois de comportements thermo-hygro-mécaniques qui s'y rattachent ainsi que les phénomènes d'échanges de chaleur et de masse. De plus, les avancées technologiques au niveau d'outils numériques jumelés à l'accessibilité à d'importantes puissances de calcul permet aujourd'hui de résoudre des problèmes couplés multi-physiques complexes.

L'objectif principal de ce projet est de représenter le comportement déformationnel d'une pièce de bois soumise aux échanges thermo-hydriques lors du procédé de séchage conventionnel. Cet objectif nécessite la création d'un modèle numérique permettant la simulation du comportement mécanique, l'utilisation d'un modèle thermo-hydrique adapté au contexte de séchage ainsi que d'une interface permettant le couplage entre les deux modèles.

Le modèle mécanique permet ici de représenter les propriétés du bois telle la variation des propriétés en fonction de l'orientation des cernes du bois et de prendre en compte le caractère orthotrope

du matériau. Le passage du point de saturation des fibres, le comportement élastomécanosorptif ainsi que le retrait sont considérés au sein des lois de comportement. Le problème global est non linéaire et résolu en régime transitoire. Le couplage entre les aspects thermo-hydriques et mécanique est réalisé en considérant température et humidité fixe sur chaque pas de temps pour la partie mécanique.

La validation numérique a été réalisée à l'aide d'un problème complet de la littérature ce qui a permis d'appuyer la fiabilité de la démarche. En parallèle, un programme expérimental a été réalisé dans le but de cueillir des données sur le procédé permettant la validation du modèle thermo-hydrique dans un contexte d'une application industrielle d'une pièce de bois sous lestage. Une étude de sensibilité aura également permis de cerner l'importance de certains paramètres industriels sur la qualité du produit, en exemple le type de coupe et le phénomène de surséchage seront analysés.

Abstract

The production of timber need drying process to ensure the stability of the moisture content and size, improve the mechanical properties and responding to treatment programs to heat as requirements of the export market. This stage of production resulting in loss of product quality due to the presence of the deformation like twist, cup, crook and bow. Studies are planned in order to analyze the phenomena, to improve and optimize the process and drying practices.

The industrial drying process involves interactions between fluid mechanics, heat transfer, moisture transfer and mechanical phenomena. A three-dimensional mathematical model for the numerical simulation has been developed to described mechanical behavior like deformations and stresses in wood during drying process. This model is coupled with a heat and moisture transfer model based on a diffusion equation with variable diffusion coefficients.

Original Object-Oriented libraries were developed in the finite element toolbox FESh++ to manage internal variables, materials and constitutive laws. The model predictions are validated with theoretical problem of literature and compared with experimental results obtained for industrial condition. A case study has been achieved to determine the impact of some industrial practices.

Avant-propos

Ce projet de recherche aura été réalisé dans le cadre des activités du GRTB - Groupe de recherche sur la thermotransformation de l'Université du Québec à Chicoutimi et du LM2SA - Laboratoire de modélisation en mécanique des solides appliquées. Ce travail a été rendu possible grâce à l'appui financier du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie (CRSNG) dans le cadre d'une bourse d'études supérieures à incidence industrielle en partenariat avec la société AbitibiBowater.

L'accomplissement de ces travaux a été réalisé grâce aux précieux apports des personnes suivantes. Mes cordiaux remerciements vont tout d'abord à l'endroit du professeur Daniel Marceau, directeur du projet de recherche. Son expertise et ses judicieux conseils furent très importants pour l'avancement des travaux et l'évolution de mon autonomie dans ce domaine. Je tiens tout autant à remercier la professeure Duygu Kocaefe, co-directrice et coordonnatrice du GRTB ainsi que M. Ramdane Younsi pour son excellent travail en regard du modèle de transfert de chaleur et de masse. Également, l'appui de David Trahan, directeur d'optimisation et de la qualité des produits chez AbitibiBowater, fut déterminant quant à l'élaboration et le soutien de ce projet. Je dois aussi souligner l'accueil et la coopération des gens de l'entreprise pour leur soutien technique et professionnel ; l'expérience acquise lors de mon séjour en milieu industriel fut très profitable pour mes connaissances professionnelles.

Je remercie sincèrement mon conjoint Luc Dallaire ainsi que mes parents Esther Gagnon et Normand Thibeault pour leurs encouragements qui ont été grandement appréciés.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Avant-propos	iv
Table des matière	viii
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xiii
Symboles	xiv
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	1
1.3 Objectifs	4

1.4	État des connaissances	4
1.4.1	Le bois et sa structure	4
1.4.2	Migration de l'eau	5
1.4.3	Défauts de séchage	6
1.4.4	Description du procédé	9
1.4.5	Travaux scientifiques	14
1.5	Méthodologie	19
1.6	Contenu du mémoire	20
2	Modélisation mathématique du problème thermo-hygro-mécanique	21
2.1	Généralités	21
2.2	Transformation géométrique	21
2.2.1	Orientation des cernes	23
2.2.2	Relations générales entre le système local et le système global	28
2.3	Problème thermo-hydrique	32
2.3.1	Modèle de diffusion	32
2.3.2	Propriétés thermo-hydriques	37
2.4	Problème mécanique	39
2.4.1	Équation d'équilibre	39
2.4.2	Aspect cinématique	40

2.4.3	Principe des travaux virtuels	41
2.4.4	Lois constitutives	43
2.4.4.1	Taux de déformation totale	43
2.4.4.2	Taux de déformation mécanique	44
2.4.4.3	Taux de déformation thermique	45
2.4.4.4	Taux de déformation hydrique	46
2.4.4.5	Taux de déformation mécanosorptive	47
2.4.5	Stratégie de résolution	47
3	Forme discrète et mise en oeuvre informatique	50
3.1	Généralités	50
3.2	Discretisation spatiale	50
3.2.1	Expression des formes linéarisées	54
3.3	Discretisation temporelle	56
3.4	Mise en oeuvre informatique	59
3.4.1	Noyau de calcul FESh++	60
3.4.2	Stratégie d'implémentation	60
3.4.3	Description des classes développées	61
4	Validation du modèle numérique	67
4.1	Généralités	67

4.2	Validation numérique	68
4.2.1	Séchage bidimensionnel	68
4.3	Étude de sensibilité	72
5	Application industrielle	79
5.1	Généralités	79
5.2	Programme expérimental	79
5.2.1	Description du montage	80
5.2.2	Description des données recueillies	83
5.3	Simulation numérique	89
6	Conclusion	99
6.1	Rétrospective	99
6.2	Réflexion sur la méthodologie adaptée	101
6.3	Recommandations et travaux futurs	102

Liste des figures

1.1	Présence de courbures engendrées lors du séchage - dégradation des pièces	2
1.2	Procédé de séchage conventionnel	3
1.3	Structure anatomique du bois [Dietenberger (1999)]	5
1.4	Directions radiale, tangentielle et longitudinale [Dietenberger (1999)]	6
1.5	Défauts et positions de coupe [Dietenberger (1999)]	7
1.6	Type de défauts de courbure : tirant à coeur, torsion, arqué, cambré [Cech (1978)]	7
1.7	Fendillement interne [Dietenberger (1999)]	8
1.8	Étape de production du bois d'oeuvre	9
1.9	Séchoir industriel et centrale thermique	10
1.10	Chargement	11
1.11	Boucle de contrôle [Leger (2003)]	12
1.12	Obstruction de la circulation de l'air	13
1.13	Impact de l'alignement et de la présence des lattes	14

2.1	Direction locale des cernes de bois [Ormarsson (1998)]	22
2.2	Détermination des directions locales en un point	24
2.3	Réduction du tronc en son extrémité	26
2.4	Orientation de la rotation à l'origine de l'angle conique [Ormarsson (1998)]	27
2.5	Orientation de la rotation à l'origine de l'angle spiralé des grains [Ormarsson (1998)]	28
2.6	Algorithme de résolution du problème multi-physique couplé	48
3.1	Discretisation spatiale - maillage du domaine en élément quadratique	52
3.2	Diagramme de la classe base de rotation	61
3.3	Diagramme de la classe matériau	62
3.4	Diagramme de la classe formulation	63
3.5	Diagramme du terme de formulation	63
3.6	Diagramme de la classe loi de comportement élastomécanosorptive	64
3.7	Diagramme de la classe déformation additionnelle due au retrait hydrique	65
3.8	Diagramme de la classe solver transitoire	65
3.9	Diagramme de la classe solver externe	66
3.10	Application thermo-hygro-mécanique	66
4.1	Géométrie de la pièce [Ormarsson (1999)]	68
4.2	Maillage de la pièce	69
4.3	Évolution de la teneur en humidité moyenne de la pièce durant le séchage bidimensionnel	70

4.4	Conditions limites de Dirichlet [Ormarsson (1999)]	71
4.5	Évolution de l'angle de torsion durant le séchage bidimensionnel	71
4.6	Coeur positionné sur la face de la pièce	73
4.7	Coeur positionné vers la rive de la pièce	74
4.8	Patron de la courbe de séchage utilisée lors de l'analyse	74
4.9	Présence de défaut de torsion selon la position du coeur de la bille	75
4.10	Visualisation de la simulation - coeur au centre - présence de torsion	76
4.11	Présence de voilement de face selon la position du coeur de la bille	76
4.12	Présence de voilement de rive selon la position du coeur de la bille	77
4.13	Visualisation de la simulation - coeur sur rive - présence de cambré	78
5.1	Emplacement des échantillons au bas du chargement - partie 1	80
5.2	Échantillons après séchage	81
5.3	Utilisation des lattes et positionnement	81
5.4	Position de l'application de la charge et du support des lattes	82
5.5	Position des thermocouples	82
5.6	Banc de courbure	83
5.7	Courbes de température et d'humidité de l'air et du bois	85
5.8	Courbe de température et d'humidité de l'air - température du bois	86
5.9	Géométrie de la pièce de bois	89

5.10	Noeuds concentrés à la surface	90
5.11	Noeuds concentrés aux surfaces d'application de la charge et surface de contact . . .	90
5.12	Surfaces de contact	93
5.13	Charge de lestage	94
5.14	Coefficient de pénalisation	94
5.15	Comparatif de la teneur en humidité	95
5.16	Comparatif du déplacement de la rive avant	96
5.17	Comparatif du déplacement de la rive arrière	97
5.18	Comparatif de l'angle de torsion	98
5.19	Visualisation du déplacement final de la pièce à son extrémité	98

Liste des tableaux

2.1	Description des propriétés utilisées dans le modèle	38
5.1	Description des instruments de mesure	84
5.2	Description de la précision de lecture et de mesure	84
5.3	Description des dimensions	86
5.4	Description des propriétés géométriques	87
5.5	Description de la vitesse de l'air	87
5.6	Teneur en humidité moyenne de la pièce	87
5.7	Déformation finale de la pièce	88
5.8	Description des propriétés élastiques	91
5.9	Description des propriétés de retrait	91
5.10	Description des propriétés mécano-sorptive	92
5.11	Description des propriétés géométriques pour la pièce analysée	92

Symboles

ϕ	Angle conique
θ	Angle spiralé
c_p	Capacité de chaleur
h_{fg}	Chaleur latente
c_{p0}	Chaleur spécifique du bois à l'état anhydre
c_{pg}	Chaleur spécifique du gaz
c_{pw}	Chaleur spécifique de l'eau
α_q	Coefficient de convection thermique
α_m	Coefficient de convection massique
μ	Coefficient de cisaillement de déformation mécanosorptive
α	Coefficient de déformation hydrique
m	Coefficient axial de déformation mécanosorptive
γ	Coefficient de déformation thermique
D	Coefficient de diffusion
ν	Coefficient de Poisson
k	Conductivité thermique
u, v, w	Coordonnées locales
x, y, z	Coordonnées spatiales
q	Densité de flux de chaleur

j	Densité de flux de masse
ρ'_g	Densité du gaz
ρ_p	Densité du produit
h	Enthalpie
h_m	Enthalpie de la mixture
h_w	Enthalpie de l'eau
h_p	Enthalpie du bois
L	Épaisseur
j_x	Flux de masse
F	Force
F_v	Force volumique
G_m	Gravité spécifique
Δ	Incrément
$[C]$	Matrice élasticité
$[N]$	Matrice fonction de forme
$[K]$	Matrice rigidité
$[A]$	Matrice rotation
$[T]$	Matrice transformation
G	Module de Coulomb
Nu	Nombre de Nusselt
Re	Nombre de Reynolds
Pr	Nombre de Prandtl
Sc	Nombre de Schmidt
Sh	Nombre de Sherwood
n	Normale
$[B]$	Opérateur déformation
PSF	Point de saturation des fibres

P	Pression
S_q	Source de transfert de chaleur
S_m	Source de transfert de masse
ε_e	Taux de déformation élastique
ε_{hy}	Taux de déformation hydrique
ε_{ms}	Taux de déformation mécanosorptive
ε_p	Taux de déformation plastique
ε_{th}	Taux de déformation thermique
ε_v	Taux de déformation viscoélastique
T	Température
T_b	Température ébullition
T_i	Température initiale
t	Temps
ρ_g	Teneur en humidité du gaz
ρ_{wi}	Teneur en humidité initiale
ρ_w	Teneur en humidité du produit
H	Teneur en humidité
σ	Tenseur des contraintes
ε	Tenseur des déformations
$[M]$	Tenseur mécanosorptif
$\bar{\Delta}$	Terme de linéarisation
W	Travail virtuel
\vec{l}	Vecteur unitaire direction local longitudinal
\vec{r}	Vecteur unitaire direction local radial
\vec{t}	Vecteur unitaire direction local tangentiel
v	Vélocité
μ	Viscosité

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

L'industrie du bois d'oeuvre est une composante importante du profil économique de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Dans le contexte de la mondialisation, les industries sont de plus en plus incitées à rendre leurs opérations efficaces. Pour ce faire, chacun des procédés nécessaires à l'élaboration du produit fini est analysé et révisé afin d'en assurer leur utilisation sous des conditions optimales.

Ce chapitre présente le contexte du projet, la problématique et les objectifs fixés dans le cadre de ce projet. De plus, suite à une revue des connaissances sur le sujet, ainsi que des travaux réalisés à ce jour, il y a description de la méthodologie proposée.

1.2 Problématique

En raison des phénomènes complexes en cause dans le matériau, le séchage du bois s'inscrit comme l'une des étapes importantes quant à la perte de qualité du produit. Il est donc nécessaire

d'accorder de l'attention à la compréhension des phénomènes qui s'y rattachent afin de viser l'optimisation de ce processus. Plusieurs travaux ont été réalisés au cours des dernières années dans le but d'opérer le séchage à moindre coût sans réduire pour autant la valeur du produit. Plusieurs études ont été réalisées afin de connaître l'évolution de la distribution de l'air au sein du séchoir, des profils de teneur en humidité et en température dans les pièces de bois. Les chercheurs se concentrent aujourd'hui sur l'étude du comportement mécanique du bois sous l'effet de l'évolution des conditions thermo-hydrauliques au cours de ce processus de séchage.

Le procédé de séchage a pour objectif de permettre une diminution de la teneur en humidité des pièces de bois tout en minimisant le temps de séchage, diminuant l'impact sur le déclassement et minimisant la consommation énergétique. Des conditions modérées lors des premières étapes de séchage minimisent la sévérité des gradients d'humidité et empêchent l'évolution de contraintes élevées. Le phénomène de courbure que l'on rencontre sur les pièces de bois séchées est présenté à la figure 1.1. L'impact de la présence d'une courbure moyenne sur les pièces d'un chargement entraîne le déclassement en moyenne de 20% des pièces, ce qui se traduit par une baisse en moyenne de 4\$/MPMP (mille pied mesure planche) de la valeur d'une production normale. D'autre part, la présence de faibles courbures génère des difficultés de production des produits de deuxième transformation.

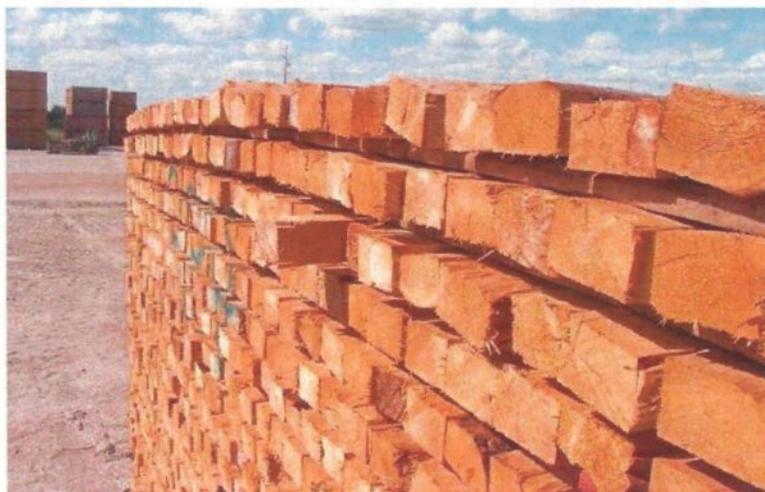


Figure 1.1: Présence de courbures engendrées lors du séchage - dégradation des pièces

Le bois étant un matériau tout à fait particulier, celui-ci possède une grande variabilité de ses propriétés selon l'espèce, la provenance, la densité, la position de la coupe, etc. De plus, ces propriétés sont non uniformes à l'intérieur même de la pièce puisque le bois témoigne d'un comportement localement orthotrope, le type de coupe et de dimension de la pièce sera prédominant sur le comportement de la pièce.

Les difficultés rencontrées dans le procédé proviennent des propriétés hétérogènes du bois, du grand nombre de pièces dans le séchoir, du caractère non uniforme des conditions dans le bâtiment et de la difficulté à réaliser des mesures uniformes de ces variables dans le temps.



Figure 1.2: Procédé de séchage conventionnel

La méthode d'optimisation par expérimentation essai et erreur est coûteuse dans un contexte industriel et de grand volume de production. La simulation numérique, par l'utilisation d'un modèle validé selon un programme expérimental, est donc justifiée afin de permettre la représentation des différents phénomènes thermiques, hydriques et mécaniques rencontrés lors du procédé afin de mieux connaître l'influence de chaque intervention opérationnelle.

1.3 Objectifs

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour principal objectif le développement d'un outil numérique permettant de représenter adéquatement les déformations du bois sous l'action des contraintes générées par les échanges thermo-hydriques se produisant dans le matériau pour des conditions industrielles de séchage. Un tel outil permettra de cibler les paramètres influençant la qualité de séchage dû aux défauts engendrés lors du processus et ainsi, d'en optimiser cette étape de production.

L'outil doit être validé et permettre une bonne représentation du comportement déformationnel d'une pièce de bois en situation retrouvée en industrie.

1.4 État des connaissances

1.4.1 Le bois et sa structure

Le bois contient une structure anatomique complexe. Celle-ci consiste en une multitude de cellules. Les cellules sont les unités minuscules qui forment la structure du bois. Chaque cellule est faite d'une paroi à plusieurs couches entourant une cavité. Le lumen est la cavité à l'intérieur des cellules du bois. La figure 1.3 présente la paroi cellulaire, composée de microfibrilles, petits éléments de la structure de la paroi visible au microscope.

La partie ligneuse de l'arbre mûr se compose essentiellement de deux zones : bois d'aubier et bois de coeur. Chez le bois résineux, l'aubier se caractérise par une teneur en humidité plus élevée que le bois de coeur et est d'une couleur habituellement plus pâle. La principale fonction de l'aubier est de transporter l'eau des racines aux feuilles. La quantité d'humidité dans le bois varie selon les essences, la densité et le degré de séchage.

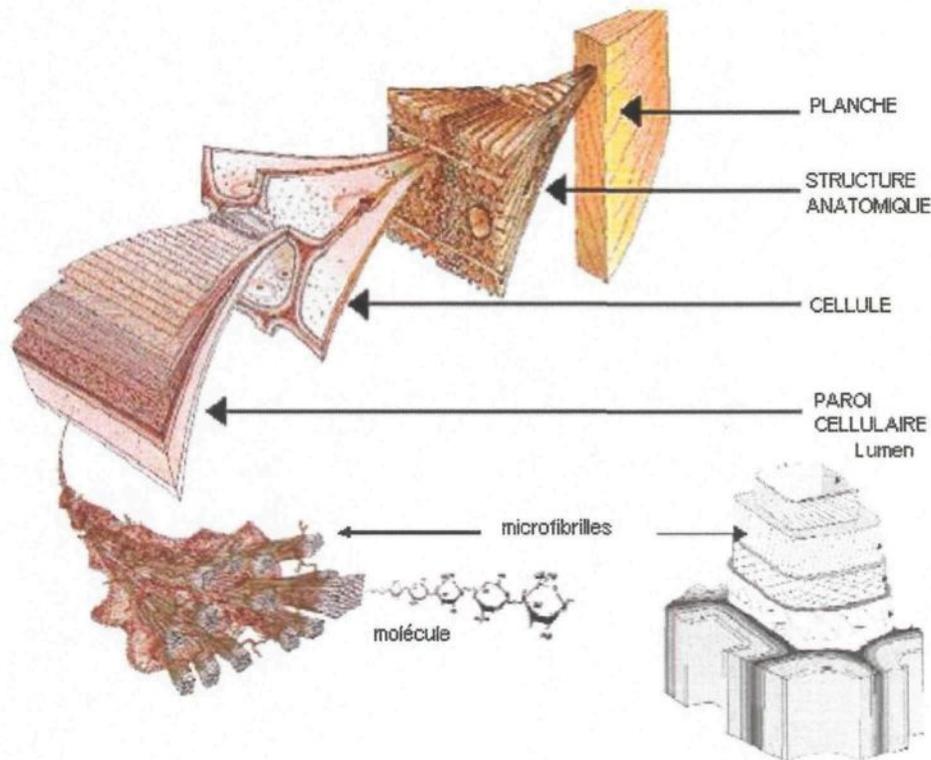


Figure 1.3: Structure anatomique du bois [Dietenberger (1999)]

1.4.2 Migration de l'eau

Le bois est constitué de différents types d'eau. L'eau libre est présente sous forme de liquide ou de vapeur dans les cavités cellulaires alors que l'eau liée, dite « hygroscopique », est retenue dans la structure de la paroi cellulaire.

La teneur en humidité à laquelle la cavité cellulaire est complètement dépourvue d'eau libre alors que la paroi cellulaire est encore entièrement saturée d'eau liée est appelée « point de saturation des fibres » (PSF).

L'eau libre habite les cellules et l'espace libre entre celles-ci. Lorsque l'eau libre s'échappe, les cellules conservent leurs dimensions. Lorsque l'eau liée quitte la paroi, les microfibrilles se rap-

prochent les unes des autres. Cette eau occupant un espace physique, son retrait s'accompagne d'une réduction des dimensions des parois des cellules du bois. Ce phénomène est appelé par les scientifiques et professionnels de l'industrie, le retrait. Il se réalise pour des valeurs différentes dans chacune des directions radiale, tangentielle et longitudinale tel que présentées à la figure 1.4.

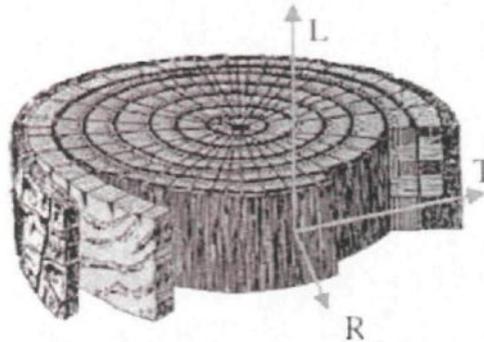


Figure 1.4: Directions radiale, tangentielle et longitudinale [Dietenberger (1999)]

Les facteurs les plus concrets du gradient de teneur en humidité sont la température et la capacité de l'air ambiant à absorber l'humidité, dégagée par les surfaces de la pièce de bois. Le départ de l'eau libre est restreint par la structure cellulaire, à la seule condition que l'air ait la capacité d'absorber l'humidité. L'équilibre hygroscopique s'installe lorsque l'air ambiant n'est plus capable d'absorber l'humidité de la surface du bois.

1.4.3 Défauts de séchage

Il est important d'utiliser des conditions de séchage modérées lors des premières étapes afin de minimiser la sévérité des gradients d'humidité et d'empêcher l'évolution de contraintes élevées. Les principaux types de défaut rencontrés lorsque les contraintes sont suffisamment élevées sont : les gerces de bout et fentes, l'encroûtement, le fendillement interne, l'affaissement et le gauchissement Cech (1978).

Il faut également considérer que l'endroit de la coupe dans la bille influence le comportement de

la pièce lors du séchage. Ceci est dû à l'orthotropie locale du bois. Son comportement se décrit avec des valeurs de coefficient différentes pour chacune des directions radiale, tangentielle et longitudinale, voir la figure 1.4. Notons que la distribution des cernes dans la pièce est différente pour chaque type de coupe (figure 1.5), également, la figure 1.6 présente les différents défauts de courbure que l'on peut retrouver tel que le tirant à coeur, la torsion, le voilement de face et le voilement de rive.

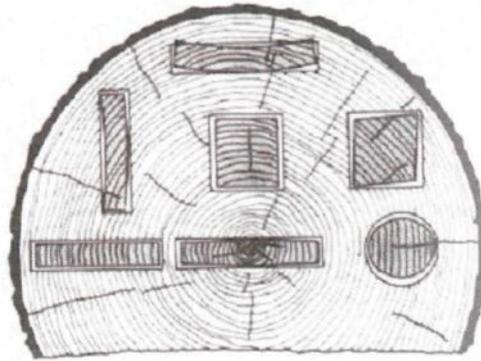


Figure 1.5: Défauts et positions de coupe [Dietenberger (1999)]



Figure 1.6: Type de défauts de courbure : tirant à coeur, torsion, arqué, cambré [Cech (1978)]

Une pièce sèche plus rapidement à ses extrémités qu'en son centre puisque la migration de l'eau dans le sens longitudinal y est considérable. Les bouts se contractent et rendent la planche plus étroite à cet endroit. Le reste de la planche maintient sa dimension ce qui entraîne des contraintes de tension. Ces contraintes sont assez élevées pour générer des gerces de bout et des fentes.

La partie externe et la partie interne de la pièce de bois ont un comportement distinct lors du séchage vu la proximité ou l'éloignement de celles-ci par rapport à l'environnement ambiant du séchoir. Au cours des premiers stades du séchage, la teneur en humidité de la partie externe chute en dessous du PSF alors que la partie interne se maintient au-dessus du PSF. Il y a alors un retrait et les fibres près de la surface sont alors étirées dû à la partie interne qui maintient sa configuration. Plus loin dans le plan d'exécution, la partie interne commence à sécher et à se contracter. Il y a déformation permanente de la partie externe lorsque les contraintes en surface atteignent un seuil élevé, à ce moment, celle-ci tend à maintenir l'intérieur en tension. Des contraintes sont alors installées à l'intérieur de la pièce et y demeureront sauf si l'on conditionne le chargement suffisamment pour les relâcher. En l'absence d'un conditionnement convenable, il y aura encroûtement des pièces. Un bois refendu peut tirer à coeur par suite d'encroûtement, le conditionnement était alors insuffisant pour la relaxation des contraintes de séchage.

Aussi, le fendillement interne croît à l'intérieur du bois pendant les dernières phases de séchage sous forme de fissuration. La partie interne passe de la compression à la tension au moment où les fibres internes désirent se contracter. La partie externe résiste au retrait de la partie interne en tirant sur celle-ci, créant ainsi le fendillement tel que montré à la figure 1.7.



Figure 1.7: Fendillement interne [Dietenberger (1999)]

Le gauchissement est la tendance de la pièce à rétrécir plus dans une direction que dans une autre. Il est directement lié aux différences qui existent entre les coefficients de retrait radial, tangentiel ou longitudinal. On retrouve ce type de défaut dans l'ensemble du chargement. Les pièces situées sur le dessus du chargement sont plus nombreuses à présenter ce défaut. Cependant, ce défaut est retrouvé à tout endroit dans le chargement. On le note également plus prononcé chez l'épinette noire par rapport aux autres essences.

1.4.4 Description du procédé

Lors de la production du bois d'oeuvre, le séchage du bois fait suite au sciage des pièces. Le bois de sciage est séché afin d'assurer la stabilité dimensionnelle et de la teneur en humidité, d'améliorer les propriétés mécaniques et également pour répondre aux programmes de bois traité à la chaleur exigés par les marchés d'exportation. Par la suite et tel que présenté à la figure 1.8, le bois est acheminé au rabotage où la finition et la classification sont réalisées.



Figure 1.8: Étape de production du bois d'oeuvre

Le séchoir est un bâtiment permettant de contrôler les conditions conduisant le bois à migrer son eau vers le milieu ambiant, la figure 1.9 illustre un séchoir conventionnel. Sa géométrie est conçue afin de fournir et contrôler les conditions de température, humidité relative et circulation de l'air. Il possède des dimensions permettant le séchage de plus de 200 000 PMP (pied mesure planche).

Il s'agit d'un bâtiment de dimension de grande envergure ce qui rend complexe le contrôle des conditions du séchoir. C'est aussi la raison pour laquelle les conditions diffèrent pour chaque pièce tout dépendamment de sa position dans le séchoir et dans le paquet même.

Les principales installations à l'intérieur du bâtiment sont un système de chauffage, humidifica-



Figure 1.9: Séchoir industriel et centrale thermique

tion, ventilation et événements. Le réseau de vapeur est constitué de conduits de vapeurs, serpentins et purgeurs. L'humidification se fait par atomiseurs d'eau et injection de vapeur. La ventilation est composée de nombreux ventilateurs disposés sur la longueur du séchoir. L'amenée d'air frais et le rejet d'humidité dans l'air se fait par des événements installés sur le dessus du bâtiment.

La capacité d'un séchoir à bien sécher le bois est influencée par la qualité de son design. En effet, le séchoir doit, du point de vue énergétique, être bien isolé dans le but de réduire au minimum la condensation sur les parois, diminuer les pertes de puissances par échange de chaleur avec l'extérieur et éviter les infiltrations et exfiltrations d'air qui augmenteraient la demande en humidification. Finalement, la disposition des serpentins à l'intérieur du séchoir doit permettre une distribution uniforme de la chaleur.

Les différentes sources de chauffage utilisées dans le séchoir sont : la vapeur, l'eau chaude, l'huile chaude ou à feu direct. Les séchoirs étudiés utilisent la vapeur comme source de chauffage, ils requièrent des chaudières pour générer la vapeur. La distribution de la chaleur se fait par les serpentins de chauffage qui sont positionnés de façon à obtenir un transfert de chaleur uniforme de haut en bas sur toute la longueur du séchoir, soit au centre du séchoir et/ou au plafond près des ventilateurs.

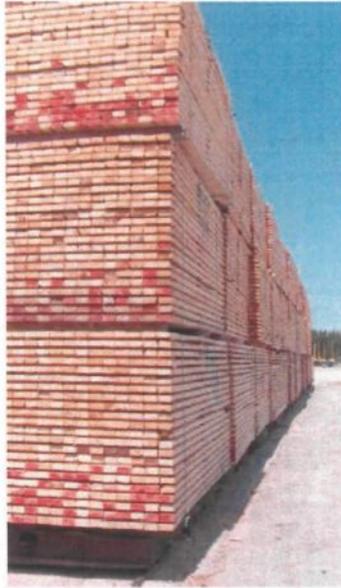


Figure 1.10: Chargement

Le chargement est réalisé par machinerie lourde. Cette opération est importante puisqu'elle doit être réalisée convenablement. La figure 1.10 présente un chargement conforme où chaque pièce est bien positionnée.

La commande du procédé de séchage est basée sur l'atteinte d'une évolution optimale de la teneur en humidité en étant dirigée par un critère d'optimisation du déclassement, de temps et de l'énergie.

Le contrôle du séchage se fait dans le mode d'une boucle PID (proportionnel intégral différentiel). Cette boucle, permet de réguler les conditions de température et d'humidité relative dans le bâtiment. La figure 1.11 présente la boucle de contrôle avec comme valeur de sortie la teneur en humidité, où TH_c est la teneur en humidité de consigne et TH_m est la teneur en humidité mesurée. L'on retrouve certain programme de séchage du bois résineux basés soit sur le temps, sur la teneur en humidité du bois ou sur la différence de température au travers du bois.

Selon le programme de séchage déterminé, le système de contrôle détermine le moment de la progression dans le plan d'exécution et intervient lors d'un changement de phase.

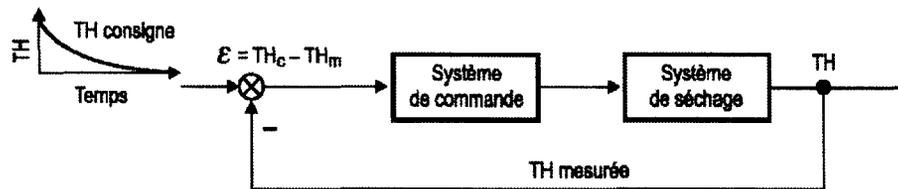


Figure 1.11: Boucle de contrôle [Leger (2003)]

Les pièces de bois à sécher ont une teneur en humidité initiale très variée selon l'essence et la zone de coupe pouvant aller de 30% à 100%. Le séchage conventionnel a pour but de réduire cette teneur en humidité du bois de 15% à 18% dans le bois résineux destiné au domaine de la construction et de 7% à 8% dans le bois feuillu qui est plutôt relié au marché des produits d'apparences.

Les paramètres d'opération sont la température de l'air, l'humidité relative de l'air et la vitesse de l'air à l'intérieur d'un programme de séchage. Les aspects géométriques impliquent l'épaisseur des lattes, le nombre de piles dans un rang, l'épaisseur et la longueur du bois, la classification du bois et la longueur de course de l'air. Les aspects associés à la matière première sont l'espèce, la teneur en humidité initiale, la densité ainsi que la provenance.

Les pratiques industrielles concernent à la fois les opérations de la cour avant et après séchage, le contrôle du séchoir, les interventions sur les programmes de séchage et les pratiques en général. L'ensemble des actions et interventions ont une incidence sur les résultats du procédé. Il y a possibilité d'intervenir à tout moment sur le programme de séchage selon le type de contrôleur utilisé.

Dans l'industrie, nous sommes en présence de différents programmes pour chaque secteur. Entre autres, des ajustements sont faits pour différents types de chargement pour chacune des périodes de l'année selon les conditions extérieures, la provenance, la densité, l'espèce et la teneur en humidité initiale du chargement.

L'industrie identifie la qualité et la teneur en humidité finale comme les éléments les plus significatifs pour évaluer le rendement du séchage. Présentement, la conservation de la qualité lors du

séchage et l'effet du procédé sur la qualité de l'ensemble des pièces sont difficilement mesurables puisqu'il est difficile de faire le suivi entre la valeur des pièces à la sortie du sciage et celle à la sortie du séchage. Ainsi, il est difficile pour les opérateurs de quantifier l'effet d'un changement du programme sur la qualité et la déformation des pièces séchées. De plus, chaque chargement contient des pièces avec une densité, une provenance et une teneur en humidité initiale propre à elles.

Voici en somme, l'ensemble des opérations comportant des enjeux importants. Le chargement et l'empilement des pièces et des paquets ont une influence sur la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment. La figure 1.12 présente une obstruction de l'air sur plusieurs rangées, ceci engendrera des conditions non uniformes de température et d'humidité relative autour des pièces. Une pièce mal positionnée entraîne un engorgement de l'air pour l'ensemble de sa rangée où celle-ci est positionnée. De plus, sa position engendrera une mauvaise application du poids des pièces supérieures pour l'ensemble des pièces qui l'entourent.

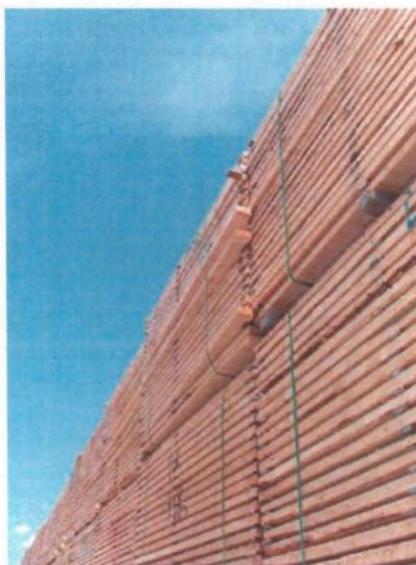


Figure 1.12: Obstruction de la circulation de l'air

Chaque chargement comporte des propriétés différentes. En effet, les chargements peuvent différer selon leur provenance, dimension, densité, essence, teneur en humidité initiale. L'ensemble de ces

caractéristiques entraînera un comportement différent puisqu'un programme de séchage aura un effet différent sur chacun. Par exemple, chaque essence nécessite un certain type de programme.

Puisque le bois témoigne d'un comportement orthotrope, le type de coupe et la dimension de la pièce seront prédominants sur le comportement de la pièce dus à la distribution des contraintes et déformations induites à l'intérieur de celle-ci.

Une part des facteurs pouvant être contrôlés sont les opérations et manutentions entourant le procédé de séchage tels que l'empilement des paquets, le chargement et l'entreposage. Par exemple, l'effet de l'alignement des travers et la présence de lattes est présenté à la figure 1.13, ceux-ci auront un impact sur la qualité finale du produit.



Figure 1.13: Impact de l'alignement et de la présence des lattes

1.4.5 Travaux scientifiques

Afin d'être familiarisé au contexte du séchage du bois et des équipements entourant le procédé, le parcours des sommaires intéressants sur l'ensemble des pratiques de séchage conventionnel du bois a été réalisé par Leger (2003) et Cech (1978). Ils permettent de prendre en compte le contexte actuel des séchoirs à bois, les méthodes de contrôle utilisées, les problématiques rencontrées. Entre autres, ils

apportent une description détaillée du procédé de séchage : programme de séchage, système de commande, opérations, régulation des températures de l'air et instrumentation. De plus, ils font une revue de la recherche et du développement sur le contrôle des séchoirs à bois : les modèles décrivant le comportement du bois au séchage, les modèles cherchant l'évolution optimale de la teneur en humidité et les modèles permettant d'appliquer automatiquement un séchage optimal. Ross (2004) présente un modèle général de l'anatomie macroscopique d'un arbre et les différentes parties microscopiques dont il est composé. Il explique les parties qui composent un arbre ; l'écorce, la zone cambiale, le bois d'aubier, le duramen jusqu'à la moelle. La description des principaux constituants du bois : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, permet de comprendre les caractéristiques qui définissent les propriétés mécaniques du bois.

Afin d'aborder une première démarche de recherche sur le domaine, de nombreux travaux ont été réalisés au niveau des modèles de transfert de chaleur et de masse dans le bois lors du séchage par Younsi (2006c), Martinovic (2001) et Tremblay (1998). Ces ouvrages ont permis d'être guidé vers des ouvrages connexes au domaine du séchage.

Également, Benrabah (2002) et Moutee (2006) ont permis plus spécifiquement de cerner l'approche mathématique afin de réaliser la modélisation tridimensionnelle par éléments finis des phénomènes thermo-hydriques dans les milieux poreux tels le bois et le béton. Dans ces travaux, le traitement de l'anisotropie du bois est abordé. Un matériau anisotrope possède des propriétés qui varient pour chacune des directions globales selon laquelle on les évalue. Par exemple, les directions locales sont liées au repère à l'intérieur même du matériau, par exemple le sens des fibres du bois. Alors que les directions globales sont liées au repère définissant la position de la pièce par rapport à son environnement.

Osma (2004), Younsi (2006a), Kocaefe (2007b) et Osma (sera publié en 2009) ont influencé particulièrement les travaux de ce mémoire par l'utilisation d'un modèle de diffusion utilisé précédemment pour le procédé de traitement du bois à haute température et adapté au contexte de séchage. Ceux-ci présentent un modèle mathématique tridimensionnel transitoire utilisé pour simuler le comportement

thermo-hydrigue du bois lors du traitement à haute température. Le modèle est basé selon l'approche de Luikov et celui-ci résoud les problèmes couplés de transfert de chaleur et de masse. Le phénomène de transfert d'humidité inclut la convection de vapeur d'eau, la diffusion de l'eau libre et la diffusion de l'eau liée.

Les principales propriétés mécaniques du bois sont présentées par Dietsberger (1999) et Ormarsson (1998), et plus particulièrement pour l'essence épinette noire par Blanchet (2004). Ces articles présentent les valeurs des paramètres élastiques dans les différentes directions tels Module de Young, coefficient de Poisson, Module de Coulomb, coefficient de retrait et de mécanosorption. Entre autres, Bodig (1993) procurent de nombreuses notions intéressantes telles : les contraintes, efforts et déformations, l'élasticité du bois et son orthotropie locale, les caractéristiques rhéologiques et l'influence des facteurs environnementaux (humidité et température) sur les propriétés du bois.

Les travaux de Widehammar (2004), Kang (2004) et Svensson (2002) présentent les premières analyses des contraintes et déformations qui apparaissent au cours du séchage. Ils permettent la visualisation de différents paramètres influençant le comportement mécanique du matériau. Ces paramètres étudiés sont : l'effet des dimensions, l'effet de la variation d'humidité et l'effet de la variation de température. Pang (2002) et Kang (2002a) discutent particulièrement du phénomène de retrait et de ses différents facteurs alors que Takahashi (2004), Houska (2000) et Svensson (1996) vont jusqu'à faire des comparatifs entre les différentes contributions de déformation tel que retrait, mécanosorption et fluage. Le comportement viscoélastique du bois en cours de séchage fut abordé par Fafard (2001), Haque (2000) et Lin (1996). Ces travaux ont permis de connaître le phénomène de fluage et de relaxation et différents modèles mécaniques et équations constitutives utilisées : modèle de Kelvin-Voigt, Maxwell et Burgers. Ces modèles présentés peuvent être appliqués à un contexte multidimensionnel pour des matériaux isotropes. Il est cependant plus difficile d'utiliser cette approche dans le cas d'un matériau orthotrope localement tel le bois. Ce modèle pose les paramètres à être identifiés en fonction de l'humidité et de la température, qui elles-mêmes varient dans le temps. Une analyse de la sensibilité paramétrique a permis de constater le rôle important du coefficient de Poisson sur la variation des résultats.

Sous les conditions du procédé de séchage, la structure du bois est soumise à des changements en température et en humidité. Sous ces gradients de température et de teneur en humidité, le comportement mécanique se retrouve sous des déformations due à plusieurs composantes : le retrait, la mécanosorption, les déformations reliées au comportement élastique, le fluage viscoélastique et l'expansion thermique. Plusieurs travaux ont été réalisés dans le but de développer des modèles prédictifs du comportement du bois en tenant compte de l'ensemble de ces composantes. Les déformations de retrait, mécanosorptive et élastique sont bien décrites par Chassagne (2003) et Kang (2002b). Certains modèles ont été développés en omettant le fluage viscoélastique Dahlblom (2003), Ormarsson (1999). Ceux-ci justifient cette exemption du fait que cette composante est relativement faible sous des conditions de séchage basse température par rapport à la composante mécanosorptive. Au regard de Kang (2004), négliger l'effet du fluage viscoélastique résulte en un petit écart lors de l'analyse des contraintes lors du séchage puisque le fluage est plus petit en magnitude que la mécanosorption lors de grandes variations de teneur en humidité. Toratti (2000) proposent un ratio entre les composantes de déformation de retrait, à la mécanosorption, au comportement élastique et au fluage comme étant estimé à 12 : 5 : 1 : 0,2.

Le traitement de l'anisotropie du bois a été différemment abordé dans Hermanson (1997). Cette approche considère l'orientation des grains de la fibre où a été prélevée la pièce, soit avec les grains droits ou les grains spiralés. La matrice transformation du système local au système global y est décrite.

Les travaux de Dahlblom (1996) sont très significatifs, et portent sur les équations nécessaires à la formulation du modèle. Il présente de quelle manière la déformation totale se décrit en plusieurs parties : la déformation mécanique (domaine élastique), thermique, hydrique et mécano-sorptive. Martensson (1996) traitent du même sujet tout en ayant une approche différente et intéressante de la résolution du problème. Entre autres, il inclut le fluage dans les composantes du taux de déformation totale.

Dahlblom (2003) appliquent la méthode des éléments finis (MEF) à la simulation des déforma-

tions développées dans le bois durant le séchage. Dans le modèle constitutif utilisé, la structure du matériau est considérée anisotrope globalement et orthotrope localement. Les différentes valeurs des propriétés dans la direction longitudinale, radiale et tangentielle tels les paramètres de la déformation due au retrait et la déformation mécanosorptive sont pris en compte. Également, la variation des propriétés du matériau en fonction de l'éloignement du centre de la bille est considérée.

Ormarsson (2001) appliquent également la MEF à la simulation des déformations sur le bois au cours du séchage. Ces travaux sont concentrés sur l'influence de l'orientation des fibres sur la stabilité de la pièce de bois. Des essais expérimentaux ont été effectués afin de considérer la densité, angle des grains, paramètres du retrait et module élastique dans des pièces présentant beaucoup de bois de compression.

Kirbach (1990) déterminent brièvement les facteurs pouvant affecter le procédé de séchage. Ces facteurs pouvant être à partir des opérations de sciage, la pose des lattes dans le paquet, la préparation à l'entreposage et le chargement sur les rails du séchoir.

Cronin (1996) décrivent les conditions du procédé de séchage. Entre autres, le taux de séchage, la teneur en humidité, la température du bulbe humide, la température du bulbe sec et la vitesse des gaz. Ils proposent l'optimisation du procédé de séchage par le développement d'un module de simulation. La solution numérique décrit la température, la pression interne et la distribution de l'humidité étant fonctions des coordonnées spatiales et du temps.

Des outils numériques efficaces permettant la résolution de système d'équations complexes dans le cadre de problèmes multi-physiques sont développés par Burnett (1987) et Dhatt and Touzot (1981). Ils fournissent les concepts de base à propos de la méthode des éléments finis : travaux virtuels, formulation variationnelle, pondération de type Galerkin. Y est décrit la notion de rotation dans un second repère, matrice transformation utilisée pour la rotation de tenseur du 2e et 4e ordre. Un chapitre complet traite la théorie de l'élasticité et est disponible auprès de Timoshenko (1961). D'autre part, Fortin (2001) présente les différentes approches de résolution numérique tel que l'intégration numérique et la méthode de Newton-Raphson.

Une approche de développement du code de calcul FESh++ est abordé à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette structure particulière par approche orientée objet permet la construction d'un problème multi-physique fortement couplé développé par Marceau (2005), Goulet (2004) et Richard (2004).

1.5 Méthodologie

En regard des travaux antérieurs, l'approche proposée consiste à coupler un modèle de transfert de chaleur et de masse à la résolution du problème mécanique. Ce dernier est défini sur la base de la décomposition additive du tenseur taux de déformation en ses composantes associées aux phénomènes mécanique, hydrique et mécano-sorptive tel que $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_m + \dot{\epsilon}_{hy} + \dot{\epsilon}_{ms} + \dot{\epsilon}_v + \dot{\epsilon}_{th}$ en négligeant la contribution thermique et viscoélastique.

Le problème global à résoudre est transitoire et fortement non linéaire. L'approche par un modèle faiblement couplé fait en sorte que les résultats du modèle de transfert de chaleur et de masse aura un impact sur le comportement mécanique de la pièce. Cette approche est valide en mettant en hypothèse que les déformations et contraintes mécaniques auront un impact négligeable sur les phénomènes de transfert de chaleur et de masse. Les couplages faibles entre les aspects thermo-hydrique et mécanique permettent de poser une stratégie de résolution de type point fixe en résolvant, pour chaque pas de temps, le problème thermo-hydrique et de résoudre la partie mécanique à température et humidité fixes. Pour ce faire, un interface entre les deux modèles est nécessaire afin de récupérer les champs de température et de teneur en humidité.

Une démarche de validation permet de s'assurer que la résolution des modèles thermo-hydrique et mécanique correspond aux résultats obtenus à l'aide de problème théorique simple. D'autre part, une étude de sensibilité permet d'analyser l'influence de certains paramètres industriels. La réalisation d'un programme expérimental permet de recueillir l'information sur les conditions d'opération de séchage en milieu industriel et de prendre en compte la déformation finale d'une pièce soumise à

ces conditions. Suite à la validation du modèle et à la récupération de données expérimentales, l'outil numérique est utilisé lors d'une résolution du séchage d'une pièce de bois dans un contexte industriel.

1.6 Contenu du mémoire

Ce mémoire est subdivisé en 6 chapitres : le chapitre 1 présente le contexte, la problématique et les objectifs des travaux de ce projet. Également, la description des différents concepts de base du procédé de séchage et les travaux scientifiques réalisés à ce jour connexe au sujet de ce projet y sont présentés. Le chapitre 2 présente les notions théoriques concernant la transformation géométrique, le modèle de transfert de chaleur et de masse ainsi que le modèle mécanique. Le chapitre 3 présente les formes discrètes, la résolution numérique et la mise en oeuvre informatique. Le chapitre 4 présente la validation de l'outil numérique et une étude de sensibilité. Le chapitre 5 présente la résolution d'un problème industriel et le montage expérimental qui a permis la cueillette d'informations sur les conditions du procédé. Finalement, le chapitre 6 présente une rétrospective de la réalisation des travaux, la méthodologie et les recommandations pour les travaux futurs.

Chapitre 2

Modélisation mathématique du problème thermo-hygro-mécanique

2.1 Généralités

Ce chapitre présente les équations des modèles utilisés tels que le modèle de transfert de chaleur et de masse ainsi que le modèle mécanique. Entre autres, il y a la description de la construction de la matrice transformation en tenant compte du repère local des directions longitudinale, radiale et tangentielle ainsi que l'effet de l'orientation des grains spiralés et de l'angle conique. De plus, les paramètres du modèle de diffusion et les équations d'écoulement de l'air sont décrits. D'autre part, les équations d'équilibre, équations cinématiques et lois constitutives du modèle mécanique sont définies à l'intérieur de ce chapitre.

2.2 Transformation géométrique

Les équations constitutives doivent être transformées du système de coordonnées local (l, r, t) vers le système de coordonnées global (x, y, z) présenté à la figure 2.1. Cette transformation est réalisée

en trois étapes, soit l'étape de prendre en compte l'orientation des cernes du bois à une position déterminée selon le centre de la bille, en second lieu de prendre en compte l'impact de l'angle conique et enfin l'impact de l'angle des grains spiralés.

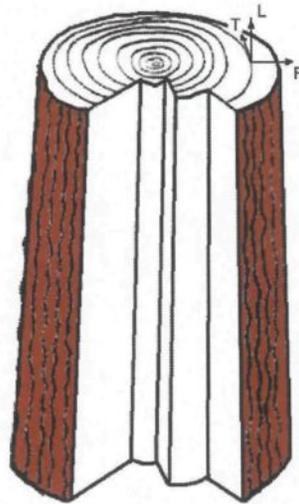


Figure 2.1: Direction locale des cernes de bois [Ormarsson (1998)]

Un point quelconque ayant ses coordonnées dans le repère global peut se décrire, tel qu'à l'équation 2.1, dans le repère local comme fonction des vecteurs unitaires dans les sens longitudinal, radial et tangential tels que

$$\vec{V}_{xyz} = V_l \vec{l} + V_r \vec{r} + V_t \vec{t} \quad (2.1)$$

ou sous forme matricielle

$$\{V_{xyz}\} = A\{V_{lr}\} \quad (2.2)$$

$$\text{avec } \{\vec{V}_{xyz}\} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix}, \{\vec{V}_{lrt}\} = \begin{Bmatrix} V_l \\ V_r \\ V_t \end{Bmatrix} \text{ et } A = \begin{bmatrix} l_x & r_x & t_x \\ l_y & r_y & t_y \\ l_z & r_z & t_z \end{bmatrix}$$

2.2.1 Orientation des cernes

En ne considérant que l'orientation des cernes sans les effets d'angle conique et de grains spiralés, la relation entre les coordonnées (x, y, z) et (l, r, t) s'écrit selon l'équation 2.3 :

$$\begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{ox} & r_{ox} & t_{ox} \\ l_{oy} & r_{oy} & t_{oy} \\ l_{oz} & r_{oz} & t_{oz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{l_o} \\ V_{r_o} \\ V_{t_o} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

Les vecteurs unitaires des directions longitudinal, radial et tangentiel sont \vec{l}_o , \vec{r}_o et \vec{t}_o , tels que :

$$\vec{l}_o = \{l_{ox} \quad l_{oy} \quad l_{oz}\} \quad (2.4)$$

$$\vec{r}_o = \{r_{ox} \quad r_{oy} \quad r_{oz}\} \quad (2.5)$$

$$\vec{t}_o = \{t_{ox} \quad t_{oy} \quad t_{oz}\} \quad (2.6)$$

Ces vecteurs unitaires sont définis par Ormarsson (1998). Ces directions coïncident avec les directions orthotropes du bois si aucun des effets de grains spiralés et de la forme conique de la bille de bois sont présents dans le matériau à ce point de l'étude. La figure 2.2 présente sommairement la méthode d'identification des directions locales en un point.

L'axe du centre de la bille est défini par le vecteur axial \vec{L}

Le vecteur \vec{Q} est une projection du vecteur \vec{N} sur l'axe longitudinal qui correspond à la direction de l'axe du centre de la bille, c'est-à-dire :

$$\vec{Q} = \vec{l}_0 (\vec{N} \cdot \vec{l}_0) \quad (2.11)$$

Le vecteur \vec{R} , perpendiculaire à l'axe central de la bille et à la surface du cylindre, est donné par :

$$\vec{R} = \vec{N} - \vec{Q} \quad (2.12)$$

Le vecteur unitaire dans le sens radial des fibres est décrit tel que :

$$\vec{r}_0 = \frac{\vec{R}}{|\vec{R}|} \quad (2.13)$$

Finalement, le vecteur unitaire dans le sens tangentiel est obtenu par

$$\vec{t}_0 = \vec{l}_0 \times \vec{r}_0 \quad (2.14)$$

La relation définie entre les systèmes de coordonnées locale et globale peut être écrite à l'aide de la matrice transformation orthogonale A_o décrite tel que :

$$A_o = \begin{bmatrix} a_{l_o}^x & a_{r_o}^x & a_{t_o}^x \\ a_{l_o}^y & a_{r_o}^y & a_{t_o}^y \\ a_{l_o}^z & a_{r_o}^z & a_{t_o}^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{ox} & r_{ox} & t_{ox} \\ l_{oy} & r_{oy} & t_{oy} \\ l_{oz} & r_{oz} & t_{oz} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

pour laquelle $l_{ox}, r_{ox}, t_{ox}, l_{oy}, r_{oy}, t_{oy}, l_{oz}, r_{oz}$ et t_{oz} sont les composantes des vecteurs unitaires \vec{l}_o, \vec{r}_o et \vec{t}_o .

La deuxième étape de la transformation géométrique est de considérer l'effet de l'angle conique ϕ . La figure 2.3 présente la tendance du tronc à réduire son diamètre à l'extrémité. L'angle conique origine de ce phénomène.

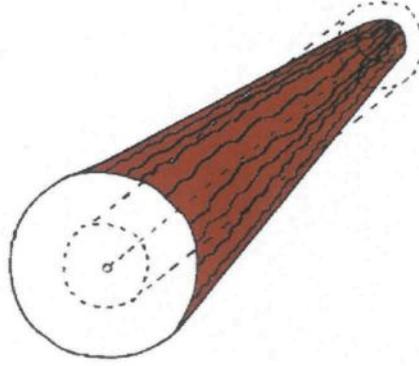


Figure 2.3: Réduction du tronc en son extrémité

La direction de la rotation de l'angle conique suit celle de la rotation autour de l'axe tangentiel (figure). La matrice transformation orthogonale A_c est donnée par :

$$A_c = \begin{bmatrix} a_{l_c}^{l_o} & a_{r_c}^{l_o} & a_{t_c}^{l_o} \\ a_{l_c}^{r_o} & a_{r_c}^{r_o} & a_{t_c}^{r_o} \\ a_{l_c}^{t_o} & a_{r_c}^{t_o} & a_{t_c}^{t_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La troisième étape de la transformation est de considérer l'angle de grain spiralé θ . La direction de la rotation de l'angle spiralé se fait autour de l'axe radial (figure 2.5). Cet angle est positif lorsque la rotation est positive autour de l'axe radial.

L'angle de grain spiralé est défini comme l'angle dans le plan $\vec{l}_c \vec{t}_c$ entre le vecteur unitaire \vec{l}_c et la

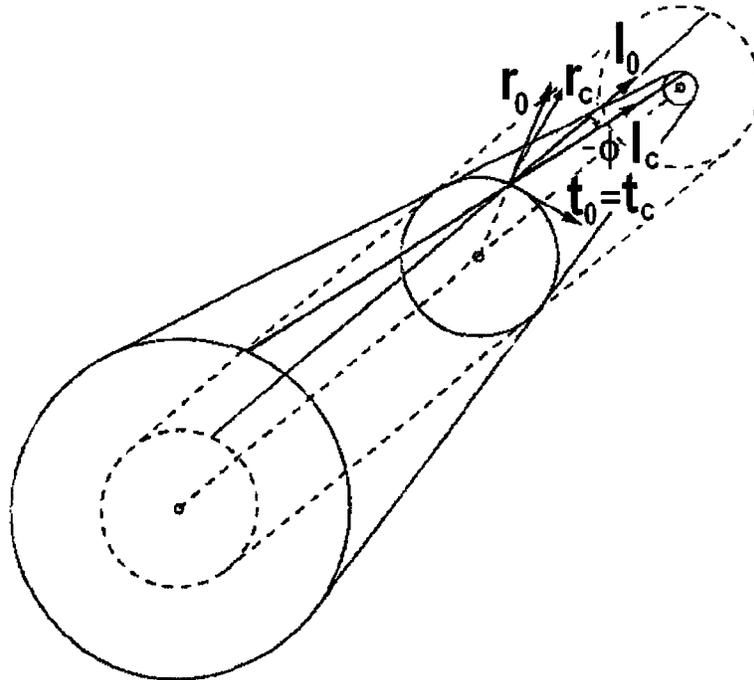


Figure 2.4: Orientation de la rotation à l'origine de l'angle conique [Ormarsson (1998)]

direction des fibres \vec{l} . La matrice transformation orthogonale A_s est :

$$A_s = \begin{bmatrix} a_l^c & a_r^c & a_t^c \\ a_l^c & a_r^c & a_t^c \\ a_l^c & a_r^c & a_t^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

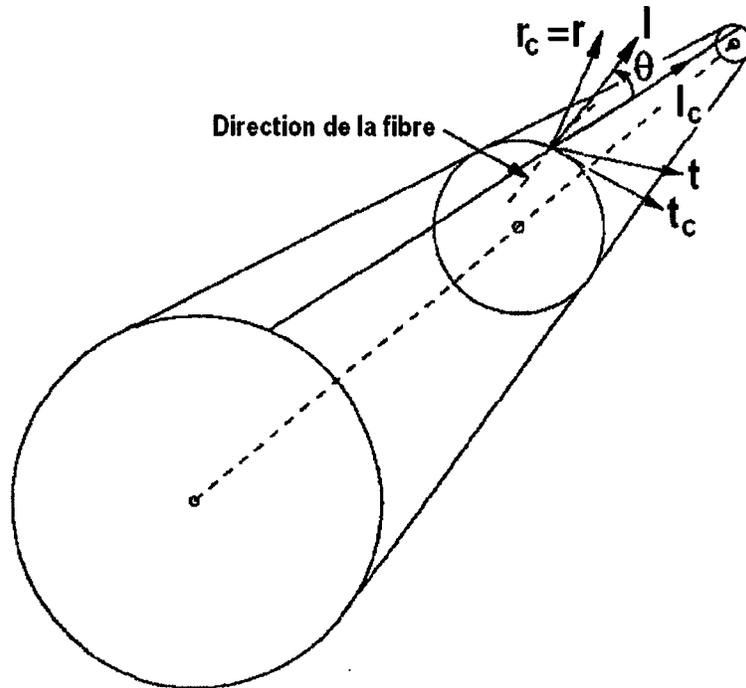


Figure 2.5: Orientation de la rotation à l'origine de l'angle spiralé des grains [Ormarsson (1998)]

2.2.2 Relations générales entre le système local et le système global

Ceci décrit la relation entre le système de coordonnées local et le système de coordonnées global qui est exprimée par :

$$\begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

où

$$A = \begin{bmatrix} a_l^x & a_r^x & a_t^x \\ a_l^y & a_r^y & a_t^y \\ a_l^z & a_r^z & a_t^z \end{bmatrix} = A_o A_c A_s \quad (2.19)$$

On peut donc décrire la matrice A tel que :

$$A = \begin{bmatrix} l_{ox} & r_{ox} & t_{ox} \\ l_{oy} & r_{oy} & t_{oy} \\ l_{oz} & r_{oz} & t_{oz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

La matrice A est utilisée afin de transporter un point du repère global xyz au repère local lrt.

Transport d'un point

L'équation 2.22 permet de présenter le transport d'un point du repère local vers le repère global à l'aide de la matrice A.

$$P' = [A]^T P \quad (2.22)$$

Transport d'un tenseur du 2^e ordre

Afin de construire la matrice transformation, qui permettra la rotation des tenseurs de 2^e et 4^e ordre, il y a utilisation des termes de la matrice A. La construction des matrices faisant partie de la matrice transformation globale est faite tel que :

$$T_{11} = \begin{bmatrix} a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 \\ b_1^2 & b_2^2 & b_3^2 \\ c_1^2 & c_2^2 & c_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$T_{12} = \begin{bmatrix} a_1a_2 & a_1a_3 & a_2a_3 \\ b_1b_2 & b_1b_3 & b_2b_3 \\ c_1c_2 & c_1c_3 & c_2c_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$T_{21} = \begin{bmatrix} a_1b_1 & a_2b_2 & a_3b_3 \\ a_1c_1 & a_2c_2 & a_3c_3 \\ b_1c_1 & b_2c_2 & b_3c_3 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$T_{22} = \begin{bmatrix} a_1b_2 + a_2b_1 & a_1b_3 + a_3b_1 & a_2b_3 + a_3b_2 \\ a_1c_2 + a_2c_1 & a_1c_3 + a_3c_1 & a_2c_3 + a_3c_2 \\ b_1c_2 + b_2c_1 & b_1c_3 + b_3c_1 & b_2c_3 + b_3c_2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

On définit la rotation d'un tenseur du 2ième ordre du repère local au repère global tel que :

$$\{\sigma'\} = [T_\sigma]\{\sigma\} \quad (2.27)$$

où

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} [T_{11}] & 2[T_{12}] \\ [T_{21}] & [T_{22}] \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

On définit la rotation du tenseur de déformation de la forme :

$$\{\epsilon'\} = [T_\epsilon]\{\epsilon\} \quad (2.29)$$

où

$$[T_\epsilon] = \begin{bmatrix} [T_{11}] & [T_{12}] \\ 2[T_{21}] & [T_{22}] \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

alors que

$$[T_\sigma]^{-1} = [T_\epsilon]^T \quad (2.31)$$

et

$$[T_\epsilon]^{-1} = [T_\sigma]^T \quad (2.32)$$

Transport d'un tenseur du 4^e ordre

De plus, on détermine la rotation d'un tenseur du 4^{ième} ordre du repère global au repère local à partir de :

$$[H] = [T_\epsilon]^T [H'] [T_\epsilon] \quad (2.33)$$

2.3 Problème thermo-hydrique

Les équations de transport sont principalement régissent selon la loi de Fourier et la loi de Fick. Le transfert de chaleur est provoqué par un gradient de température. De façon générale, la loi de Fourier présente la densité du flux de chaleur dans l'axe x selon la forme de l'équation 2.34.

$$q_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.34)$$

Selon la loi de Fick, le flux de masse est proportionnel au gradient de concentration en humidité, cet énoncé est décrit tel que :

$$j_x = -D_x \frac{\partial \rho_w}{\partial x} \quad (2.35)$$

2.3.1 Modèle de diffusion

L'utilisation de modèle thermo-hydrique permet de représenter les phénomènes d'écoulement de l'air, de transferts de masse et de chaleur afin d'expliquer ces mécanismes dans le contexte du procédé de séchage du bois. Plusieurs approches sont utilisées pour représenter le comportement du bois tel que l'approche de Luikov, par diffusion et selon une approche multiphasique. Selon l'étude de ces trois approches par Kocaefe (2007b), le modèle de diffusion apparaît être le mieux adapté selon qu'il nécessite une quantité moins élevée de constante et de propriétés du matériau, qu'il offre une bonne exactitude des résultats par rapport aux résultats expérimentaux et selon un temps restreint de résolution numérique.

Le modèle 3D proposé résout les équations de transfert de chaleur et de masse dans le bois aussi bien que celles de transfert de chaleur et de masse et d'écoulement dans le gaz. Les phénomènes de transfert dans le bois sont traités selon les directions (longitudinale, radiale et tangentielle). Une

interface entre le bois et le gaz permet de lier l'ensemble des transferts qui ont lieu à la fois dans le gaz et à l'intérieur du bois. L'interface entre le gaz et le bois relie ceux-ci à partir des conditions aux limites des équations de transfert pour le bois et à l'intérieur des termes de source en température S_q et source en humidité S_m dans les équations de transfert pour le gaz.

Les équations de continuité et de conservation du mouvement sont décrites selon les équations 2.36 et 2.37.

$$\frac{\partial \rho'_g}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{v} \cdot \rho'_g) = 0 \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \rho'_g \mathbf{v}}{\partial t} + \text{div}(\rho'_g \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) - \text{div}(\mu \text{grad} \mathbf{v}) = F_v - \text{div} P + \text{div}(\mu \text{div} \mathbf{v}) \quad (2.37)$$

Les équations de transfert de chaleur et de masse permettant de résoudre la distribution de température et d'humidité selon l'écoulement du gaz sont déterminés à partir de Kocaefe (2007a) et pour lesquelles ρ'_g représente la densité du gaz et ρ_g la teneur en humidité du gaz :

$$\rho'_g c_p \frac{\partial T_g}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{v} \rho c_p T_g) + \text{div}(k_g \nabla T_g) + S_q \quad (2.38)$$

$$\rho'_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} = -\text{div}(\rho'_g \mathbf{v} \rho_g) + \text{div}(D_g \nabla \rho_g) + S_m \quad (2.39)$$

Les équations du transfert de chaleur, de masse et d'écoulement sont résolues simultanément pour le gaz au sein du code commercial CFX. Pour le bois, les équations de transfert de chaleur et de masse sont résolues simultanément par l'approche volume finis.

Selon les bilans d'énergie, le couplage entre les deux mécanismes en 3D est décrit selon Younsi (2006b).

L'équation du transfert de chaleur est présentée telle que :

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.40)$$

L'équation du transfert de masse est présentée tel que :

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \rho_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \rho_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \rho_w}{\partial z} \right) \quad (2.41)$$

Les conditions aux limites sont gouvernées par le gaz autour de la pièce et sont représentées selon les conditions de convection.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_q (T - T_g) + \alpha_m h_{fg} (\rho_w - \rho_g) \quad (2.42)$$

avec

$$-D \frac{\partial \rho_w}{\partial n} = \alpha_m (\rho_w - \rho_g) \quad (2.43)$$

Initialement, on émet l'hypothèse d'une température et teneur en humidité uniformes dans le spécimen au temps 0, les conditions initiales sont exprimées alors :

$$T = T_i \quad (2.44)$$

et

$$\rho_w = \rho_{wi} \quad (2.45)$$

ρ_m est la densité de la mixture définie par la densité du produit ρ_p et la teneur en humidité ρ_w :

$$\rho_m = \rho_p + \rho_w \quad (2.46)$$

De façon similaire, l'enthalpie de la mixture h_m est obtenue à partir :

$$h_m = \frac{\rho_p}{\rho_m} h_p + \frac{\rho_w}{\rho_m} h_w \quad (2.47)$$

Où l'enthalpie du bois h_p et l'enthalpie de l'eau h_w sont définies respectivement par les équations 2.48 et 2.50.

L'enthalpie varie en fonction de la température et de la capacité de chaleur du matériau.

$$h_p = c_p T \quad (2.48)$$

L'enthalpie de l'eau varie selon que la température est au-dessus ou sous la température du point d'ébullition.

$$h_w = \begin{cases} c_{pl} & T < T_b \\ h_l + xh_{fg} & T = T_b \\ h_g + c_{pg}(T - T_b) & T > T_b \end{cases} \quad (2.49)$$

Le coefficient de diffusion varie principalement en fonction de la teneur en humidité sous le point de saturation des fibres. Le modèle couvre pour toutes les phases de la teneur en humidité, autant au-dessus du point de saturation des fibres par la diffusion de l'eau à l'intérieur des lumens, ainsi qu'au-dessous de ce point limite par la diffusion de l'eau liée à l'intérieur des parois cellulaires. Particulièrement, au-dessus du point de saturation des fibres ces coefficients sont fonction de la teneur en humidité à ce point limite tel que :

$$D = \begin{cases} f(\rho_w, T) & \rho_w < \rho_{wFSP} \\ f(\rho_{wFSP}, T) & \rho_w \geq \rho_{wFSP} \end{cases} \quad (2.50)$$

Quant à lui, le coefficient de conductivité est principalement fonction de la teneur en humidité tel que

$$k = f(\rho_w, T) \quad (2.51)$$

Les coefficients de transfert de masse α_q et de transfert de chaleur α_m sont déterminés à partir des nombres de Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr) et Sherwood (Sh) selon les équations,

$$Nu = \frac{\alpha_q L}{k} = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (2.52)$$

et

$$Sh = \frac{\alpha_m L}{D} = 0.664 Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (2.53)$$

2.3.2 Propriétés thermo-hydriques

L'utilisation des propriétés du bois propres aux essences à l'étude est nécessaire pour l'obtention de résultats justes avec les valeurs obtenues en industrie. La densité (ρ) et la chaleur spécifique (c_p) sont fonction de la teneur en humidité tel que :

$$\rho = 1000G_m \left(\frac{1 + \rho_w}{100} \right) \quad (2.54)$$

et

$$c_p = \left(\frac{c_{p0} + 0.01c_{pw}\rho_w}{1 + 0.01\rho_w} \right) + A_c \quad (2.55)$$

où c_{pw} est la chaleur spécifique de l'eau. La chaleur spécifique du bois à l'état anhydre c_{p0} varie en fonction de la température tel que :

$$c_{p0} = 0.1031 + 0.003867T \quad (2.56)$$

et

$$A_c = \rho_w (-0.06191 + 2.36e^{-4T} - 1.33e^{-4}\rho_w) \quad (2.57)$$

La conductivité thermique du bois k dans le sens longitudinal est doublement plus élevée que le coefficient de conductivité pour les directions radial et tangentiel tels que

$$k_r = k_t = \frac{1}{2}k_l = G_m(0.1941 + 0.004064\rho_w) + 0.01864 \quad (2.58)$$

où G_m est la gravité spécifique.

Voici dans le tableau 2.1, les propriétés thermodynamiques et de transport du gaz et de l'eau, les propriétés physiques du bois pour l'essence (épinette noire).

Tableau 2.1: Description des propriétés utilisées dans le modèle

Propriété	Unité	Valeur et expression
M_{FSP}		$0.57315 - 0.001T$
G_m		0.43
v_a		$1 - G_m(0.667 + \rho_w)$
D	$[m^2s^{-1}]$	$\frac{\sqrt{v_a}D_{bt}D_v}{(1-v_a)(\sqrt{v_a}D_{bt} + (1-v_a)D_v)}$
D_v	$[m^2s^{-1}]$	$\frac{1.29e^{-13}(1.0+1.54M)p_sT_K^{1.5}}{(T_K+245.18)} \frac{d\phi}{d\rho_w}$
D_{bt}	$[m^2s^{-1}]$	$exp(-9.9 + 9.8\rho_w - 4300/T_K)$
p_s	$[Pa]$	$3390exp(-1.74 + 0.0759T_C - 0.000424T_C^2 + 2.44e^{-6}T_C^3)$
h_l	$[Jkg^{-1}]$	419000
h_g	$[Jkg^{-1}]$	2676000
c_{pl}	$[Jkg^{-1}K]$	4185
c_{pg}	$[Jkg^{-1}K]$	2000
α_m	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	$1e^{-4}$
α_q	$[Wm^{-1}K^{-1}]$	30
ρ_{wi}	$[kgm^{-3}]$	35
ρ_g	$[kgm^{-3}]$	$\rho_g(t)$
T_g	$[K]$	$T_g(t)$

2.4 Problème mécanique

Afin de caractériser le comportement du bois, la maîtrise des notions mécaniques et de ces équations est nécessaire.

Cette analyse est basée sur les hypothèses suivantes :

- Le phénomène thermo-hydrique influence le phénomène mécanique ;
- Le phénomène mécanique n’influence pas le phénomène thermo-hydrique ;
- La problématique se situe dans un contexte de petites déformations mais grand déplacement ;
- Le bois est considéré un matériau localement orthotrope et globalement anisotrope.

Afin de déterminer la distribution des contraintes et des déformations d’un corps, nous nous basons sur les principes d’équilibre des forces sur un domaine statique. Nous sommes alors en présence d’un système dont les contraintes sont inconnues. Il faut alors établir la relation entre les déformations et les contraintes et le lien entre les déplacements et les déformations pour obtenir un système à plusieurs équations. Ce système comprend les équations d’équilibre, les équations cinématiques et les lois constitutives.

- $\sum_i F_i = 0$, Équations d’équilibre, 3 équations - 6 inconnus ;
- $\varepsilon = f(u)$, Équations cinématiques, 6 équations - 3 inconnus ;
- $\sigma = f(\varepsilon)$, Lois constitutives, 6 équations - 6 inconnus.

2.4.1 Équation d’équilibre

Selon le principe d’équilibre statique, la sommation des forces est égale à zéro :

$$\sum_i F_i = 0 \tag{2.59}$$

avec $i = 1 \dots 3$

Les équations d'équilibre 2.60a, 2.60b et 2.60c en régime quasi statique s'écrivent :

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + F_{v1} = 0 \quad (2.60a)$$

$$\frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + F_{v2} = 0 \quad (2.60b)$$

$$\frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + F_{v3} = 0 \quad (2.60c)$$

Où σ_{11} , σ_{22} et σ_{33} sont les contraintes normales et σ_{12} , σ_{13} et σ_{23} sont les contraintes de cisaillement exprimées dans les coordonnées globales du système (x_1, x_2, x_3) .

- σ_{ij} contraintes ;
- x_j directions ;
- F_{vj} forces volumiques.

Les équations 2.60a, 2.60b et 2.60c peuvent également s'écrire sous la forme :

$$\text{div} \vec{\sigma} + \vec{f}_v = \vec{0} \quad (2.61)$$

2.4.2 Aspect cinématique

Chacun des termes qui composent les gradients de déplacement doivent être considérés en conséquence aux grands déplacements qui peuvent être présents à l'intérieur du problème. Les gradients des déplacements sont définis selon les termes de Green-Lagrange telles les relations suivantes :

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x_1} \right)^2 \right] \quad (2.62a)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x_2} \right)^2 \right] \quad (2.62b)$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{\partial w}{\partial x_3} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x_3} \right)^2 \right] \quad (2.62c)$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{21} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial x_1} \frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_1} \frac{\partial w}{\partial x_2} \right] \quad (2.62d)$$

$$\gamma_{13} = \gamma_{31} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial x_3} + \frac{\partial w}{\partial x_1} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial x_1} \frac{\partial u}{\partial x_3} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \frac{\partial v}{\partial x_3} + \frac{\partial w}{\partial x_1} \frac{\partial w}{\partial x_3} \right] \quad (2.62e)$$

$$\gamma_{23} = \gamma_{32} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial x_3} + \frac{\partial w}{\partial x_2} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial x_2} \frac{\partial u}{\partial x_3} + \frac{\partial v}{\partial x_2} \frac{\partial v}{\partial x_3} + \frac{\partial w}{\partial x_2} \frac{\partial w}{\partial x_3} \right] \quad (2.62f)$$

2.4.3 Principe des travaux virtuels

Considérons un mouvement virtuel défini par un champ de déplacements virtuels. Le travail virtuel W est décrit comme la somme des déplacements multipliés par la force totale dans la même direction. Puisque la sommation des forces est à l'équilibre, la forme forte du travail virtuel présente qu'il est égal à zéro en chaque endroit sur le domaine à l'étude.

$$W = u_i^* \left(\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + F_{vi} \right) = 0 \quad (2.63)$$

$$\forall u_i^*$$

avec

- u_i^* déplacements virtuels ;
- σ_{ji} contraintes ;
- F_{vi} forces volumiques.

Le travail virtuel est également défini sous une forme faible. Celle-ci stipule que pour un domaine donné, l'ensemble des travaux virtuels sur celui-ci est nul.

$$W = \int_{\mathcal{V}} u_i^* \left(\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + F_{vi} \right) d\Omega = 0 \quad (2.64)$$

$$\forall u_i^*$$

À l'aide d'une pondération de Galerkin nous pouvons établir le lien entre la forme faible et la forme variationnelle :

$$W = \int_{\mathcal{V}} \epsilon_i^* \sigma_{ij} dV - \int_{\mathcal{V}} u_i^* f_{vi} dV - \int_s u_i^* f_{si} dS = 0 \quad (2.65)$$

Le travail virtuel est alors présenté en deux composantes, soit les travaux virtuels internes et les travaux virtuels externes :

$$W = w_{int} - w_{ext} = 0 \quad (2.66)$$

Les travaux virtuels internes comprennent les travaux engendrés par les contraintes internes qui sont liées directement à la loi de comportement du matériau.

w_{int} , le travail interne, s'écrit sous la forme :

$$w_{int} = \int_{\mathcal{V}} \epsilon_i^* \sigma_{ij} dV \quad (2.67)$$

Les travaux externes sont reliés aux notions de contraintes amenées par des sollicitations externes. Ainsi, c'est au sein des travaux virtuels que s'inscrivent les conditions limites et les termes de contour.

w_{ext} , le travail externe, s'exprime comme suit :

$$w_{ext} = \int_V u_i^* f_{vi} dV + \int_S u_i^* f_{si} dS = 0 \quad (2.68)$$

avec

- u_i^* déplacements virtuels ;
- ϵ_i^* déformations virtuelles.

2.4.4 Lois constitutives

2.4.4.1 Taux de déformation totale

Le taux de déformation totale, dans le repère local, se décrit comme la somme des taux de déformations mécaniques, hydriques, thermiques et mécanosorptive tel que :

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_m + \dot{\epsilon}_{th} + \dot{\epsilon}_{hy} + \dot{\epsilon}_{ms} \quad (2.69)$$

où

- $\dot{\epsilon}$ taux de déformation totale ;
- $\dot{\epsilon}_m$ taux de déformations mécaniques ;
- $\dot{\epsilon}_{th}$ taux de déformations thermiques ;
- $\dot{\epsilon}_{hy}$ taux de déformations hydriques ;
- $\dot{\epsilon}_{ms}$ taux de déformations mécanosorptive.

Où chaque terme est déterminé dans le système de coordonnées du repère local.

2.4.4.2 Taux de déformation mécanique

Le taux de déformation mécanique est égal à la somme des déformations élastiques et plastiques. La problématique est résolue seulement dans le domaine élastique. Le taux de déformation mécanique est alors défini tel que :

$$\dot{\epsilon}_m = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_p = \dot{\epsilon}_e \quad (2.70)$$

Selon la loi de Hooke, la déformation élastique dans le repère local, s'écrit :

$$\epsilon_e = C\sigma \quad (2.71)$$

où C est la matrice de flexibilité, celle-ci est composée de propriétés pouvant varier en fonction de la température, de l'humidité et de la position par rapport au centre de la bille tel que

$$C = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_t} & \frac{-\nu_{rt}}{E_r} & \frac{-\nu_{rl}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{lr}}{E_t} & \frac{1}{E_r} & \frac{-\nu_{lr}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{lt}}{E_t} & \frac{-\nu_{rt}}{E_r} & \frac{1}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{lr}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{lt}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{rt}} \end{pmatrix} \quad (2.72)$$

où E_i , ν_{ij} et G_{ij} sont respectivement les modules de Young, coefficients de Poisson et modules de Coulomb.

Le taux de déformation élastique $\dot{\epsilon}_e$ est obtenu à partir de l'équation :

$$\dot{\epsilon}_e = C\dot{\sigma} + \dot{C}\sigma \quad (2.73)$$

Les termes de la matrice C sont constants dans le temps et sa dérivée est donc égale à zéro. L'équation 2.73 s'écrit alors :

$$\dot{\epsilon}_e = C\dot{\sigma} \quad (2.74)$$

Puisque la déformation mécanique est d'origine élastique, les équations 2.73 et 2.74 peuvent être réécrites sous la forme :

$$\dot{\epsilon}_e = \dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_{th} - \dot{\epsilon}_{hy} - \dot{\epsilon}_{ms} \quad (2.75)$$

où $\dot{\epsilon}$ et $\dot{\sigma}$, le taux de déformation totale et le taux de contrainte sont définis dans le repère local tel que :

$$\dot{\epsilon} = \langle \dot{\epsilon}_l \quad \dot{\epsilon}_r \quad \dot{\epsilon}_t \quad \dot{\gamma}_{lr} \quad \dot{\gamma}_{lt} \quad \dot{\gamma}_{rt} \rangle^T \quad (2.76)$$

et

$$\dot{\sigma} = \langle \dot{\sigma}_l \quad \dot{\sigma}_r \quad \dot{\sigma}_t \quad \dot{\tau}_{lr} \quad \dot{\tau}_{lt} \quad \dot{\tau}_{rt} \rangle^T \quad (2.77)$$

2.4.4.3 Taux de déformation thermique

Lorsque la température du matériau augmente, cela entraîne un gonflement. L'expansion thermique est due à la variation de température que l'on observe dans le bois lors du séchage. Le taux de déformation thermique s'écrit :

$$\dot{\epsilon}_{th} = \gamma \dot{T} \quad (2.78)$$

- \dot{T} taux de variation de la température ;
- γ coefficient de déformation thermique.

Pour lequel les coefficients dans le sens radial, tangential et longitudinal du système local s'écrivent :

$$\gamma = \left(\gamma_t \quad \gamma_r \quad \gamma_l \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right)^T \quad (2.79)$$

2.4.4.4 Taux de déformation hydrique

Lorsque la teneur en humidité varie sous le point de saturation des fibres, il y aura retrait ou gonflement. La déformation hydrique est due à ce phénomène, le retrait, que l'on observe dans le bois lors du séchage. Le taux de déformation hydrique décrit dans le repère local s'écrit :

$$\dot{\epsilon}_{hy} = \alpha \dot{H}_{PSF} \quad (2.80)$$

- \dot{H}_{PSF} taux de variation de la teneur en humidité sous le point de saturation des fibres ;
- α coefficient de déformation hydrique.

Pour lequel les coefficients de retrait dans le sens radial, tangential et longitudinal du système local s'écrivent :

$$\alpha = \left(\alpha_t \quad \alpha_r \quad \alpha_l \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right)^T \quad (2.81)$$

Lorsque la teneur en humidité est au-dessus du point de saturation des fibres, ces coefficients sont égaux à zéro.

Les termes \dot{H}_{PSF} et \dot{T} présents dans l'équation 2.80 et 2.78 sont à l'origine du couplage entre les phénomènes thermo-hydrique et le comportement mécanique du matériau.

2.4.4.5 Taux de déformation mécanosorptive

Une pièce de bois soumise à une charge et à un changement de teneur en humidité présentera plus de déformation qu'une pièce sous chargement avec une teneur en humidité constante. Ce phénomène est appelé la mécanosorption. La déformation mécanosorptive est une composante importante de la déformation totale du bois au cours du procédé de séchage. Elle apparaît en tant que conséquence de la variation de la teneur en humidité lorsque le bois est soumis à une contrainte. Ce comportement est observé comme un accroissement du retrait ou gonflement sous des conditions de chargement constant et de variation de la teneur en humidité.

$$\dot{\epsilon}_{ms} = m\sigma|\dot{H}_{PSF}| \quad (2.82)$$

où σ et $|\dot{H}_{PSF}|$ sont respectivement la matrice des contraintes et la valeur absolue du taux de variation de la teneur en humidité sous le point de saturation des fibres et m la matrice des propriétés de mécanosorption, les coefficients μ_{ij} et m_{ij} , tel que

$$m = \begin{pmatrix} m_l & -\mu_{rl}m_r & -\mu_{tl}m_t & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{lr}m_l & m_r & -\mu_{tr}m_t & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{lt}m_l & -\mu_{rt}m_r & m_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{lr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{lt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{rt} \end{pmatrix} \quad (2.83)$$

2.4.5 Stratégie de résolution

L'algorithme de résolution de la figure 2.6 présente la stratégie adoptée. À la vue de cette figure, le noyau de calcul FESh++ est au coeur des développements.

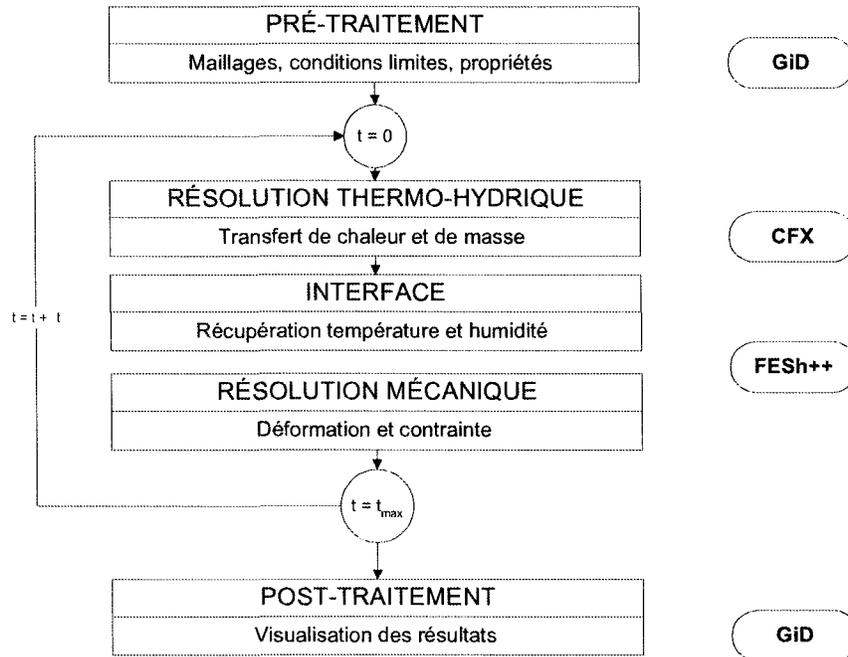


Figure 2.6: Algorithme de résolution du problème multi-physique couplé

Le problème de transfert de chaleur et de masse est résolu afin de décrire les phénomènes d'échange et de déterminer la distribution de la température et de la teneur en humidité de la pièce à l'étude. Cette résolution est faite indépendamment de la résolution mécanique, elle permet la résolution transitoire dans un repère global 3D à l'aide de la méthode des volumes finis implémentée à l'aide du langage fortran dans le modèle de transfert de chaleur et de masse de Younsi (2006c).

Les couplages faibles entre les aspects thermo-hydrrique et mécanique sont pris en compte en posant une stratégie de résolution de type point fixe en résolvant, pour chaque pas de temps, le problème thermo-hydrrique et de résoudre la partie mécanique à température et humidité fixes provenant du modèle de transfert de chaleur et de masse. Pour ce faire, l'interface CFX-FESh++ est nécessaire afin de récupérer les champs de température et de teneur en humidité provenant du modèle thermo-hydrrique et de les transmettre au modèle mécanique.

Le modèle mécanique ainsi que le solveur global sont implantés dans le noyau de calcul par

éléments finis orienté objet FESh++ de Marceau (2005). Le modèle mécanique contient la transformation géométrique du repère local et global, l'approche des travaux virtuels et équation d'équilibre, les aspects cinématiques et les lois de comportements.

Chapitre 3

Forme discrète et mise en oeuvre informatique

3.1 Généralités

Jusqu'à maintenant, les formulations présentées au chapitre 2 ont décrit les expressions mathématiques des phénomènes utilisées dans le modèle mécanique. D'autre part, ces expressions ne permettent pas la détermination d'une solution analytique par la résolution directe de ces équations dû à la présence de non-linéarités géométriques et matérielles. L'utilisation de méthodes numériques pour la résolution du problème s'avère nécessaire afin d'obtenir une solution des expressions établies. Ce chapitre présente l'implémentation de ce modèle dans un code de calcul basé sur une approche orientée objet.

3.2 Discrétisation spatiale

La résolution de problèmes continus implique des phénomènes physiques décrits à partir de système d'équations différentielles. Les techniques mathématiques permettant d'aborder de tels systèmes

d'équations sur un problème continu sont limités à une résolution selon une situation très simplifiée.

Différentes méthodes de discrétisation sont proposées afin de résoudre un problème continu selon une approximation se rapprochant de la solution exacte. La méthode de discrétisation proposée dans le cadre de ces travaux est celle de la méthode des éléments finis.

Une analogie est présentée selon que le comportement d'un milieu continu peut être simplifié par la fragmentation de celui-ci par de petites parties, aussi nommés "éléments finis". Dans le domaine de la mécanique des structures, la méthode consiste à déterminer d'abord les relations des forces et des déplacements pour chaque élément de la structure afin d'assembler par la suite ces relations en un système global pour lequel l'équilibre local en chaque noeud est satisfait.

Pour ce faire, le domaine étudié, dans notre cas une pièce de bois, est discrétisé en un grand nombre de noeuds selon un maillage quadratique déterminé selon une densification voulue. Celui-ci est fait à l'aide d'éléments de type hexaèdre à 20 noeuds. Il permet donc une interpolation quadratique selon un schéma de Lagrange. Le maillage est densifié afin de bien présenter l'évolution des fonctions dans la pièce.

D'après les équations 2.67 et 2.68 et considérant $\{\sigma_0\} = 0$, les travaux virtuels internes s'écrivent :

$$w_{int} = \int_V \langle \epsilon^* \rangle [H] \{ \epsilon \} dV \quad (3.1)$$

Les déformations en chaque direction pour un noeud peuvent être définies à partir du déplacement de ce noeud en chaque direction sous la forme suivante :

$$\{ \epsilon \} = [B] \{ u \} \quad (3.2)$$

où la déformation en chaque noeud est définie selon $\{ \epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz} \}$

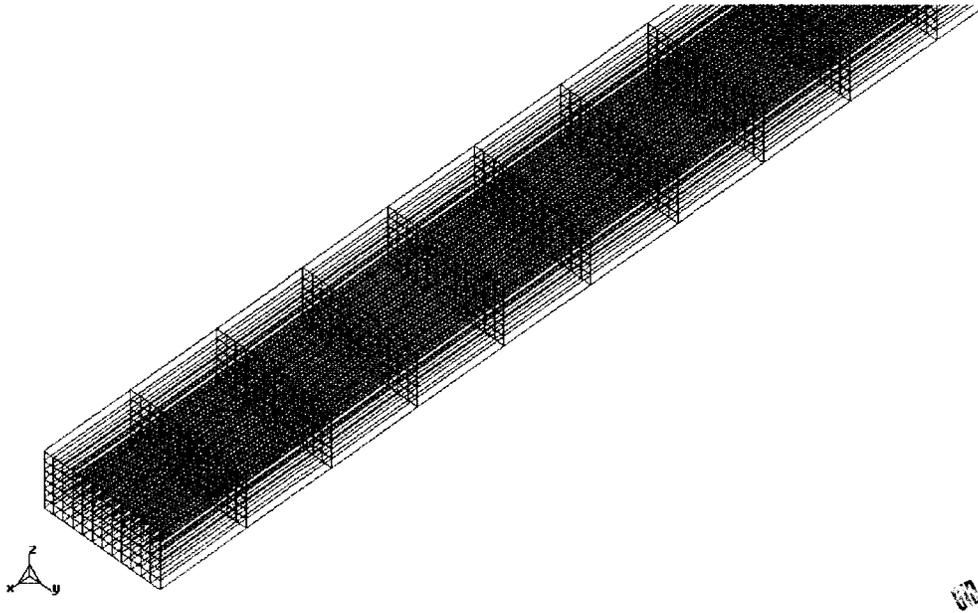


Figure 3.1: Discretisation spatiale - maillage du domaine en élément quadratique

Autrement, la déformation virtuelle correspond à

$$\langle \varepsilon^* \rangle = \langle u^* \rangle [B]^T \quad (3.3)$$

Les travaux virtuels internes s'expriment alors :

$$w_{int} = \int_V \langle u^* \rangle [B]^T [H] [B] \{u\} dV \quad (3.4)$$

Avec la matrice de rigidité élémentaire $[K]$ définie tel :

$$[K] = \int_V [B]^T [H] [B] dV \quad (3.5)$$

Afin de palier avec l'équation 3.5, il y a résolution de l'intégrale à l'aide de méthode d'intégration numérique selon un schéma pour élément hexaèdre.

L'équation 3.4 peut s'écrire :

$$w_{int} = \langle u^* \rangle [K] \{u\} \quad (3.6)$$

où

- $[B]$ opérateur de déformation ;
- $[K]$ matrice de rigidité élémentaire ;
- $\langle \epsilon^* \rangle$ déformation virtuelle ;
- $\langle u^* \rangle$ déplacement virtuel.

D'après les équations 2.67 et 2.68 et considérant $\{f_s\} = 0$, les travaux virtuels externes s'écrivent :

$$w_{ext} = \int_V \langle u^* \rangle \{f_v\} dV \quad (3.7)$$

Puisque

$$\langle u^* \rangle = \langle u^* \rangle [N]^T \quad (3.8)$$

et

$$\{u^*\} = [N] \{u^*\} \quad (3.9)$$

Alors l'équation 3.7 est définie :

$$w_{ext} = \int_V \langle u^* \rangle [N]^T \{f_v\} dV \quad (3.10)$$

Où

$$w_{ext} = \langle u^* \rangle \{f_{nv}\} \quad (3.11)$$

$$\{f_{nv}\} = \int_V [N]^T \{f_v\} dV \quad (3.12)$$

- $[N]$ matrice des fonctions de forme ;
- $\{f_{nv}\}$ vecteur des charges équivalentes.

L'équation 2.67 se résume selon la discrétisation :

$$W = \langle u^* \rangle [K] \{u\} - \langle u^* \rangle \{f_{nv}\} = 0 \quad (3.13)$$

Le système global à l'équation 3.14 est résolu à l'aide de la méthode de Newton-Raphson.

$$[K] \{u\} = \{F\} \quad (3.14)$$

3.2.1 Expression des formes linéarisées

L'intégration transportée dans l'espace de discrétisation s'écrit :

$$W^{i+1} = W^i + \bar{\Delta} W_i^{i+1} \quad (3.15)$$

où la linéarisation du travail interne 2.67 à l'itération i est :

$$\bar{\Delta}W_i^{i+1} = \bar{\Delta} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^* \boldsymbol{\sigma}^i dV = \int_V \bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon}^* \boldsymbol{\sigma}^i dV + \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^* \bar{\Delta} \boldsymbol{\sigma}^i dV \quad (3.16)$$

pour lesquels

- $\boldsymbol{\varepsilon}$ tenseur de green-lagrange ;
- $\bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon}$ linéarisation du tenseur de green-lagrange ;
- $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ tenseur de green-lagrange virtuel ;
- $\bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon}^*$ linéarisation du tenseur de green-lagrange virtuel.

Tel que présenté à l'équation 2.69, le taux de déformation totale se décrit comme la sommation du taux de déformation élastique, thermique, hydrique et mécanosorptive. Selon la loi de Hooke, nous pouvons déterminer le taux de déformation élastique à l'équation 2.71. La linéarisation de la contrainte totale est exprimée sous la forme :

$$\bar{\Delta} \boldsymbol{\sigma} = C^{-1} \left(\bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon} - \bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon}_{th} - \bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon}_{hy} - \bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon}_{ms} \right) \quad (3.17)$$

En référence aux équations 2.80 et 2.82, $\bar{\Delta} \boldsymbol{\sigma}$ est alors :

$$\bar{\Delta} \boldsymbol{\sigma} = C^{-1} \left(\bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon} - \bar{\Delta}(\gamma \dot{T}) - \bar{\Delta}(\alpha \dot{H}_{PSF}) - \bar{\Delta}(m \boldsymbol{\sigma} |\dot{H}_{PSF}|) \right) \quad (3.18)$$

Les termes γ , α et m sont constants sur l'itération i et \dot{H} est fixe sur le pas de temps et donc pour chaque itération. Nous retrouvons alors $\bar{\Delta} \boldsymbol{\sigma}$ sous la forme :

$$\bar{\Delta} \boldsymbol{\sigma} = C^{-1} \left(\bar{\Delta} \boldsymbol{\varepsilon} - m \bar{\Delta} \boldsymbol{\sigma} |\dot{H}_{PSF}| \right) \quad (3.19)$$

En isolant le terme $\bar{\Delta}\sigma$,

$$C\bar{\Delta}\sigma = \bar{\Delta}\varepsilon - m\bar{\Delta}\sigma|\dot{H}_{PSF}| \quad (3.20)$$

Alors,

$$\bar{\Delta}\sigma = \left(I + C^{-1}m|\dot{H}_{PSF}|\right)^{-1} C^{-1}\bar{\Delta}\varepsilon \quad (3.21)$$

La résolution par linéarisation à l'aide de la méthode de Newton-Raphson utilise la matrice tangente présentée à l'équation 3.20.

L'intégration des travaux virtuels de l'équation 3.16 s'écrit alors :

$$\bar{\Delta}W_i^{i+1} = \int_V \bar{\Delta}\varepsilon^* \sigma^i dV + \int_V \varepsilon^* \left(I + C^{-1}m|\dot{H}_{PSF}|\right)^{-1} C^{-1}\bar{\Delta}\varepsilon dV \quad (3.22)$$

3.3 Discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle fait l'utilisation de schéma d'intégration pour la résolution de formulation provenant des expressions variationnelles linéarisées.

La définition du comportement déformationnel d'une pièce de bois en cours de séchage nécessite la résolution des contraintes et déformations de la pièce en chaque pas de temps. La nature incrémentale des lois de comportement implique un suivi des évolutions des contraintes et déformation dans le temps. La résolution implique la technique de résolution numérique à l'aide de division du temps en intervalle $[t, t + \Delta]$.

Afin de résoudre le problème non linéaire généré par le terme de déformation mécanosorptive, un algorithme est proposé afin de déterminer la contrainte en $t + \Delta t$ tel que :

$$\sigma_{t+\Delta t} = \sigma_t + \Delta\sigma \quad (3.23)$$

où

$$\Delta\sigma = \int_t^{t+\Delta t} \dot{\sigma} dt \quad (3.24)$$

Sachant la relation entre l'incrément de la contrainte et l'incrément de la déformation élastique selon la loi de Hooke,

$$\Delta\sigma = C^{-1} \Delta\epsilon_e \quad (3.25)$$

Les équations 3.24 et 3.25 deviennent alors,

$$\Delta\sigma = C^{-1} \int_t^{t+\Delta t} (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_{th} - \dot{\epsilon}_{hy} - \dot{\epsilon}_{ms}) dt \quad (3.26)$$

L'intégration de chaque composante s'écrit donc :

$$\Delta\sigma = C^{-1} \left[\int_t^{t+\Delta t} \dot{\epsilon} dt - \int_t^{t+\Delta t} \dot{\epsilon}_{th} dt - \int_t^{t+\Delta t} \dot{\epsilon}_{hy} dt - \int_t^{t+\Delta t} \dot{\epsilon}_{ms} dt \right] \quad (3.27)$$

Posons l'approche de l'équation 3.28 pour une valeur estimée de la contrainte :

$$\bar{\sigma}_{t+\Delta t} = \sigma_t + \Delta\bar{\sigma} \quad (3.28)$$

où l'estimation de l'incrément de la contrainte est égale à

$$\Delta\bar{\sigma} = C^{-1}\Delta\bar{\epsilon}_e \quad (3.29)$$

avec

$$\Delta\bar{\epsilon}_e = \Delta\epsilon - \Delta\epsilon_{th} - \Delta\epsilon_{hy} \quad (3.30)$$

en posant

$$\Delta\epsilon_{ms} = 0 \quad (3.31)$$

alors

$$\Delta\bar{\sigma} = C^{-1} \left[\int_t^{t+\Delta t} \dot{\epsilon} dt - \int_t^{t+\Delta t} \dot{\epsilon}_{th} dt - \int_t^{t+\Delta t} \dot{\epsilon}_{hy} dt \right] \quad (3.32)$$

En comparant la valeur exacte 3.23 et la valeur estimée 3.28 nous obtenons :

$$\bar{\sigma}_{t+\Delta t} - \sigma_{t+\Delta t} = C^{-1}\Delta\epsilon_{ms} \quad (3.33)$$

Selon l'équation 2.82 il est possible d'en déduire :

$$\Delta\epsilon_{ms} = \int_t^{t+\Delta t} m\sigma|\dot{H} dt \quad (3.34)$$

Alors que d'après l'équation 3.33 :

$$\Delta \varepsilon_{ms} = C \left(\bar{\sigma}_{t+\Delta t} - \sigma_{t+\Delta t} \right) \quad (3.35)$$

Où

$$\bar{\sigma}_{t+\Delta t} = \sigma_t + C^{-1} \left[\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{th} - \Delta \varepsilon_{hy} \right] \quad (3.36)$$

L'ensemble des équations 3.34 et 3.35 forme :

$$m \sigma_{t+\Delta t} |\dot{H}| \Delta t = C \left(\bar{\sigma}_{t+\Delta t} - \sigma_{t+\Delta t} \right) \quad (3.37)$$

Pour une présentation finale de l'équation qui sera utilisée afin d'aborder le problème non linéaire :

$$\sigma_{t+\Delta t} = \left(I + C^{-1} m |\dot{H}| \Delta t \right)^{-1} C \left(\sigma_t + \Delta \bar{\sigma} \right) \quad (3.38)$$

3.4 Mise en oeuvre informatique

Le principal défi de résolution numérique de ce problème est le couplage des termes mécanique, thermique et hydrique. La versatilité du logiciel d'éléments finis utilisé permet la prise en compte du couplage unidirectionnel entre le problème thermo-hydrique et le problème mécanique ce qui ne serait pas possible dans les logiciels commerciaux présents sur le marché.

La flexibilité du code permet l'ajout du phénomène mécanique qui a lieu lors du séchage du bois par les développements de lois constitutives, formulation, terme de formulation et un matériau spécifique.

3.4.1 Noyau de calcul FESh++

L'approche de développement selon la méthode des éléments finis à l'intérieur du noyau de calcul FESh++ permet la construction d'un problème de grande envergure. L'approche orientée objet utilisée dans ce cadre offre la disparité entre l'élément et les nombreuses tâches à accomplir pour la résolution du problème : schéma d'intégration, lois de comportement et interpolation. De nouvelles lois constitutives, de matériaux, de formulation et termes de formulation sont implémentés dans la structure existante.

3.4.2 Stratégie d'implémentation

Il est nécessaire d'adapter l'outil de calcul FESh++ afin de répondre au mandat de la résolution d'un problème 3D pour un comportement orthotrope selon un repère local. Pour ce faire, les travaux d'implémentation ont d'abord eu lieu pour établir les bases de rotations *FEShBasisWood* d'un repère local à un repère global. Ces dernières nécessitent les adaptations au sein de la classe *FEShGeoProperty* afin de prendre en compte les propriétés géométriques telles que la position du centre de la bille, le vecteur longitudinal, l'angle conique et l'angle spiralé des grains.

En second lieu, un nouveau matériau *FEShMatThHygroElastoMecanoSorptifOrtho* fut créé afin de prendre en compte l'orthotropie des propriétés telles que le module de Coulomb, le coefficient de Poisson. Selon ce matériau est décrit la loi constitutive *FEShCstvLawElastoMecanoSorptifOrtho* d'un tenseur de 4^e ordre orthotrope qui sera utilisé dans le terme *FEShFTMech3DLagrangeWood*. Celui-ci prend en compte les non linéarités géométriques dues aux grands déplacements. Une contribution supplémentaire du terme de déformation a été ajouté *FEShStrainShrinkage* afin de prendre en compte les déformations ayant lieu lors du retrait de l'eau lié dans le matériau.

L'ensemble des développements est utilisé à partir de l'application générale au contexte du bois *AppThHygroMechanicalWood*. L'interface entre les modèles mécanique et thermo-hydrrique est principalement fait à partir des solveurs *FEShSolverExternal* et à partir de l'application *AppExportGiD-*

CFX qui permettent la récupération des champs de température et d'humidité et la mise à jour de ces champs pour chaque pas de temps.

3.4.3 Description des classes développées

Les principaux développements complémentaires au noyau de calcul pour la réalisation du modèle de comportement du bois lors du procédé de séchage industriel sont : la base de rotation orthonormée, les lois constitutives de déformation élasto-mécanosorptive et de déformation dû au retrait, le matériau, la formulation et le terme de formulation.

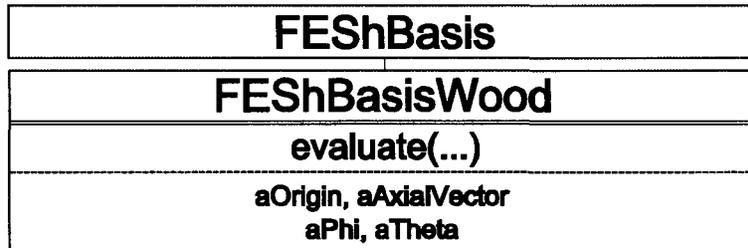


Figure 3.2: Diagramme de la classe base de rotation

La base de rotation permet particulièrement d'interpréter la loi de comportement dans le repère local du matériau. Notamment, l'objectif principal de la classe présentée à la figure 3.2 est de déterminer les vecteurs unitaires de chaque direction locale respective. La matrice de rotation construite à l'intérieur permet le passage du système de coordonnées globales x,y,z de la pièce et du maillage au repère local des propriétés matérielles dans les directions longitudinale, radiale et tangentielle des fibres du bois. Elle permet également la rotation des termes tel que variable d'état de flux et force thermodynamique, tenseur du quatrième ordre, matrice rigidité et matrice tangente. Les attributs qui les interprètent sont les propriétés géométriques du matériau telles que le centre de la bille, l'axe des fibres, l'angle conique et spiralé des grains influencés par la nature de la croissance de l'essence étudiée.

La classe *FEShMatThHygroElastoMecanoSorptifOrtho*, présentée à la figure 3.3, permet d'im-

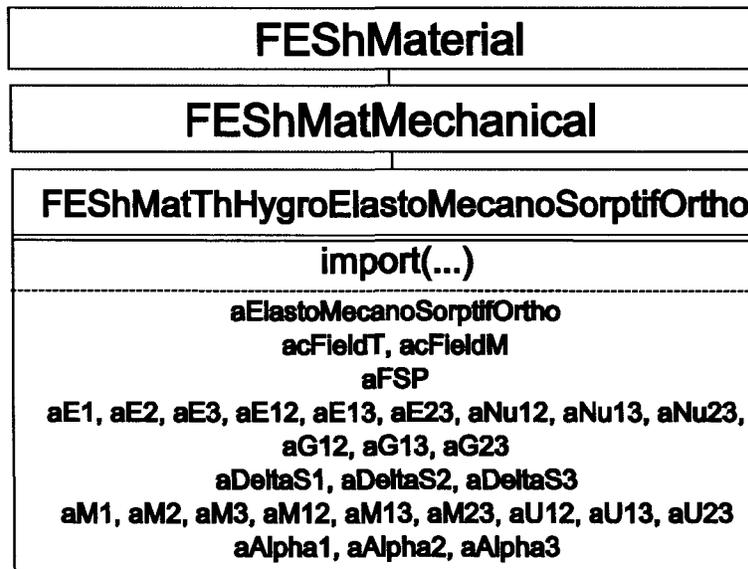


Figure 3.3: Diagramme de la classe matériau

porter les propriétés complexes du matériau à traiter dans le problème. La résolution en 3D et la nature orthotrope du matériau nécessitent de nombreux attributs tels que les propriétés élastiques, mécanosorptive, de retrait et d'expansion thermique pour les directions du repère local. Également, les champs de température et d'humidité sont importés puisqu'il y a prise en compte de l'influence de la variation de la température et de l'humidité sur les propriétés.

La formulation permet l'assemblage des contributions provenant de l'intégrale évaluée dans le terme de formation utilisé. C'est cette classe qui rend possible l'ajout de terme de couplage. Dans le présent problème le couplage du modèle mécanique à la résolution des champs de température et d'humidité du modèle de transfert de chaleur et de masse est assumé par cette classe. Il n'y a qu'un seul terme de formulation associé à l'ensemble du maillage dans notre cas. Par ailleurs, il aurait été possible de prendre en compte plusieurs termes de formulation, chacun des termes étant associé à une partie ou à l'ensemble du maillage par l'utilisation de sous-maillages. La formulation contient le maillage sur lequel l'intégrale est évaluée pour chaque terme, cet objet boucle sur chaque élément et sur chaque terme associé. La structure informatique choisie est présentée à la figure 3.4.

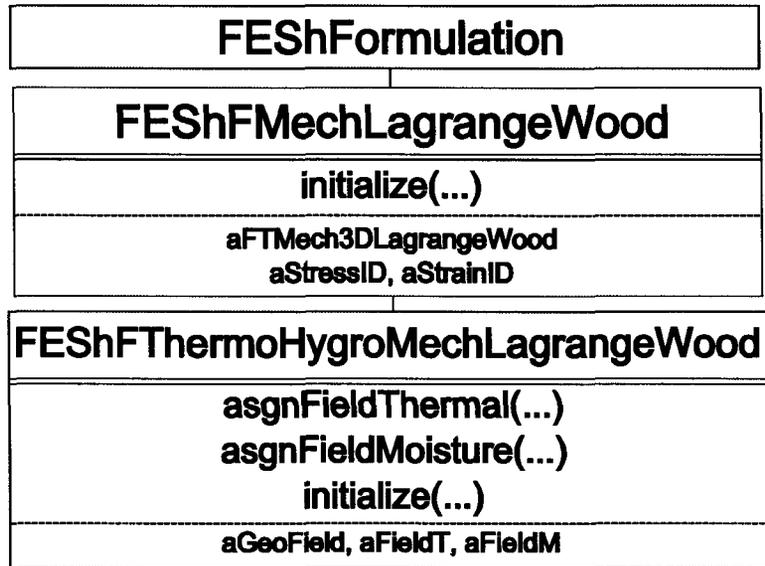


Figure 3.4: Diagramme de la classe formulation

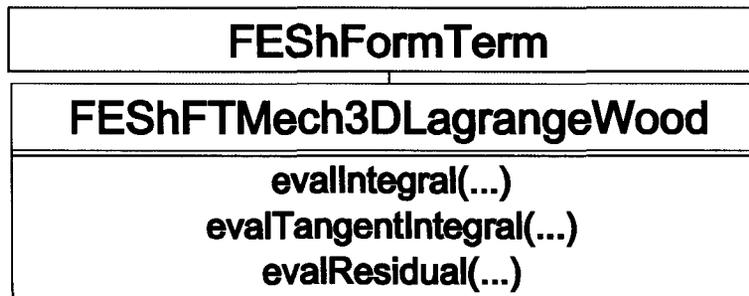


Figure 3.5: Diagramme du terme de formulation

À l'intérieur du terme de formulation de la figure 3.5, les méthodes d'évaluation de l'intégrale, de la tangente et du résidu sont nécessaires selon la méthode de résolution qui est utilisée, méthode de superposition ou méthode de Newton-Raphson. Une boucle sur chaque point d'intégration est nécessaire afin d'évaluer les termes associés à la loi constitutive du matériau. Par les méthodes utilisées dans les classes de formulation et de terme de formulation, il y a évaluation et assemblage des contributions élémentaires.

La loi de comportement a pour rôle de relier le flux à la force thermodynamique. En effet, les

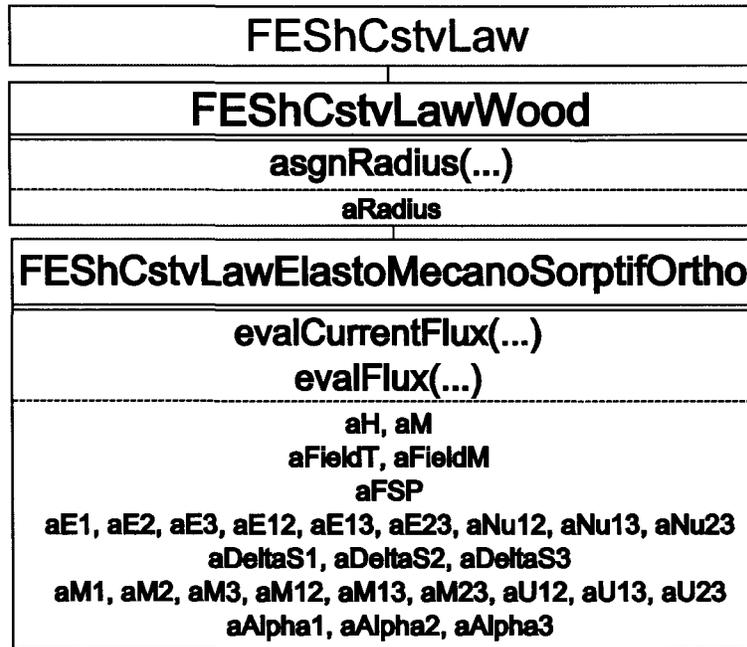


Figure 3.6: Diagramme de la classe loi de comportement élastomécanosorptive

déformations connues à partir des degrés de liberté, celles-ci permettent de déterminer les contraintes à l'intérieur de la classe présentée à la figure 3.6. Les propriétés du matériau impliquées dans la loi varient en fonction du rayon, de la température et de l'humidité. Les lois scalaires telles que loi de Fourier, Ohm et Fick sont des lois tensorielles 3D telles que loi de Hooke et loi élastomécanosorptive. La contrainte est liée à la déformation mécanique par la soustraction des déformations additionnelles à la déformation totale.

Une particularité de cette loi implique l'aspect multi-physique du problème par la prise en compte de composantes de déformations supplémentaires : expansion thermique et retrait hydrique. Cette dernière est présentée à la figure 3.7. La classe *FEShStrainShrinkage* permet de déterminer la déformation due au retrait, son incrément ou sa contribution à la matrice tangente est nulle dans ce présent cas.

La structure du solveur permettant le couplage entre la partie thermo-hydrrique et la partie mé-

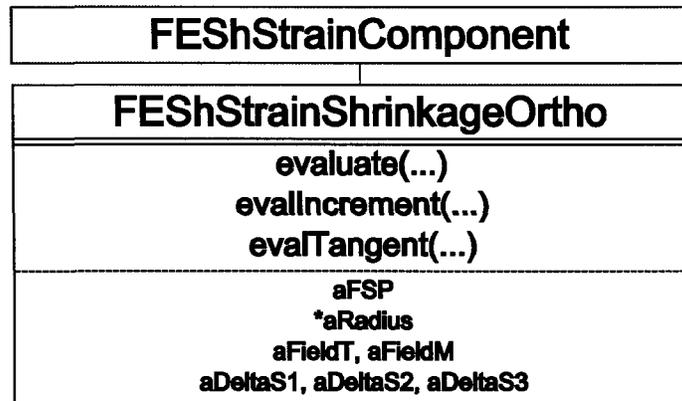


Figure 3.7: Diagramme de la classe déformation additionnelle due au retrait hydrique

canique est présenté à la figure 3.8. Le couplage qui apparaît par cette classe est par la résolution en chaque pas de temps qui inclut la récupération des champs de température et d'humidité avant la résolution du pas de temps. Par ailleurs, la classe *FEShSolverExternal*, présentée à la figure 3.9, fait en sorte de récupérer les données des champs température et humidité pour chacun des pas de temps.

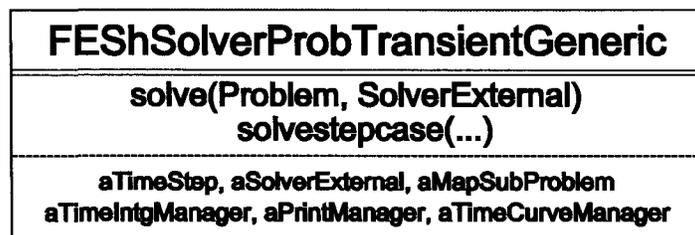


Figure 3.8: Diagramme de la classe solveur transitoire

L'application *AppThHygroMechanicalWood* met en oeuvre l'ensemble des développements. À l'intérieur est activée l'importation de la géométrie, des conditions limites et des propriétés. Celle-ci fait la gestion de l'interpolation, de l'intégration, de l'exportation des résultats, de la formulation, du contact, du problème et sous-problème ainsi que du solveur global et du solveur externe.

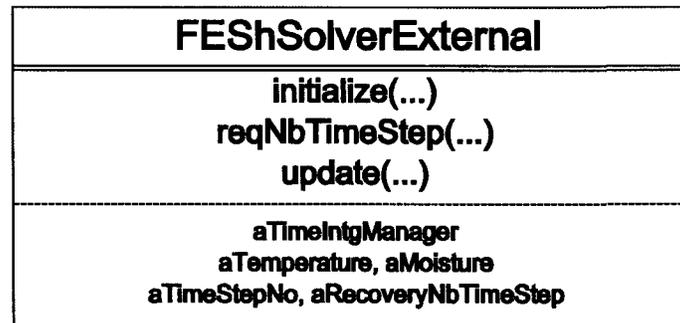


Figure 3.9: Diagramme de la classe solver externe

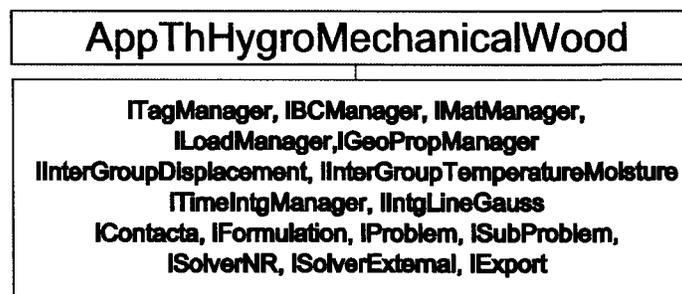


Figure 3.10: Application thermo-hygro-mécanique

Chapitre 4

Validation du modèle numérique

4.1 Généralités

Les chapitres précédents ont présenté l'ensemble de la démarche permettant la résolution dans le domaine transitoire d'un problème mécanique d'une pièce de bois soumise à des gradients thermique et hydrique. Les travaux présentés ci-après permettent la validation du modèle sous plusieurs contextes. Chaque étape permet pas à pas de vérifier la résolution pour différents problèmes simples.

Avant d'aborder l'étude de cas industriels, il est nécessaire de valider le modèle développé sur des cas simples où on isole chacune des composantes. Entre autres, la construction d'un modèle simple qui permet de solliciter uniquement certaines composantes du modèle et d'en valider le comportement.

4.2 Validation numérique

4.2.1 Séchage bidimensionnel

La partie concernant la validation à l'aide de problème de la littérature permet la validation finale de l'ensemble du modèle en comparaison à un problème ciblé. Les détails de ce problème se retrouvent dans Ormarsson (1999). Le problème proposé est celui d'une pièce de bois de dimension en longueur, largeur et épaisseur 3m x 0,1m x 0,05 m selon les directions x-y-z. La pièce est discrétisée dans le domaine spatial selon 40 x 12 x 6 éléments tel que présenté à la figure 4.2.

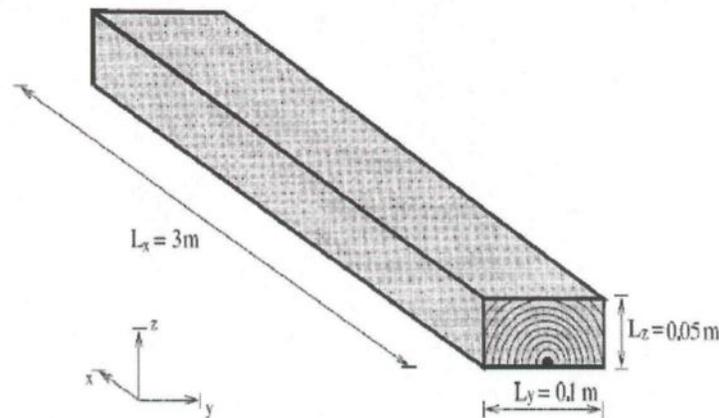


Figure 4.1: Géométrie de la pièce [Ormarsson (1999)]

Le problème est en tout premier lieu résolu afin de déterminer la distribution de la teneur en humidité à l'intérieur de la pièce et ce variant dans le temps. La pièce est soumise à des gradients d'humidité pour une température constante de 20°C selon un problème de diffusion simple. La pièce possède tout d'abord une teneur en humidité initiale de 27% pour terminer en fin de test à une humidité finale moyenne de 10,75%. Les conditions de surface sont présentes par une humidité fixe de 8,9% sur les noeuds de surface.

Lors de la simulation, il est pris pour hypothèse que le transport est réalisé en deux dimensions dans le plan transversal de la pièce. La relation linéaire de diffusion présentée à l'équation 4.1 est

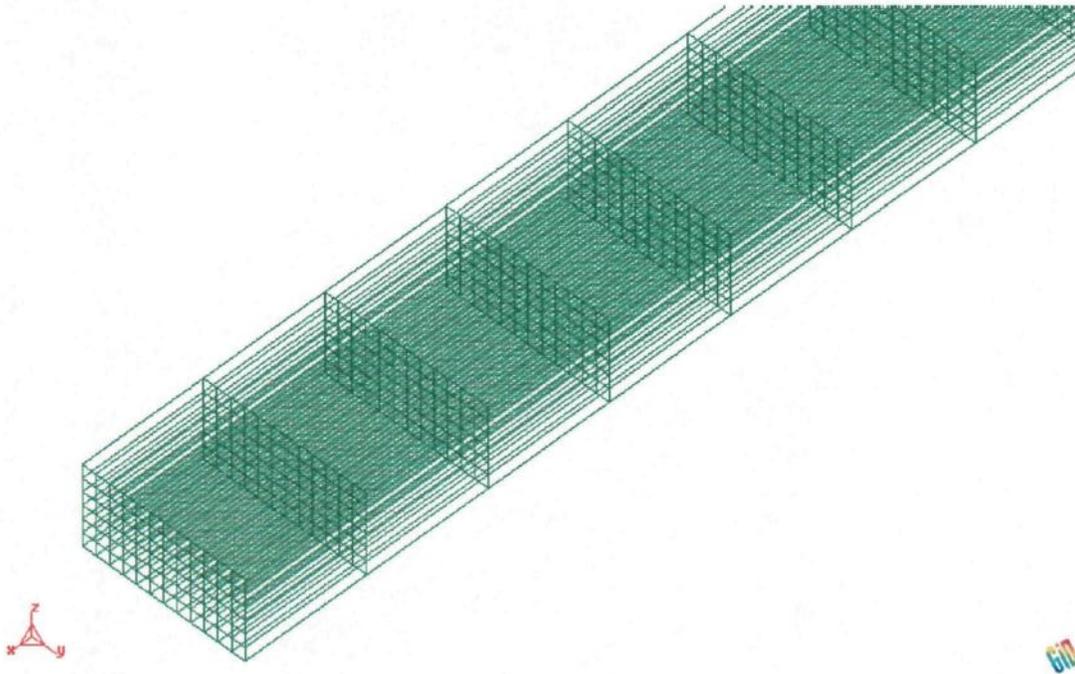


Figure 4.2: Maillage de la pièce

celle retenue dans le cadre de cette simulation telle que :

$$D_w \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

avec $D_w = 7e^{-10} m^2/s$.

La figure 4.3 présente le comparatif des résultats d'humidité moyenne dans la pièce entre la littérature et la simulation. Les résultats représentent la moyenne de l'humidité en chacun des points de la géométrie. À la vue de ces résultats, on remarque la forte chute due à l'application de la condition en surface d'une humidité fixe basse. Le taux de séchage est plus rapide en début de test et diminue graduellement à la fin. En effet, l'échange de matière est fonction de la différence d'humidité entre chacun des points, l'humidité de la pièce étant de plus en plus petite, cette différence diminue également.

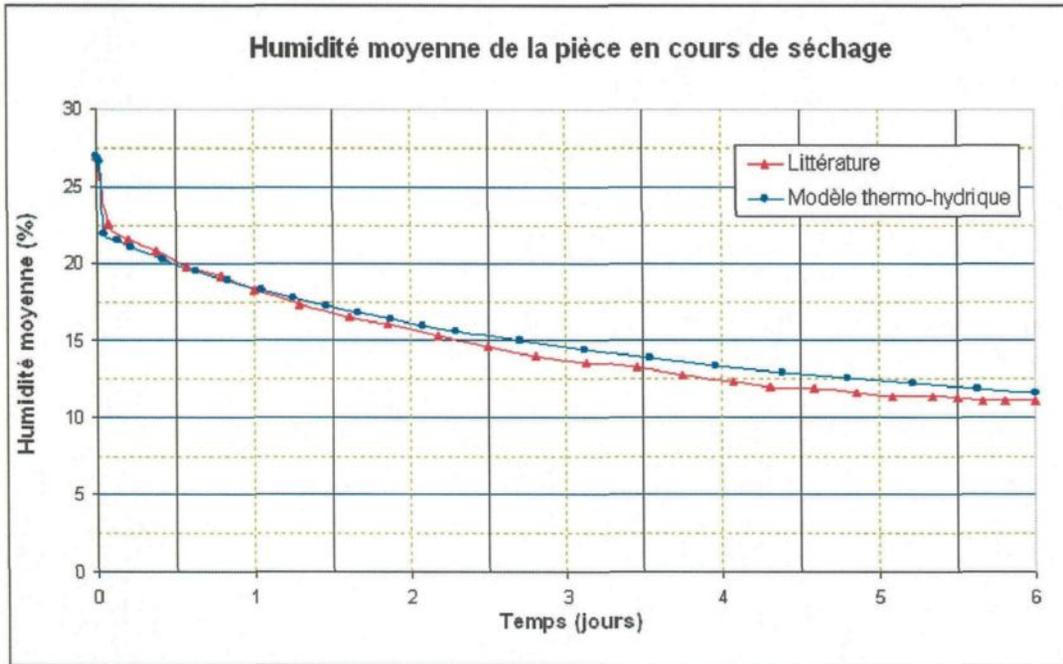


Figure 4.3: Évolution de la teneur en humidité moyenne de la pièce durant le séchage bidimensionnel

Aucune charge n'est appliquée sur la pièce, celle-ci est libre de mouvement et retenue selon 3 conditions limites imposées dans le centre de la pièce tel que présenté à la figure 4.4.

Les propriétés géométriques permettent la prise en compte des effets dus au type de coupe de la pièce. Le centre de la bille se situe à la position $(0, 0,05, 0)$, le vecteur longitudinal est situé le long de l'axe de la direction x tel que $\vec{l} = (1, 0, 0)$. L'angle conique est exprimé tel que $-\phi = 0,5^\circ$ cet angle entraîne la rotation du repère local sur l'axe transversal. L'angle spiralé des grains entraîne la rotation du repère local sur l'axe radial et est fonction de la position par rapport au centre de la bille, celui-ci s'exprime tel que $\theta = 4 - 40r^\circ$ ou r représente le rayon en mètre.

Au cours de la simulation du problème mécanique, cet exercice a permis de valider la base de rotation, la loi constitutive, les manipulations de tenseur et la variation des propriétés du matériau selon la position du point par rapport au centre de la bille et en fonction de la teneur en humidité de la pièce. Les forts gradients générés en tout début par une chute en humidité aux surfaces de la pièce

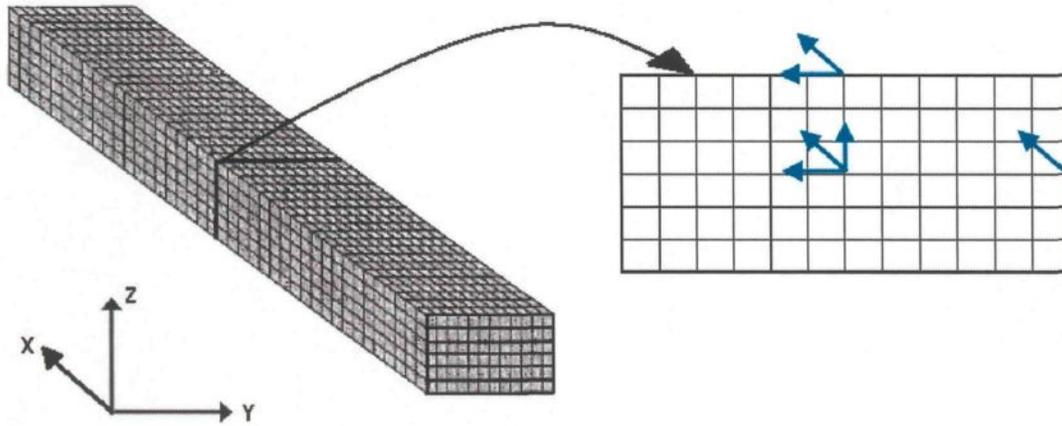


Figure 4.4: Conditions limites de Dirichlet [Ormarsson (1999)]

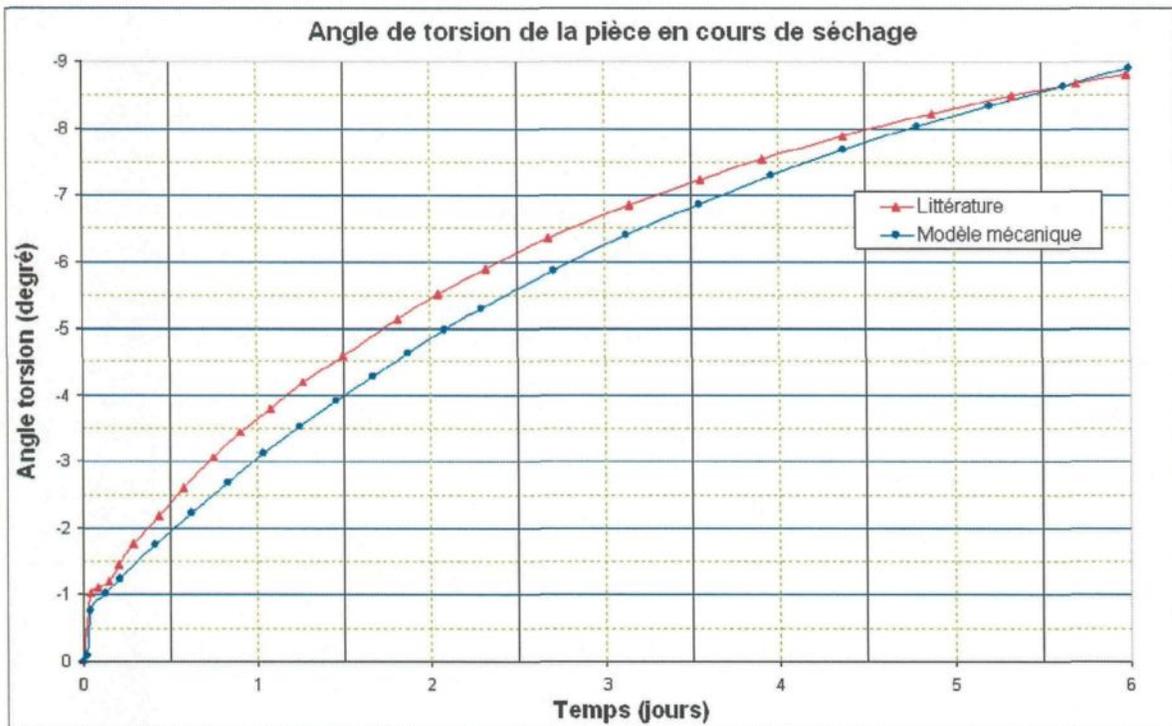


Figure 4.5: Évolution de l'angle de torsion durant le séchage bidimensionnel

ont créé des tensions et déformations en début de simulation.

La figure 4.5 présente un comparatif de l'angle de torsion obtenu par Ormarsson (1999) et le modèle développé. Ces résultats permettent de remarquer le faible écart entre la littérature et la simulation du modèle mécanique. La torsion apparaît rapidement en début de test et continue graduellement à augmenter pour une torsion finale. Il faut prendre considération que la pièce est séchée de façon graduelle et ce sans être retenue d'aucune façon ce qui permet de remarquer les mouvements complets.

Les figures 4.3 et 4.5 permettent d'établir un lien direct entre la baisse d'humidité moyenne de la pièce et son comportement déformationnel. Cela permet de faire le lien entre les lois de comportement du matériau telles que le retrait et la mécanosorption qui sont tous deux fonction des gradients d'humidité. Malgré une température maintenue constante, les variations de teneur en humidité dans la pièce font en sorte de générer des contraintes dans le matériau et ainsi occasionner des déformations.

4.3 Étude de sensibilité

Le modèle numérique ayant été développé et validé selon un cas théorique, il est possible de l'utiliser afin d'analyser certains cas en faisant varier certains paramètres pour mieux en connaître les effets.

On retrouve dans l'industrie plusieurs opérations ayant un impact sur la qualité de la pièce en cours de séchage. Cela débute au moment de la cueillette de la matière première en forêt, par la suite, l'approvisionnement, l'entreposage, le sciage, le chargement et le séchage. Entre autres, l'utilisation de l'outil de simulation permettra d'analyser l'impact de certaines opérations sur la qualité de la pièce en fin de séchage.

Avant la préparation du chargement pour procéder au séchage, il y a coupe des pièces à l'usine de sciage. Le patron de coupe est déterminé en continu par les systèmes automatisés en fonction des caractéristiques de la bille, défauts naturels, diamètre et courbe. L'outil de simulation sera utile afin

d'analyser l'impact du type de coupe sur la dégradation de la pièce par la présence d'un degré de torsion élevé entraînant la perte de valeur du produit.

Le type de coupe est représenté par la position du coeur de la bille par rapport aux faces et rives de la pièce. Lors des différentes simulations, il est possible, pour une même géométrie et même courbe de séchage, de faire varier le type de coupe et ainsi analyser son impact sur le comportement déformationnel de la pièce.

La variation des propriétés du bois en fonction de sa nature, bois juvénile, bois de coeur et bois d'aubier sont prises en compte par le modèle étant donné qu'il est en mesure de faire varier les propriétés mécaniques en fonction de la distance de la moelle. De plus, les propriétés variant selon les directions radial et tangential sont prises en compte par le modèle à l'aide de la transformation géométrique. Par exemple, la position de la moelle dans la figure 4.6 est très différente de la figure 4.7 ce qui entraînera un tout autre comportement mécanique lors du séchage.

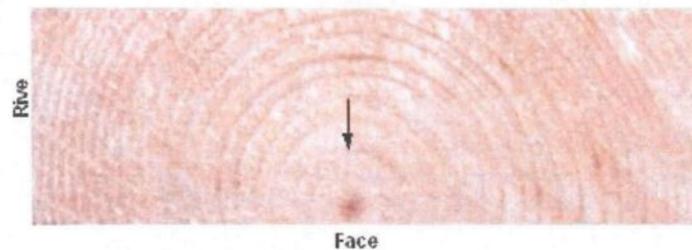


Figure 4.6: Coeur positionné sur la face de la pièce

Pour faire l'analyse de ce cas, la géométrie utilisée est celle d'une pièce de dimension 3 x 0,1 x 0,05 m ce qui représente une pièce de (2" x 4" x 10'). La courbe de séchage utilisée a été la même pour chaque type de coupe, pour une température constante de 20°C et pour une condition de surface à 9% d'humidité. La pièce n'était pas retenue mécaniquement et avait pour seule condition la retenue de quelques noeuds au centre de la pièce tel que présenté à la figure 4.4.

À la figure 4.8, est présentée la courbe de séchage de la pièce utilisée pour cette analyse.



Figure 4.7: Coeur positionné vers la rive de la pièce

Les figures 4.6 et 4.7 présentent le positionnement du coeur lorsqu'il se situe sur la face et lorsqu'il se situe vers la rive de la pièce. Le graphique présenté à la figure 4.9 représente le degré de torsion final de la pièce selon la direction du coeur de la bille et son éloignement par rapport au centre de la pièce.

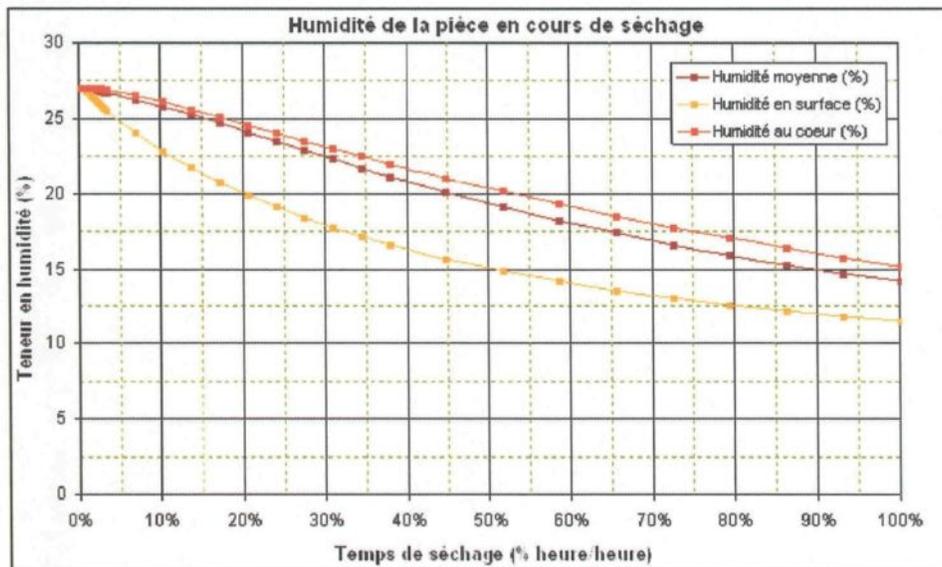


Figure 4.8: Patron de la courbe de séchage utilisée lors de l'analyse

L'axe des abscisses représente l'éloignement du coeur de la bille par rapport au centre de la pièce, le coeur est éloigné de 100% du centre de la pièce lorsqu'il se retrouve sur la face ou la rive. Dans le

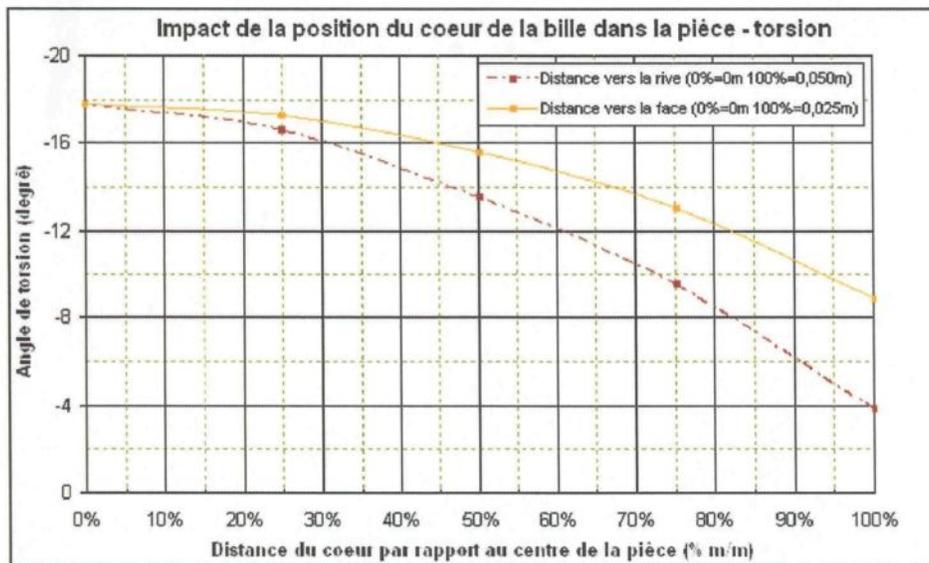


Figure 4.9: Présence de défaut de torsion selon la position du coeur de la bille

cas de cette géométrie de $3 \times 0,1 \times 0,05$ m, l'éloignement maximal vers la face est de 0,025 m et de 0,05 m vers la rive. Dans le cas des trois courbes, l'éloignement de 0% représente le coeur de la bille complètement au centre de la pièce.

La figure 4.9 présente l'impact de l'éloignement vers la face et vers la rive de la pièce. Un point commun de chaque direction de l'éloignement est que le degré de torsion est maximal lorsque le coeur de la bille est le plus près du centre de la pièce. Par ailleurs, plus le coeur de la bille s'éloigne du centre de la pièce, plus le degré de torsion diminue. Pour référence, la section 1.4.3 présente les différents types de défauts de courbure à la figure 1.6.

La torsion peut être visualisée à la figure 4.10 pour une position du coeur au centre de la pièce.

Ce comparatif souligne l'intérêt de prendre compte du degré de torsion ou de l'ampleur des différentes courbure tel que le voilement de rive, voilement de face et tirant à coeur et ce pour différentes géométries. Les figures 4.11 et 4.12 présentent l'ampleur du défaut de voilement de face et de rive de la pièce en fonction de la position du coeur de la bille dans la pièce.

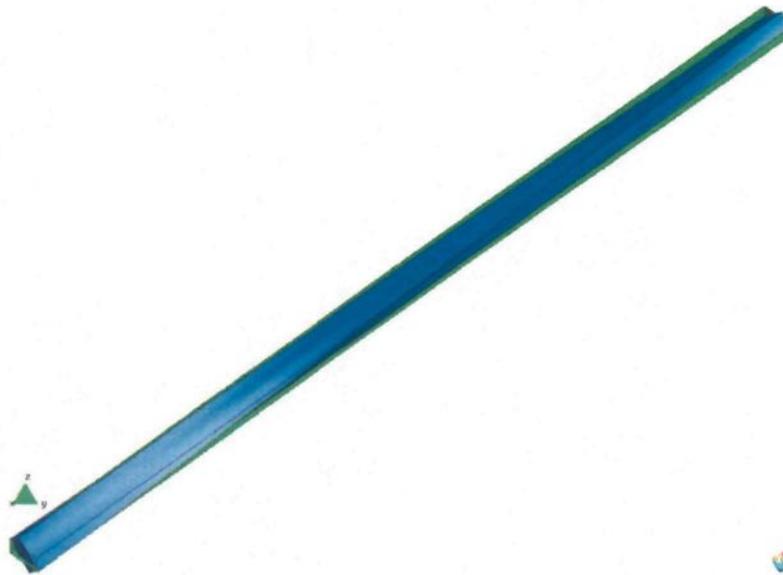


Figure 4.10: Visualisation de la simulation - coeur au centre - présence de torsion

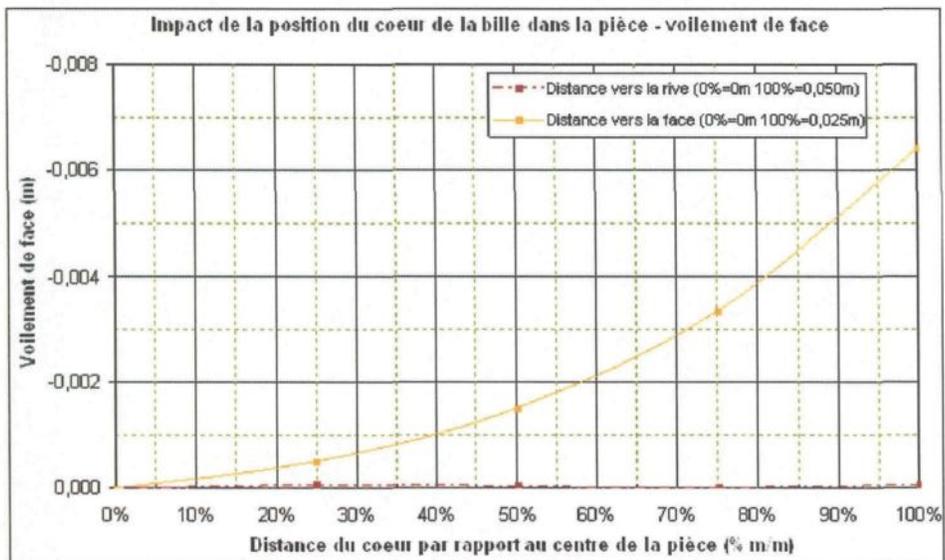


Figure 4.11: Présence de voilement de face selon la position du coeur de la bille

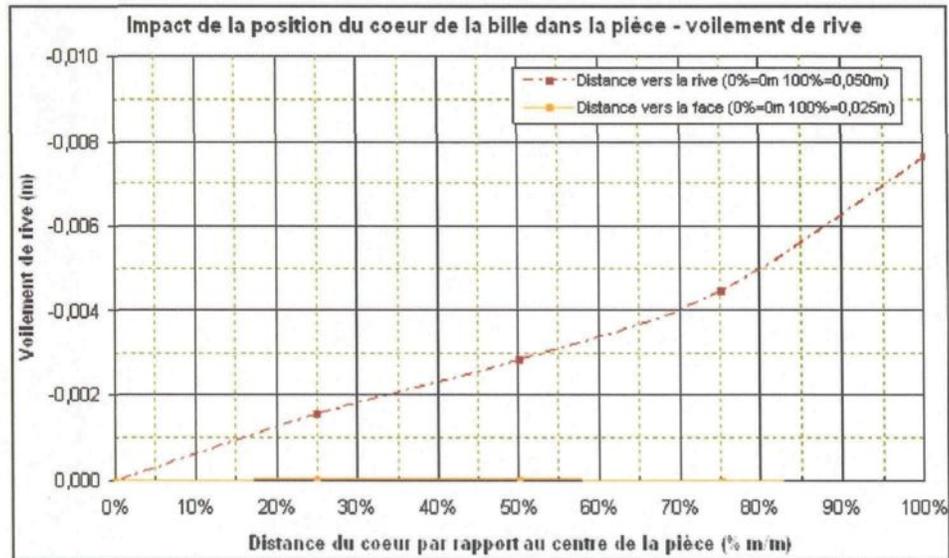


Figure 4.12: Présence de voilement de rive selon la position du coeur de la bille

À la vue de la figure 4.11 on peut noter qu'un défaut arqué apparaîtra principalement dans une pièce dont le coeur de la bille s'éloigne du centre pour se diriger vers la face. Contrairement, un défaut cambré apparaîtra principalement lorsque la coupe fera en sorte de positionner le coeur de la bille s'éloignant vers la rive, figure 4.12. La figure 4.13 présente le résultat de simulation pour une pièce dont le coeur est près de la rive et pour lequel l'on note une cambrure.

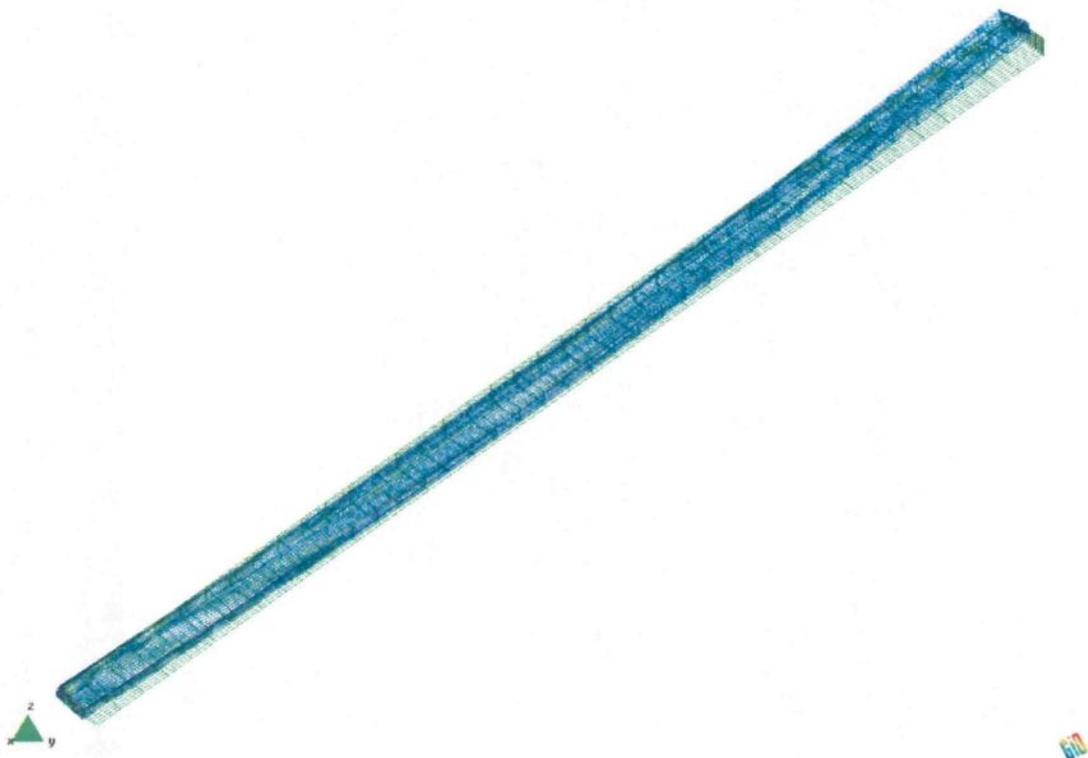


Figure 4.13: Visualisation de la simulation - coeur sur rive - présence de cambré

Chapitre 5

Application industrielle

5.1 Généralités

Aux chapitres précédents est décrit les propriétés hydriques, thermiques et mécaniques du bois fournis au modèle passant par la description des équations mathématiques des modèles thermo-hydrrique et mécanique, la mise en oeuvre informatique et la validation finale de l'outil. Cet outil permet de représenter le comportement mécanique du bois soumis aux conditions de séchage. Au prochain chapitre sera présentée l'utilisation de cet outil afin de reproduire un problème, élaboré dans un contexte industriel, d'une pièce lestée dans un séchoir conventionnel.

5.2 Programme expérimental

Le projet expérimental s'est échelonné sur plusieurs chargements dans des conditions de périodes hivernale et estivale afin d'assurer le bon fonctionnement du montage et de se familiariser avec les prises de mesure. En un premier temps, les données recueillies ont permis la calibration du modèle thermo-hydrrique. En second lieu, les données recueillis sont utilisées pour la simulation d'un problème industriel.

5.2.1 Description du montage

Le montage est adapté au procédé industriel de séchage conventionnel. Celui-ci utilise les installations en place, séchoir, contrôleur, chargement, empilement et équipement de lestage.

Lors de la familiarisation au programme expérimental et de la calibration du modèle thermo-hydrigue, les échantillons d'épinette noire de (2''x3''), (2''x4'') et (2''x6'' 16') ont été utilisés. Ces pièces présentaient une humidité de 30% à 40%. Les données au niveau mécanique n'ont pas été répertoriées. À cette étape, les échantillons sont situés au bas du chargement et au centre du séchoir tel qu'à la figure 5.1 dans le but d'être liés aux équipements de mesure du contrôleur.

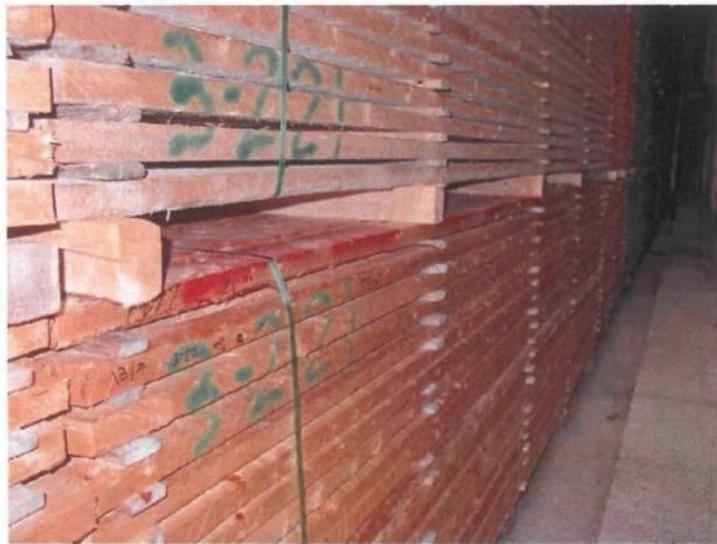


Figure 5.1: Emplacement des échantillons au bas du chargement - partie 1

Lors de la deuxième phase du programme expérimental, des échantillons de pièces de (2''x6'' 16') aussi défini plus spécifiquement comme des échantillons de dimension (4921.2 mm x 149.2 mm x 42.9 mm), d'essence épinette noire ont été utilisés, figure 5.2.

Les échantillons sont positionnés dans le haut du chargement afin d'assurer les conditions d'application de charge constante, figure ???. L'équipement de lestage applique une charge de $3000 \frac{N}{m^2}$



Figure 5.2: Échantillons après séchage

répartie sur l'ensemble de la surface du chargement. La charge est appliquée à l'aide d'un équipement mécanique qui reproduit une charge par gravité, l'équipement travaille tel que le principe de porte à faux.

L'empilement assure un positionnement déterminé des cinq colonnes de lattes. Chaque rang est séparé par ces baguettes afin de répartir le poids du chargement sur l'ensemble des pièces de façon uniforme. L'utilisation de lattes permet l'écoulement de l'air et la répartition des conditions de température et d'humidité relative de l'air en faisant le maintien des pièces tout au long du procédé de séchage, figure 5.3.



Figure 5.3: Utilisation des lattes et positionnement

L'utilisation de thermocouples permet le suivi des conditions de température lors du séchage.

L'utilisation de buvard en place permet le suivi de l'humidité relative de l'air dans le séchoir. Le contrôleur de l'équipement quant à lui, détermine le programme de séchage en cours et le changement d'étape au cours du séchage.

Les échantillons sont séchés avec le chargement en cours. L'ensemble des équipements de mesure assure le suivi des conditions. Étant donné l'utilisation des équipements du procédé, la précision de lecture des mesures est propre à l'étalonnage réalisé en cours de production.

Les données recueillies avant séchage sont la position de l'application de charge et support des lattes (figure 5.4), la position des thermocouples (figure 5.5) et la teneur en humidité initiale de la pièce. Prendre note que la température du bois T_B est mesurée dans la couche mince de surface de la pièce et la température du gaz est mesurée dans l'espace entre les pièces.

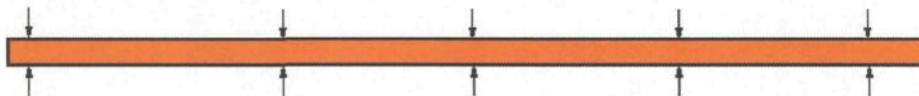


Figure 5.4: Position de l'application de la charge et du support des lattes

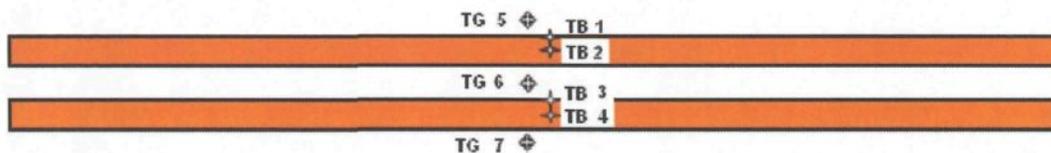


Figure 5.5: Position des thermocouples

Les données recueillies en continu sont la température de l'air, l'humidité relative de l'air et la température du bois lors de la production de séchage.

Après séchage, il y a cueillette des mesures sur la position du centre de la bille, la position de l'axe des fibres et la déformation de la pièce.

Le positionnement du centre de la bille et l'axe des fibres sont déterminés à partir de la position du coeur à chaque extrémité de la pièce.

Les déformations des échantillons sont mesurées sur le banc de courbure du site, figure 5.6. Celles-ci sont déterminées à partir de la position de chacun des 16 points de mesure. La pièce est retenue en une extrémité afin de limiter son déplacement en un point. Par contre, il est à prévoir que cela entraînera des déformations dues à ce maintien et non aux sollicitations pendant séchage, ces déformations parasites sont à considérer lors de l'analyse des résultats.



Figure 5.6: Banc de courbure

5.2.2 Description des données recueillies

Cette section présente l'ensemble des informations qui découlent de ce programme expérimental. Plusieurs échantillons ont été utilisés, en voici un sommaire pour une pièce qui sera ultérieurement utilisée dans l'application industrielle avec lestage.

Au tableau 5.1 est présentée la liste des instruments utilisés dans le cadre de ce programme expérimental.

Tableau 5.1: Description des instruments de mesure

Type	Instrument
Système acquisition	Keithley KE2700 - Omnitronix TC4000
Température	Thermocouple Type T (cuivre-constantan)
Humidité de l'air	Buvardeur - contrôleur séchoir Cathild
Humidité du bois	Sonde humidité - contrôleur séchoir Cathild
Déformation	Vernier à coulisse - Banc de courbure
Géométrie	Vernier et gallon étalonné

Voici au tableau 5.2 les informations générales sur la précision de mesure et de lecture. La précision de lecture est influencée à la fois par le degré de précision de l'instrument et les références de mesure. Prendre note que la mesure d'humidité du bois n'est valide que lorsque la teneur en humidité est en-dessous de 30%.

Tableau 5.2: Description de la précision de lecture et de mesure

Type	Précision de lecture
Température	($\pm 0,5\%$)
Humidité de l'air	($\pm 1,5\%$)
Humidité du bois	($\pm 1,0\%$)
Déformation	($\pm 1,0\%$)
Géométrie	($\pm 0,5\%$)

La figure 5.7 présente les données recueillies de température et humidité de l'air et du bois pendant séchage. Ce premier type de test permet de prendre en compte l'impact des conditions de température et d'humidité ambiantes dans le séchoir sur la teneur en humidité du bois.

La figure 5.8 présente les données recueillies de température et humidité de l'air pendant séchage.

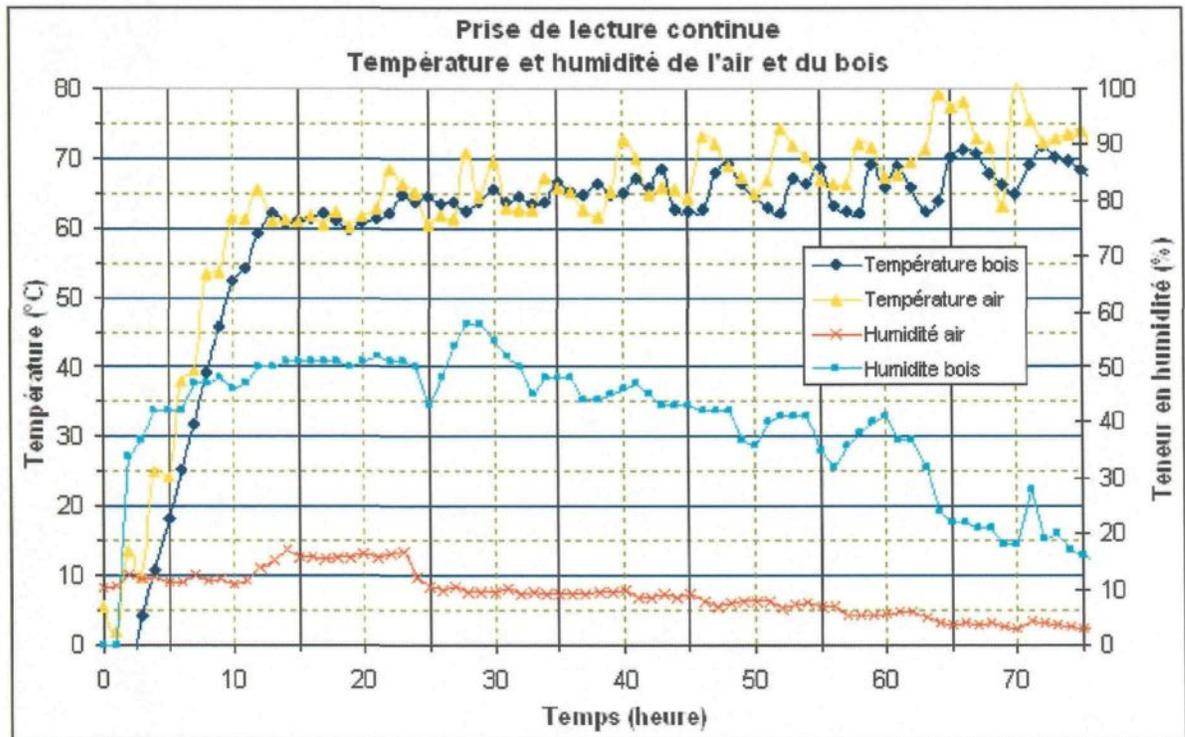


Figure 5.7: Courbes de température et d'humidité de l'air et du bois

Ce deuxième type de test est principalement réalisé afin de reproduire ce mode de séchage lors de la simulation mécanique. La température moyenne du bois doit en théorie se rapprocher de la température humide et non de la température sec de l'air. Lors de l'expérimentation, la température du bois a été mesurée très près de la surface, on peut donc remarquer que la température du bois et de l'air se rapprochent. En majeure partie, la température du bois en surface est sensiblement inférieure étant donné l'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau en surface. De plus, les variations en montée et en chutes rapide sont présentes par la rotation de l'écoulement de l'air à l'intérieur du séchoir.

La figure 5.7 représente donc un séchage différent de la figure 5.8, les pièces et mesures ont été effectuées dans un endroit différent du séchoir afin d'avoir accès à différents équipements d'instrumentation tel que l'application de charge de lestage et les outils de mesure de teneur en humidité du bois par le système de contrôle.

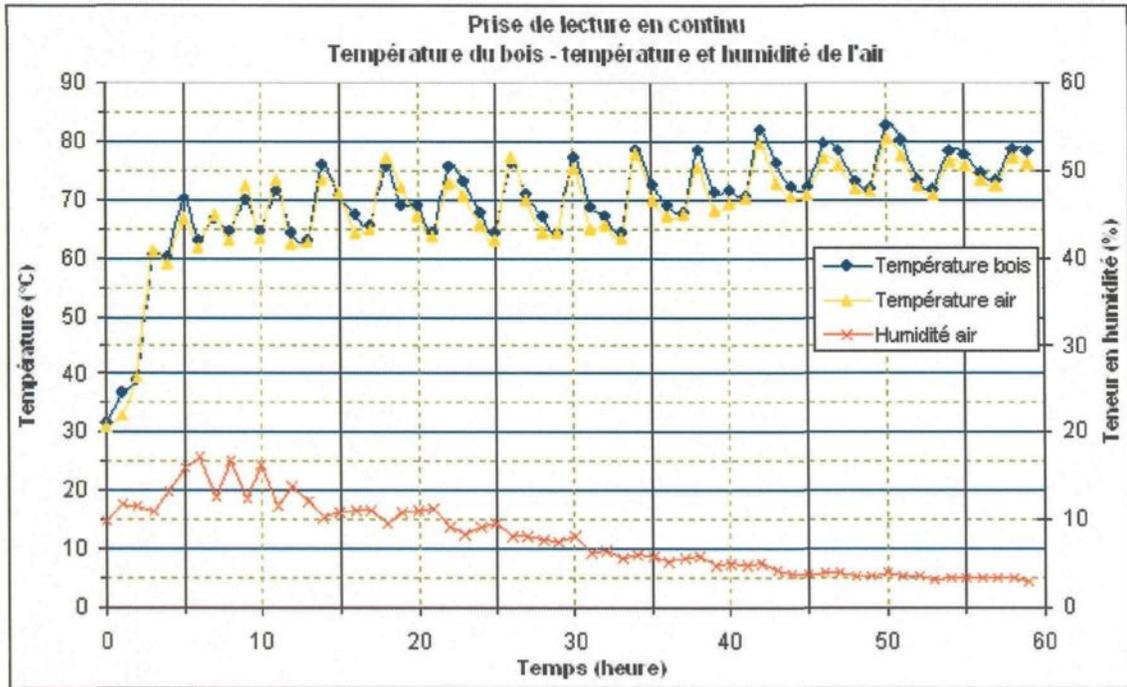


Figure 5.8: Courbe de température et d'humidité de l'air - température du bois

La description des dimensions (voir tableau 5.3) de largeur et épaisseur initiales de la pièce proviennent de l'ajustement des outils de coupe.

Tableau 5.3: Description des dimensions

Propriété	x	y	z
	(m)	(m)	(m)
Dimension	4,9212	0,1492	0,0429

Tel que présenté au tableau 5.4, on retrouve une déviation des fibres dans la pièce. Cette déviation est caractérisée par la direction du coeur de la bille (axe longitudinal) par rapport à la direction de la pièce (axe de longueur de la pièce).

Tableau 5.4: Description des propriétés géométriques

Propriété	x	y	z
	(m)	(m)	(m)
Position du coeur	0,0000	0,0714	0,0308
Axe des fibres	0,9999	-0,0031	-0,0001

Le tableau 5.5 présente la vitesse moyenne de l'écoulement de l'air entre les pièces des paquets du haut du séchoir.

Tableau 5.5: Description de la vitesse de l'air

Type	Vitesse
	(m/s)
Vitesse moyenne séchoir	1,8

La teneur en humidité moyenne est celle mesurée en début de séchage pour l'ensemble du chargement. Tel que présenté au tableau 5.6, on retrouve la teneur en humidité moyenne initiale et la teneur en humidité moyenne finale.

Tableau 5.6: Teneur en humidité moyenne de la pièce

Propriété	Teneur en humidité
Teneur en humidité initiale	29,0%
Teneur en humidité finale	12,6%

Lors de l'expérimentation, les caractéristiques de la géométrie ont été recueillies après séchage. Ces mesures ont permis de déterminer entre autres les propriétés géométriques des échantillons et le degré de torsion final de la pièce, tableau 5.7.

Tableau 5.7: Déformation finale de la pièce

Position (mm)	Angle de torsion (°)
0,0	-3,07
304,8	-1,32
609,6	-0,41
914,4	0,18
1219,2	0,52
1524,0	0,96
1828,8	1,42
2133,6	2,18
2438,4	3,00
2743,2	3,88
3048,0	4,16
3352,8	4,29
3657,6	4,81
3962,4	5,65
4267,2	6,64
4572,0	7,06
4876,8	7,58

À la vue de ce tableau, on peut noter la courbure ayant lieu dans la pièce. De plus, on peut expliquer l'impact du mode de mesure sur l'angle de torsion. En effet, la pièce est retenue sur le banc de mesure à son extrémité tel que présenté à la figure 5.6. À la vue de l'angle de torsion, on peut supposer qu'il y aurait présence de torsion positive à cette extrémité si la pièce était libre de mouvement.

5.3 Simulation numérique

Les informations utilisées dans le cadre de cette application industrielle sont en lien direct avec les données recueillies lors du programme expérimental.

Les pièces à l'étude ont été construites numériquement afin de permettre la simulation. À l'aide du pré-post processeur GiD, la géométrie a été construite. Les pièces sont de dimension principale 4921,2mm x 149,2mm x 42,9mm.

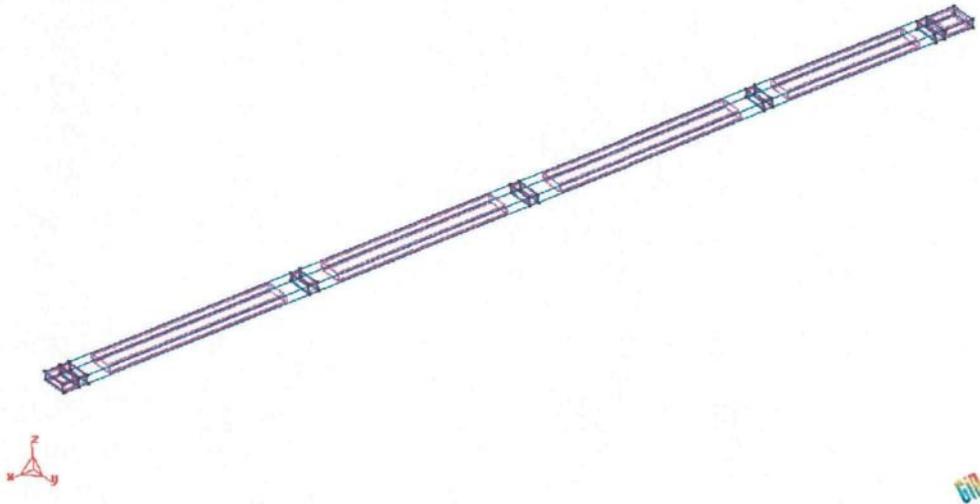


Figure 5.9: Géométrie de la pièce de bois

Le maillage de cette géométrie est de 50 x 15 x 10 éléments hexaèdres à 8 noeuds.

Les noeuds sur les axes x et y sont concentrés à la surface de la pièce, figure 5.10, de manière à bien représenter les forts gradients d'humidité à ces endroits. De plus, tel que présenté à la figure 5.11, le maillage est densifié aux surfaces de contact et d'application de la charge afin de bien représenter les sollicitations mécaniques à ces endroits.

Le bois étant un matériau complexe lorsque présenté sous sa vraie nature, les propriétés sont

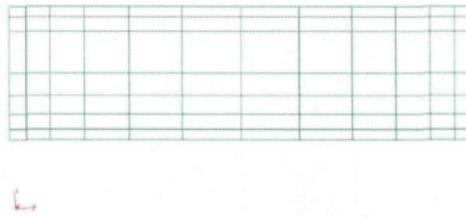


Figure 5.10: Noeuds concentrés à la surface

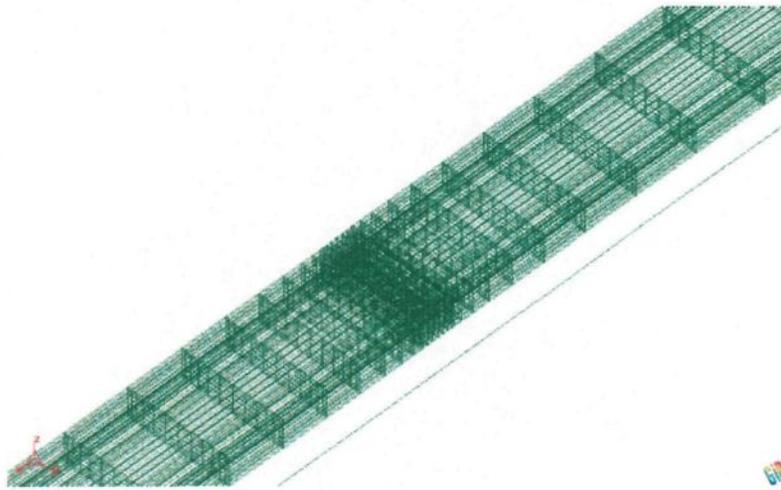


Figure 5.11: Noeuds concentrés aux surfaces d'application de la charge et surface de contact

nombreuses et souvent liées à chaque direction des fibres naturelles. Les propriétés mécaniques sont répertoriées selon le sens longitudinal, radial et tangentiel. Étant donné le peu d'information dans la littérature sur les propriétés mécaniques orthotropes des essences de nos régions, dans le cadre de cette application, il y a utilisation des propriétés orthotropes d'un essence connexe, le Spruce Sitka Dahlblom (1996).

Le tableau 5.8 présente les différentes caractéristiques de l'élasticité du matériau.

Tableau 5.8: Description des propriétés élastiques

Propriété			
Module d'Young (Pa)	$E_L = 11,0e9 + 110,0e9R$	$E_R = 0,83e9$	$E_T = 0,50e9$
Coefficient de Poisson	$\nu_{LR} = 0,45$	$\nu_{LT} = 0,54$	$\nu_{RT} = 0,56$
Module de Coulomb (Pa)	$G_{LR} = 0,455e9$	$G_{LT} = 0,285e9$	$G_{RT} = 0,028e9$

Également, le tableau 5.9 présente les propriétés de retrait et d'expansion thermique. Dans le cas du retrait, les valeurs sont nulles lorsque l'humidité du matériau est au-delà du point de saturation des fibres.

Tableau 5.9: Description des propriétés de retrait

Propriété			
Coefficient de retrait	$\alpha_L = 0,0070 - 0,037R$	$\alpha_R = 0,18$	$\alpha_T = 0,32$
Coefficient de retrait	$\alpha_{LR} = 0$	$\alpha_{LT} = 0$	$\alpha_{RT} = 0$
Coefficient d'expansion thermique	$\gamma_L = 4,0e-6$	$\gamma_L = 23,2e-6$	$\gamma_L = 31,7e-6$

Dans l'objectif de représenter l'évolution des propriétés par rapport à la présence de bois de coeur ou bois d'aubier, les propriétés précédentes sont fonction de la position par rapport au centre de la bille, représenté par R en mètre.

Les propriétés mécanosorptive sont présentées au tableau 5.10.

Tableau 5.10: Description des propriétés mécano-sorptive

Propriété			
Coefficient axial (Pa^{-1})	$m_L = 0,1e-9$	$m_R = 0,15e-6$	$m_T = 0,2e-6$
Coefficient de cisaillement (Pa^{-1})	$m_{LR} = 0,008e-6$	$m_{LT} = 0,008e-6$	$m_{RT} = 0,8e-6$
Coefficient mécanosorptif	$\mu_{LR} = 0$	$\mu_{LT} = 0$	$\mu_{RT} = 1$

Afin d'obtenir le rayon, le positionnement du centre de la bille ainsi que l'axe des fibres doivent être identifiés, ceux-ci sont présentés au tableau 5.11 :

Tableau 5.11: Description des propriétés géométriques pour la pièce analysée

Paramètre	x	y	z
Origine	0,0000	0,0714	0,0308
Direction axial	0,9999	-0,0031	-0,0001

L'application des conditions de contact entre la pièce et les lattes est faite à partir d'un problème de contact permettant d'apposer la force de ressort à ces noeuds, présentée à la figure 5.12.

Pour cette application particulière, la création de sous-maillage est nécessaire afin d'apposer un point de référence fixe permettant d'évaluer le déplacement de la pièce et ainsi la réaction du ressort.

D'autre part, les conditions de mesure de la pièce sur le banc d'essai sont apposées tout au long de la résolution. Ces conditions sont apposées sur une extrémité de la pièce figure 5.6.

La résolution de cette application doit tenir compte à la fois des sollicitations subissent par la pièce lors du séchage et des conditions lors de la prise de mesure.

La stratégie employée afin de reproduire ces deux contextes est de réaliser la simulation sous deux étapes de conditions. La première étape comprend les conditions de retenues de la pièce dans le chargement sur le temps de séchage écoulé. La deuxième étape est basée sur un temps de recouvrement où

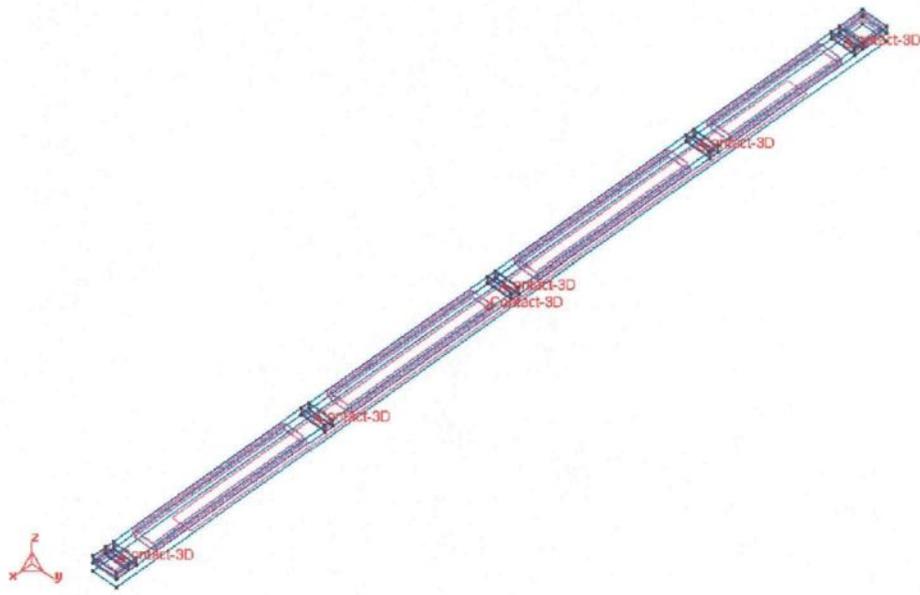


Figure 5.12: Surfaces de contact

les conditions de séchage en température et humidité sont maintenues constantes et où les conditions mécaniques varient afin de libérer la pièce de la retenue de sa position dans le chargement.

La figure 5.13 présente la charge de lestage dans le temps. La figure 5.14 présente les conditions de contact en séchage et lors de la période de recouvrement. La charge de lestage et le contact entre la pièce et les lattes de retenues diminuent dans la période de recouvrement jusqu'à en devenir nul et permettre à la pièce de réagir en étant libérée de ces retenues. Les conditions limites de Neumann sont posées sur les faces du dessus. Ces conditions représentent l'application de la charge par l'équipement de lestage.

La figure 5.15 présente les résultats de la simulation du modèle thermo-hydrrique, c'est-à-dire l'évolution de la teneur en humidité moyenne de la pièce. À la vue de cette figure, l'on peut remarquer qu'il est alors possible de comparer seulement la teneur en humidité initiale et finale. Le fait qu'il y ait information uniquement sur la valeur finale et initiale, il est difficile de cerner expérimentalement l'évolution de la teneur en humidité. Par ailleurs, il est possible de prendre en compte que la résolution

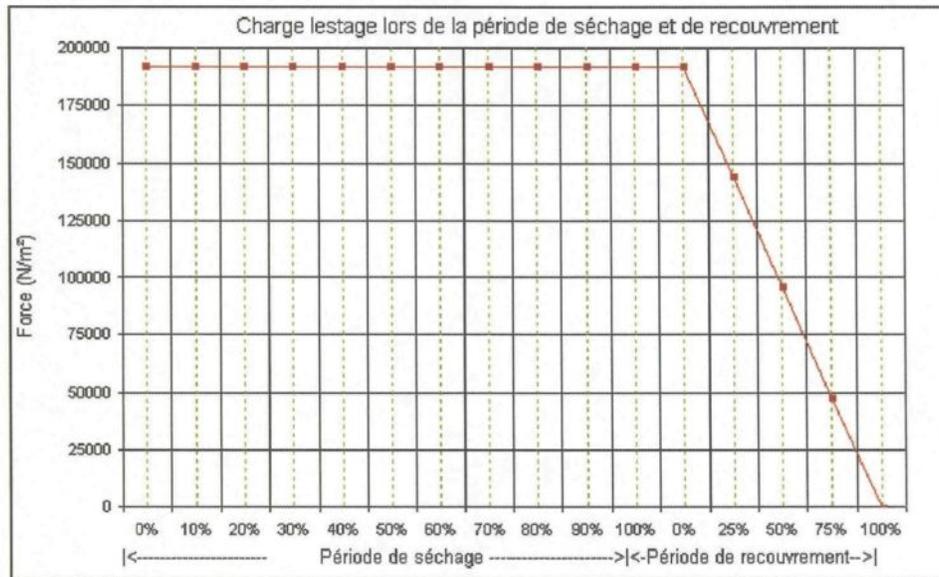


Figure 5.13: Charge de lestage

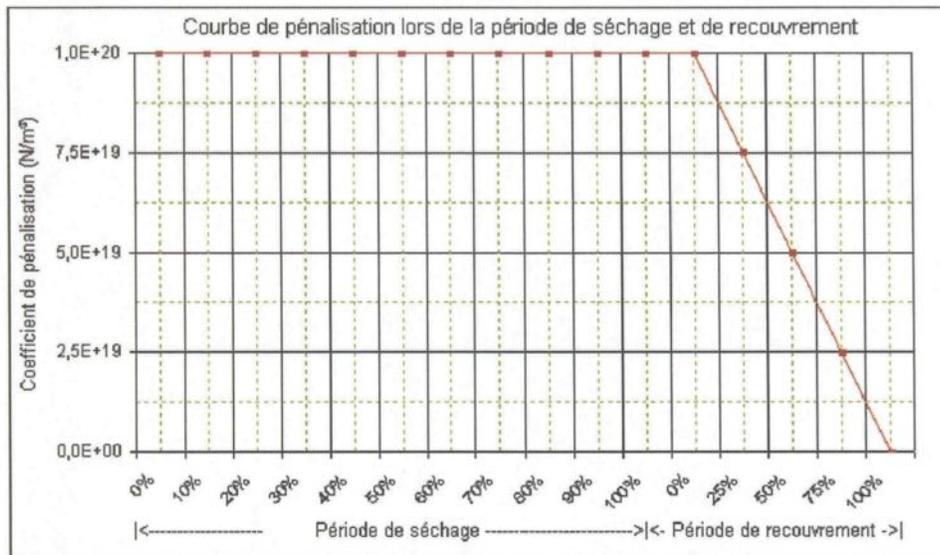


Figure 5.14: Coefficient de pénalisation

du modèle thermo-hydrigue permet de bien représenter l'évolution de la teneur en humidité moyenne.

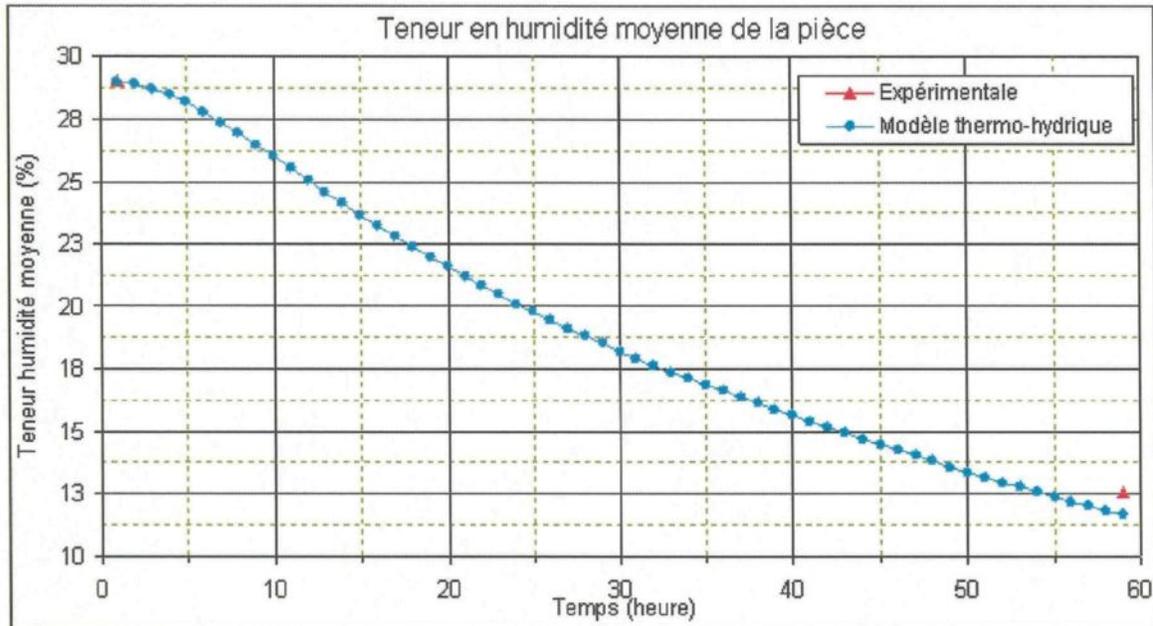


Figure 5.15: Comparatif de la teneur en humidité

Les figures 5.17, 5.16 et 5.18 présentent les résultats finaux de la simulation d'une pièce de bois sous les conditions expérimentales décrites précédemment.

La figure 5.16 présente les déplacements en hauteur des points sur la rive avant de la pièce. À la vue de cette figure, il est perceptible que le déplacement en hauteur diffère entre le modèle mécanique et les mesures expérimentales. En effet, la portée de la pièce lors de la mesure finale a été effectuée sur le banc de courbure selon la figure 5.6. L'évaluation de la déformation de la pièce est influencée par la manière dont est déposée la pièce sur le banc. Malgré que la pièce a été retenue à son extrémité, un déplacement physique vers le bas n'a pas été mesuré étant donné que la face inférieure de la pièce s'est appuyée sur le banc. Pour cette raison, le modèle mécanique présente un déplacement négatif de la rive avant alors qu'au niveau des mesures expérimentales nous voyons à cet endroit un déplacement nul. D'autre part, il est important de noter que l'allure générale du déplacement mesuré expérimentalement se rapproche de l'allure générale calculé par le modèle mécanique.

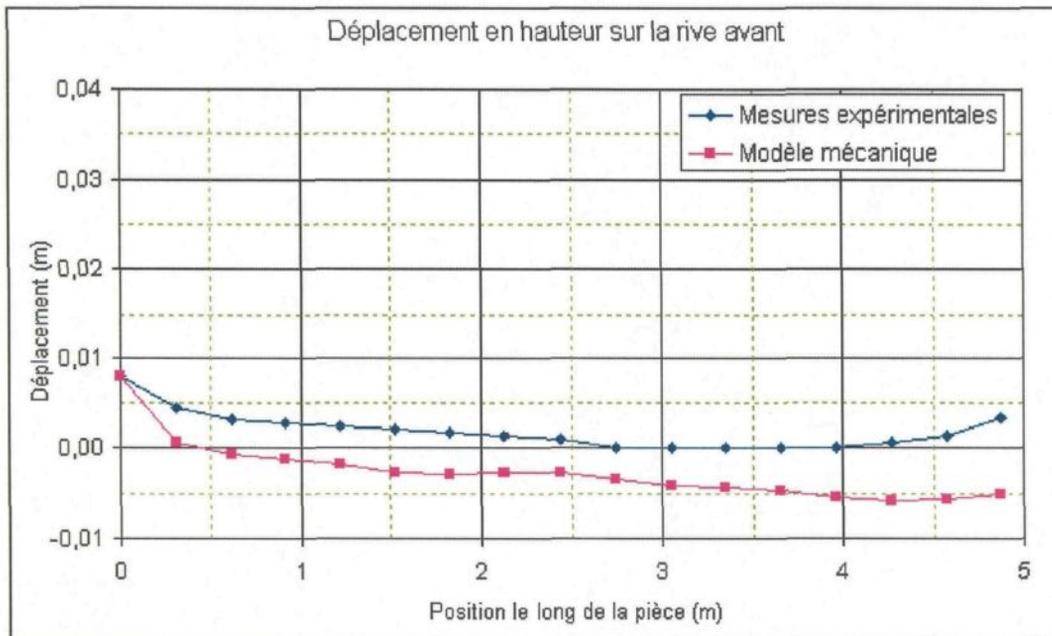


Figure 5.16: Comparatif du déplacement de la rive avant

Dans le même sens, la figure 5.17 présente le rapprochement entre l'évolution des déplacements sur la rive arrière mesurés expérimentalement et ceux représentés par le modèle mécanique. À la vue de cette dernière, l'on remarque encore une fois un écart entre la courbe expérimentale et numérique, le déplacement négatif ayant eu lieu lors des démarches expérimentales a été freiné dû au fait que la pièce est mesurée sur un banc de mesure qui l'empêche d'être plus bas que la surface de contact du banc.

La figure 5.18 présente l'angle de torsion final que l'on calcule à partir des déplacements de chaque rive. À la vue de ces courbes, on remarque que la résolution du modèle mécanique représente convenablement les déplacements de la pièce sous les conditions expérimentales avec une légère sur-estimation de l'angle de torsion. On retrouve à la figure 5.19, la présentation visuelle du déplacement de la pièce retrouvé lors des mesures expérimentales et lors de la simulation.

À la vue de l'ensemble de ces résultats, il est intéressant de remarquer que le modèle a été en

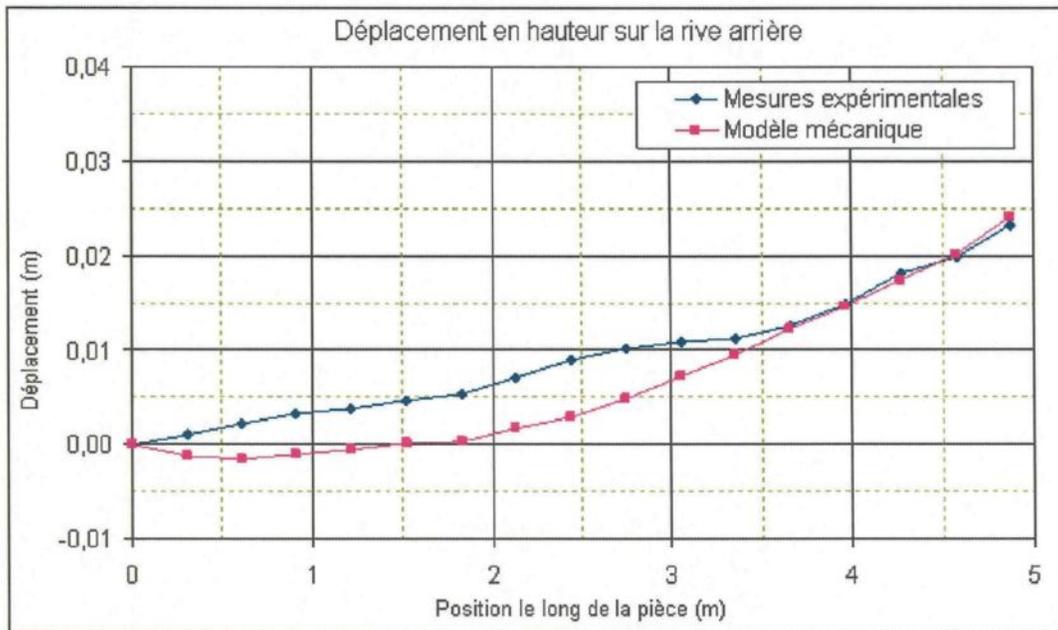


Figure 5.17: Comparatif du déplacement de la rive arrière

mesure de représenter globalement le déplacement de la pièce soumise aux conditions de séchage. D'une autre part, ces résultats démontrent qu'il serait important dans un second exercice de réviser le mode de retenue de la pièce pendant les prises de mesure de déplacement après séchage. Un idéal serait même de mesurer en temps réel les déformations de la pièce pendant séchage et ainsi pouvoir comparer l'évolution représenté par le modèle à chaque pas de temps.

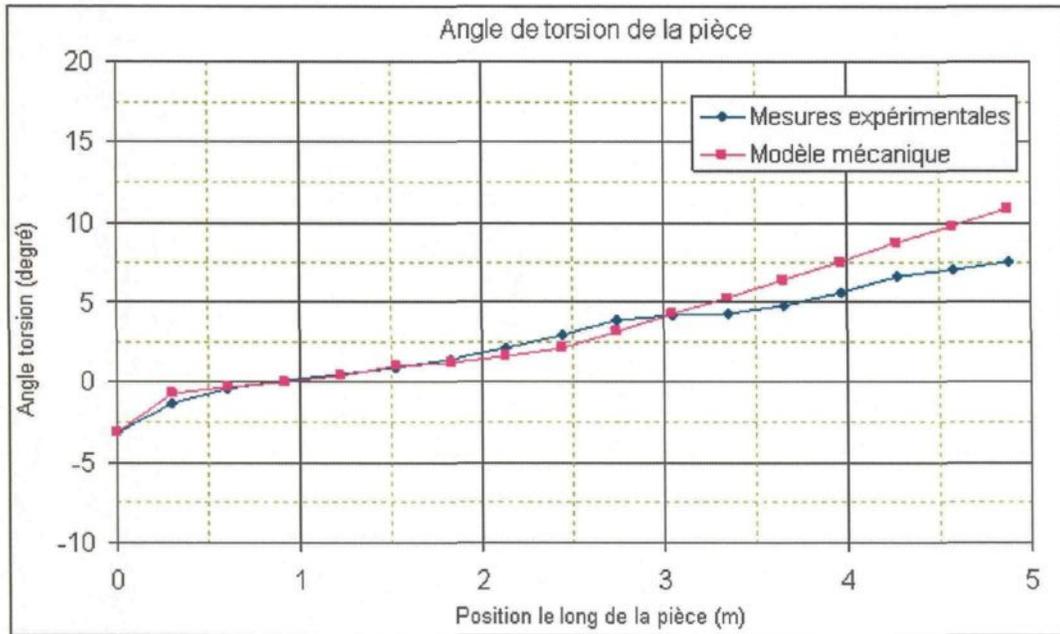


Figure 5.18: Comparatif de l'angle de torsion

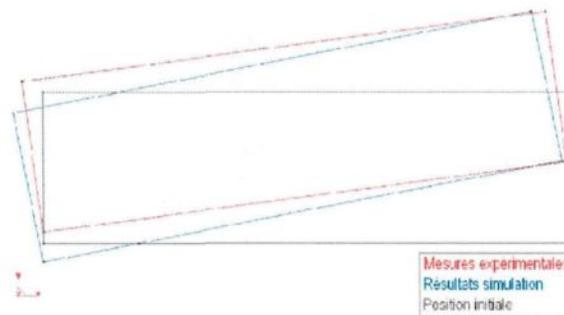


Figure 5.19: Visualisation du déplacement final de la pièce à son extrémité

Chapitre 6

Conclusion

6.1 Rétrospective

Le procédé de séchage du bois rassemble différents phénomènes physiques tels que l'écoulement de l'air, les transferts de chaleur et de masse entre l'air et le bois et finalement, le comportement mécanique du bois soumis à ces conditions. Différents paramètres entourant ce procédé industriel ont un impact sur la qualité finale du matériau. À la vue des travaux scientifiques réalisés au cours des dernières années, on peut noter une compréhension et représentation des phénomènes d'échanges thermique et hydrique.

Les travaux de ce mémoire ont été réalisés au sein de la collaboration entre le partenaire industriel AbitibiBowater et le partenaire universitaire Université du Québec à Chicoutimi. Ce programme de recherche constitue le développement d'un outil de simulation du comportement mécanique du bois soumis au procédé de séchage conventionnel à basse température. Ce mémoire s'est consacré essentiellement sur :

- Le développement d'un modèle 3D qui permet la simulation du comportement du bois soumis aux échanges thermo-hydriques pour des conditions industrielles de séchage ;

- Le fait de tenir compte de l'orthotropie du matériau et développer les lois de comportement selon la direction des fibres du bois ;
- La reproduction expérimentalement et par simulation du cas industriel de séchage d'une pièce avec lestage ;
- L'utilisation d'un outil pour cibler les facteurs influençant les défauts de qualité engendrés lors du processus et ainsi viser des cibles d'optimisation.

Les lois de comportement et la base de rotation orthotrope sont à la source de l'outil développé. Ils permettent de reproduire le comportement du bois tel que le phénomène de retrait, l'élasticité et la mécanosorption. Afin de représenter ces lois selon le caractère orthotrope du bois, la base de rotation permet de situer chaque point de la géométrie dans le repère selon les fibres du matériau. Ces fondements sont reportés dans le modèle numérique développé au sein du code de calcul FESh++ qui sont résolus selon la méthode des éléments finis, l'intégration numérique et par la méthode de Newton Raphson. Le développement du modèle est réalisé en langage C++ selon l'approche orientée objet.

Un modèle préalablement développé selon l'approche de diffusion, résout l'écoulement de l'air à l'aide du code commercial CFX et résout les échanges thermo-hydriques selon l'approche de diffusion par la méthode des volumes finis. L'algorithme de résolution comprend l'interface entre le pré-post processeur GiD, le modèle thermo-hydrique et le modèle de résolution mécanique.

La validation du modèle a été réalisée à partir de cas simplifiés mécanique, thermique et hydrique et à partir d'un cas de la littérature scientifique. Un cas industriel a été reproduit à partir de données expérimentales.

Des analyses de différents cas ont permis de faire ressortir l'impact de ces paramètres sur la qualité finale du matériau suite au procédé de séchage. Entre autres, les paramètres suivants ont été investigués : lestage, position de la coupe et déviation, surséchage de la pièce.

6.2 Réflexion sur la méthodologie adaptée

À la vue de la méthodologie utilisée, il est à remarquer les bienfaits de chaque étape réalisée au cours du projet de recherche. Entre autres, il y eu d'abord la révision des travaux scientifiques au sein de la littérature. Cette étape importante a permis de bien prendre en compte les travaux réalisés antérieurement et d'y utiliser les meilleurs aspects tels que le modèle de transfert de chaleur et de masse bien établi et les notions théoriques afin de construire les lois de comportement pour un matériau orthotrope élasto-mécanosorptif. D'ailleurs, la littérature a permis d'identifier les contributions les plus importantes à tenir en compte dans la représentation des déformations telles que le retrait, la mécanosorption tout en pouvant négliger les contributions d'expansion thermique et de fluage pour des conditions de basse température.

Les points particuliers de l'étape de développement informatique sont les décisions d'adopter l'approche orientée objet et la méthode des éléments finis au sein du code de calcul FESh++. Ceux-ci ont permis de construire un outil flexible permettant d'être utilisé pour des problèmes multi-physiques de grande envergure. L'interface entre le modèle thermo-hydrique et le modèle mécanique a permis l'utilisation de ces deux modèles dans un contexte de conditions de séchage industriel.

L'utilisation d'un modèle 3D fut intéressant afin de représenter l'impact de l'orthotropie du matériau sur son comportement mécanique. Par ailleurs, le pré-postprocesseur GiD fut un choix judicieux étant donné les multiples possibilités d'analyse des résultats.

Lors de l'étape d'expérimentation, les principaux aspects ont été de bien identifier les données sur le procédé de séchage afin de les prendre en compte lors de l'application industrielle. D'autre part, elle permit également de valider le modèle thermo-hydrique.

Lors de la période de validation, il fut profitable de valider tout d'abord par certains cas simples. Par la suite, suivre étape par étape les différentes opérations au sein des lois constitutives et de la base de rotation pour un point d'intégration permit de prendre confiance au modèle développé. Finalement, la validation à l'aide d'un cas de la littérature a permis de corroborer les résultats obtenus par le

modèle.

Au cours de l'utilisation du modèle pour la reproduction du séchage d'une pièce dans un contexte industriel, il y eu prise de mesures en expérimentation. À ce moment, nous avons pu prendre note des impondérables qui ont lieu tel que de cerner la pièce dans des conditions fixes. En effet, l'utilisation d'équipement industriel fait en sorte que plusieurs facteurs non contrôlés en laboratoire peuvent avoir un impact sur les résultats finaux tel que : conditions de température et humidité variables, écoulement de l'air, précision des équipements de contrôle du séchoir et charge de l'équipement de lestage. De plus, l'isolement de la pièce pour prise de mesure en continu ne peut se faire dans un contexte de production, il est possible de prendre note des caractéristiques initiales et des résultats finaux sans mesurer l'évolution des déformations tout au long du procédé.

Les analyses de différents cas industriels ont permis à la fois de présenter la flexibilité d'utilisation de cet outil. Cela fit valoir les multiples possibilités de représenter l'impact de la qualité des opérations entourant le séchage, tel que le contrôle des conditions de température et humidité, l'impact du surséchage et celui du type de coupe des pièces.

6.3 Recommandations et travaux futurs

Au terme des travaux de ce projet, les principales réalisations ont été la construction d'un outil numérique permettant de représenter le comportement mécanique du bois. Étant donné l'utilisation de propriétés matérielles théoriques retrouvées dans la littérature, il est recommandé pour des travaux futurs de déterminer les propriétés orthotropes mécanosorptives pour les essences propres aux régions d'approvisionnement de l'industrie. En ce sens, il sera intéressant de réaliser une étude de sensibilisation des paramètres liés aux propriétés du matériau afin de déterminer les plus importantes propriétés à représenter spécifiquement pour les essences utilisées. Au niveau du programme expérimental, dans le but de réduire les variantes ayant lieu dans un contexte de production, il est recommandé d'établir une étape expérimentale dans un environnement contrôlé tel que séchage en laboratoire à plus petite échelle.

En second lieu, étant donné les possibilités intéressantes de l'utilisation d'un tel outil, il est recommandé d'utiliser celui-ci pour des études de cas industriels complémentaires : entre autres étudier l'impact des différents programmes de séchage, déterminer la dynamique de chacune des étapes de séchage et étudier le passage du point de saturation des fibres.

Étant donné la possibilité de poursuivre ces travaux par l'étude des défauts de gerces, il serait convenable de représenter les valeurs de contraintes selon le sens des fibres afin de repérer l'apparition de contraintes tangentielles élevées. Le présent programme de simulation réalisé dans le cadre de ces travaux pourrait être utilisé dans un contexte de simulation en continu afin d'établir un suivi de production lié au contrôle du procédé de séchage.

Pour des fins d'utilisation de l'outil en des conditions de séchage à haute température, il serait bon d'ajouter aux développements numériques la loi de comportement avec fluage pour un matériau avec propriétés variant en fonction de la température et de l'humidité.

Dans le but de partager ces travaux de recherche, il serait pertinent de réaliser quelques publications à ce sujet étant donné l'atteinte des objectifs et la possibilité d'appliquer cette thèse dans un cadre plus vaste, que ce soit dans le domaine de la recherche universitaire ou plus dans un aspect industriel.

Bibliographie

- Z. Benrabah. *Modélisation tridimensionnelle par éléments finis des phénomènes hygro-thermiques dans les milieux poreux : Application au séchage du bois et à la dessiccation du béton*. Thèse de doctorat, Université Laval, Sainte-Foy, 2002.
- P. Blanchet. *Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie*. PhD thesis, Université Laval, Avril 2004.
- B.A. Bodig, J. et Jayne. *Mechanics of wood and wood composites*. Krieger, 1993.
- D.S. Burnett. *Finite element analysis from concepts to applications*. Addison Wesley, 1987.
- F. Cech, M.Y. et Pfaff. *Manuel de l'opérateur de séchoir à bois pour l'Est du Canada*. Forintek Canada Corp., 1978.
- E. et Jullien J.F. Chassagne, P. et Vidal-Sallé. Étude de phénomènes multi-physiques couplés - application au bois sous les sollicitations thermo-hydro-mécaniques variables induites par l'opération de séchage. *7e Colloque National en Calcul des Structures*, pages 1–6, 2003.
- B. et Taylor J. Cronin, K. et Norton. Development of a simulation tool to enable optimisation of the energy consumption of the industrial timber-drying process. *Applied energy*, pages 325–340, 1996.
- J. et Ormarsson S. Dahlblom, O. et Lindemann. Software for numerical simulation of drying induced deformation of wooden products. *Paper to be presented at 8th IUFRO wood drying conference*, pages 45–50, 2003.

- S. et Petersson H. Dahlblom, O. et Ormarsson. Prediction of deformations in wood during drying by an extended two-dimensional formulation. *Paper to be presented at 5th IUFRO wood drying conference*, pages 69–76, 1996.
- G. Dhatt and G. Touzot. *Une présentation de la méthode des Éléments finis*. Maloine S.A Éditeur Paris et Les Presses de l'Université Laval Québec, 1981.
- D.W. et Kretschmann D.E. et Hernandez R. et Highley T.L. et Ibach R.E. et Liu J.Y. et McDonald K.A. et Miller R.B. et Moody R.C. et Rowell R.M. et Simpson W.T. et Soltis L.A. et TenWolde A. et Wolfe R.W. et Vick C.B. et White R.H. et Williams R.S. et Winandy J.E. et Youngquist J.A. Dietenberger, M.A. et Green. *Wood handbook : wood as an engineering material*. Forest products society, 1999.
- M. et Bissonnette B. et Cloutier A. Fafard, M. et Boudjelal. Three dimensional viscoelastic model with nonconstant coefficients. *ASCE J. of Eng. Mech.*, 127(8) :808–815, 2001.
- A. Fortin. *Analyse numérique*. 2 edition, 2001. ISBN 2-553-00936-4.
- P. Goulet. *Modélisation du comportement thermo-électro-mécanique des interfaces de contact d'une cuve de Hall-Hérault*. PhD thesis, Université Laval, Faculté des études supérieures, département de génie civil, Novembre 2004.
- L.-B. et Keey R.B. Haque, M.N. et Langrish T.A.G. et Keep. Model fitting for visco-elastic creep of pinus radiata during kiln drying. *Wood science and technology*, 34 :447–457, 2000.
- D.C. Hermanson, J.C. et Stahl. Transformation of elastic properties for lumber with cross grain. *journal of structural engineering. ASCE*, 123(10) :1402–1408, 1997.
- P. Houska, M. et Koc. Sorptive stress estimation : An important key to the mechano-sorptive effect in wood. *Mechanics of time-dependent materials*, 4 :81–98, 2000.
- N.H. Kang, W. et Lee. Mathematical modeling to predict drying deformation and stress due to the differential shrinkage within a tree disk. *Wood Science and Technology*, 36 :463–476, 2002a.

- N.H. Kang, W. et Lee. Mathematical modeling to predict drying deformation and stress due to the differential shrinkage within a tree disk. *Wood Science and Technology*, 36 :463–476, 2002b.
- N.H. et Jung H.S. Kang, W. et Lee. Simple analytical methods to predict one- and two-dimensional drying stresses and deformations in lumber. *Wood Science and Technology*, 38 :417–428, 2004.
- L.C. et Mackay J.F.G. et Nielson R.W. et Smith R.S. et Wang S.J. Kirbach, E.D. et Oliveira. *Cost reductions and added value through a sawmill operations profit improvement program*. Forintek Canada Corp., 1990.
- R. et Osma A. et Kocaefe Y. Kocaefe, D. et Younsi. Modelling of wood thermotransformation process. *European conference on wood modification*, 2007a.
- R. et Poncsak S. et Kocaefe Y. Kocaefe, D. et Younsi. Comparison of different models for the high-temperature heat-treatment of wood. *International journal of thermal sciences*, 46 :707–716, 2007b.
- M. Leger, F. et Amazouz. *Évaluation des pratiques de contrôle et de commande des séchoirs à bois*. Forintek Canada Corp., 2003.
- J. et Cloutier A. Lin. Finite element modelling of the viscoelastic behaviour of wood during drying. *5th IUFRO wood drying conference*, pages 117–122, 1996.
- P. et Richard D. et Fafard M. Marceau, D. et Goulet. Fesh++, une nouvelle approche orientée objet pour la simulation par éléments finis des problèmes multi-physiques. *7e Colloque National en Calcul des Structures*, pages 1–6, 2005.
- S. Martensson, A. et Svensson. Application of a material model describing drying stresses in wood. *Paper to be presented at 5th IUFRO wood drying conference*, pages 93–102, 1996.
- I. et Demirdzic I. Martinovic, D. et Horman. Numerical and experimental analysis of a wood drying process. *Wood science and technology*, 35 :143–156, 2001.

- M. Moutee. *Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage*. PhD thesis, Université Laval, Août 2006.
- O. et Petersson H. Ormarsson, S. et Dahlblom. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation part 1 : Theory. *Wood Science Technology*, 32 :325–334, 1998.
- O. et Petersson H. Ormarsson, S. et Dahlblom. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation part 2 : Simulation of drying. *Wood Science Technology*, 33 :407–423, 1999.
- O. et Petersson H. Ormarsson, S. et Dahlblom. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation part 3 : Influence of annual ring orientation. *Wood Science Technology*, 34 :207–219, 2001.
- A. Osma. *Mathematical modelling of high temperature heat treatment of wood*. Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, 2004.
- Y. Osma, A. et Kocaefe D. et Kocaefe. Mathematical modelling of an industrial furnace for high temperature heat treatment of wood. *Can. J. Chem. Eng.*, sera publié en 2009.
- S. Pang. Predicting anisotropic shrinkage of softwood. *Wood science and technology*, 36 :75–91, 2002.
- D. Richard. *Éléments finis du préchauffage électrique d'une cuve de Hall-Hérault : lois constitutives, conception orientée-objet et validation*. PhD thesis, Université Laval, Faculté des études supérieures, département de génie civil, Août 2004.
- J. Ross. *Étude des composés chimiques extraits des lixiviats issus de la thermo-transformation du pin gris (Pinus banksiana Lamb.)*. Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, 2004.
- A. Svensson, S. et Martensson. Simulation of drying stresses in wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60 :72–80, 2002.

- S. Svensson. Strain and shrinkage force in wood under kiln drying conditions. *Holzforschung*, 50 : 463–469, 1996.
- Y. et Lida I. et Furuta Y. Takahashi, C. et Ishimaru. The creep of wood destabilized by change in moisture content. part1 :the creep behaviors of wood during and immediately after drying. 58, *Holzforschung*(58) :261–267, 2004.
- J.N. Timoshenko, S. et Goodier. *Theory of Elasticity*. Mc,Graw-Hill, New York, 2 edition, 1961.
- S. Toratti, T. et Svensson. Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. *Wood Sci Technol*, 34 :317–326, 2000.
- C. Tremblay. *Détermination expérimentale des paramètres caractérisant les transferts de chaleur et de masse dans le bois lors du séchage*. PhD thesis, Université Laval, Quebec, 1998.
- S. Widehammar. Stress-strain relationships for spruce wood : Influence of strain rate, moisture content and loading direction. *Society for experimental mechanics*, 44(1) :44–48, 2004.
- D. et Kocafe Y. Younsi, R. et Kocafe. Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood. *Applied thermal engineering*, 26 :1274–1285, 2006a.
- D. et Poncsak S. et Kocafe Y. Younsi, R. et Kocafe. A diffusion-based model for transient high temperature treatment of wood. *Journal of building physics*, 30(1) :1744–2591, 2006b.
- S. et Kocafe Y. Younsi, R. et Kocafe D. et Poncsak. Transient multiphase model for the high-temperature thermal treatment of wood. *American institute of chemical engineers journal*, 52(7) : 2340–2349, 2006c.